คุณสมบัติตัวตรวจจับแสงชนิดช็อตกี้ โดยมีสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

CHARACTERIZATION OF SCHOTTKY PHOTODETECTOR WITH INDIUM TIN OXIDE TRANSPARENT ELECTRODE

อิสระ ศรีธนชัย

ITSARA SRITHANACHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009-EN-M-043-185

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

คุณสมบัติตัวตรวจวัดแสงชนิดช็อตกีย์ โดยมีสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

CHARACTERIZATION OF SCHOTTKY PHOTODETECTOR WITH INDIUM TIN OXIDE TRANSPARENT ELECTRODE

T107446

อิสระ ศรีธนชัย

ITSARA SRITHANACHAI

เลขหมู่.........
เลขทะเบียน 107446
วัน,เดือน,ปี 29 มี.ค. 2553

b 12201675
i ....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL 2009 –EN-M-043-185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CHARACTERIZATION OF SCHOTTKY PHOTODETECTOR WITH INDIUM TIN OXIDE TRANSPARENT ELECTRODE

ITSARA SRITHANACHAI

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT

OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF

MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2009

KMITL 2009 –EN-M-043-185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ คุณสมบัติตัวตรวจวัดแสงชนิดช็อตกีย์ โดยมีสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

Thesis Title Characterization of Schottky Photodetector with Indium Tin Oxide Transparent Electrode

นักศึกษา นายอิสระ ศรีธนชัย

รหัสประจำตัว 51061308

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-043-185

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	
รศ.ดร.วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	
ดร.อัมพร	โพธิ์ใย	
ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2552 เวลา 09.30-11.30 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

วันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2552

สำนักทะเบียนและประมวลผล สจล.
วันที่ส่งเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์
วันที่ ...... เดือน ...... พ.ศ. ......
ลงชื่อ ......

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Thesis Title	Characterization of Schottky Photodetector with Indium Tin Oxide Transparent Electrode
Student	Mr. Itsara Srithanachai
Student ID	51061308
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assist.Prof.Dr. Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This thesis study characteristics of Schottky photodetector with indium tin oxide (ITO) transparent electrode by replace Al with ITO. The light can't pass through Al electrode. So that, current can't generate under Al electrode but generate around it. As a result, ITO films have good characteristics such as high transparent about 90 % and low resistivity about 10^{-3} Ω-cm with 230 nm thickness and anneal in nitrogen atmosphere for 15 mins. The prepare ITO films on silicon substrate for examine shape and area of the films that appropriate for the device. Circle shape and area of 0.0625 mm^2 are the best conditions because of low dark current (I_o) about 4.36 μA. Then, ITO thin films were fabricated on n-Si and p-Si, built in voltage of Schottky contacts were V_{bi} = 0.2 - 0.4 V. Schottky barrier of ITO/n-Si and ITO/p-Si were $\emptyset_{bn}$, $\emptyset_{bp}$ = 0.74, 0.73 V. ITO/n-Si and ITO/p-Si have leakage current 5.03 μA and 5.38 μA at bias 5V. Photocurrent were 1.5 mA and 3 mA at 25,000 lux, capacitance of diode were 110 pF and 95 pF, cut off frequency were 120 kHz and 125 kHz, respectively. In conclusion, the results from this experiment that ITO/n-Si and ITO/p-Si have good characteristics of photodetector.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาและอำนวยความสะดวก ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดมารวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ดีงามให้กับลูกศิษย์ทุกคน

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง และ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทาง จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.ฐิตินัย แก้วแดง และ รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ ที่ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขอขอบพระคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ใย และศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ให้ใช้เครื่อง FESEM, EDX และ Surface profiler ตลอดจนให้คำปรึกษาวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ คุณสุรชาติ เมืองอ่ำ และ คุณจิรวัฒน์ ปราบเขต ที่ให้คำชี้แนะการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำชี้แนะและแนะนำการใช้อุปกรณ์ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ขอขอบคุณ คุณสุรดา เอื้อมานะพงษ์, คุณฤดีพร เลิศวศินกุล และคุณฤทธิชัย ดรุณเนตร นักศึกษาปริญญาตรีชั้นปีที่ 4 และนักศึกษาปริญญาตรีในปีการศึกษา 2551 ทุกท่านที่ช่วยวัดผลการทดลองบางส่วน

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาและอบรมสั่งสอนตั้งแต่เริ่มต้นงานวิจัยเป็นต้นมา

สุดท้ายนี้กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ และญาติทุกท่าน ที่ให้การสนับสนุนและส่งเสริมในการศึกษาทุกระดับชั้นด้วยดีมาตลอด อีกทั้งคอยเป็นกำลังใจพร้อมทั้งให้คำปรึกษาและคำแนะนำที่ดีเสมอมา

อิสระ ศรีธนชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ...II

กิตติกรรมประกาศ...III

สารบัญ... IV

สารบัญตาราง.. VIII

สารบัญรูป...IX

รายการคำย่อ...XIII

รายการสัญลักษณ์...XIV

บทที่ 1 บทนำ..1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย..1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..6

1.3 สมมติฐานของการศึกษา..7

1.4 ขอบเขตงานวิจัย..8

1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย... 8

บทที่ 2 ทฤษฎี...11

2.1 อินเดียมทินออกไซด์..11

2.1.1 การประยุกต์ใช้งานจองอินเดียมทินออกไซด์...12

2.1.2 โครงสร้างและสูตรทางโครงสร้าง...12

2.1.3 สมบัติทางกายภาพ...13

2.1.4 สมบัติทางไฟฟ้า... 13

2.1.5 สมบัติทางด้านแสง.. 13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง..13
2.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์.................. 13
2.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน
แบบส่องกราด..17
2.2.3 ระบบวัดสภาพการจัดเรียงของพื้นผิว...20
2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง.. 21
2.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า...26
2.5 โฟโตไดโอด.. 27
2.5.1 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง..27
2.5.1.1 โฟโตคอนดัคเตอร์...28
2.5.1.2 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น... 28
2.5.1.3 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n... 29
2.5.1.4 โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์..30
2.5.2 รอยสัมผัสช็อตกีย์...31
2.5.3 กลไกการเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์..32
2.5.4 รอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะได้รับไบอัส...34
2.5.4.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง... 34
2.5.3.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ..35
2.5.5 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์..................................37
2.5.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์...........................37

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.. 39
3.1 การออกแบบ และสร้างกระจกต้นแบบ...39
3.2 กระบวนการสร้าง..41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง..50

4.1 การศึกษาและเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์..59

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ไม่ได้แอนนีล.................. 51

4.1.1.1 การวัดคุณสมบัติทางโครงสร้าง..51

4.1.1.2 การวัดคุณสมบัติทางแสง..55

4.1.1.3 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า.. 57

4.1.2 การแอนนีลฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ในอากาศ..58

4.1.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง.. 58

4.1.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง.. 61

4.1.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า.. 62

4.1.3 ฟิล์มบางแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน... 63

4.1.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง.. 63

4.1.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง.. 64

4.1.3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า.. 65

4.1.4 ฟิล์มบางแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน...65

4.1.4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง...65

4.1.4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง.. 66

4.1.4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า.. 67

4.2 สร้างตัวตรวจวัดแสงโดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส............ 69

4.2.1 ส่วนที่ 1 ออกแบบและหาขนาด รูปร่างของพื้นที่รับแสงที่เหมาะสม........ 69

4.2.2 ส่วนที่ 2 สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง.. 71

4.2.2.1 การทดสอบลักษณะสัมผัสของรอยสัมผัสช็อตกีย์...............................72

4.2.2.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง...... 74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

4.2.2.3 การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจ-
วัดแสง......77
4.2.2.4 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง......78

บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง...... 79

เอกสารอ้างอิง...... 82

ภาคผนวก...... 88

ประวัติผู้เขียน......100

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์..13

2.2 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน แบบส่องกราด.. 18

4.1 เปรียบเทียบการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน..........................54

4.2 ขนาดเกรนที่เวลาในการเตรียมฟิล์มบางแตกต่างกัน..55

4.3 เปรียบเทียบค่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทานไฟฟ้า......................................69

4.4 เปรียบเทียบกระแสมืดของฟิล์มบางที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ..................................70

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
1.1	ความแตกต่างของขั้วไฟฟ้าระหว่าง (a) ขั้วไฟฟ้าทึบแสง (b) ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส	5
2.1	โครงสร้างอะตอมของอินเดียม (In_2O_3) ถูกเจือด้วยดีบุก (Sn)	12
2.2	โครงสร้างของอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3)	12
2.3	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	14
2.4	ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD	15
2.5	เครื่องมือที่ใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	17
2.6	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	18
2.7	การทำงานของ SEM	19
2.8	ภาพเครื่องระบบวัดสภาพการจัดเรียงของพื้นผิวของบริษัท Tencore	21
2.9	แผนภาพการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง	21
2.10	เครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Helios	23
2.11	เครื่องวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้ว ของบริษัท Prometrix รุ่น Omni Map ® RS35	26
2.12	(ก) โครงสร้างของโฟโตคอนดัคเตอร์ (ข) แถบพลังงานของโฟโตคอนดัคเตอร์ เมื่อได้รับแสง	28
2.13	(ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นเมื่อได้รับแสง	29
2.14	(ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n (ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เมื่อได้รับแสง	30
2.15	โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ชนิดรีชทรู	31
2.16	โครงสร้างของช็อตกีย์โฟโตไดโอด	31
2.17	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์	33
2.18	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์	34
2.19	แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

2.20 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....36

2.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น.....37

2.22 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอด.....38

3.1 ขนาดและลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และวงกลมของฟิล์มบางอินเดียมทิน - ออกไซด์ตามลำดับ.....40

3.2 ลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง.....41

3.3 สรุปกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง schotty photodetector.....49

4.1 ลักษณะของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาต่างๆกัน.....51

4.2 องค์ประกอบทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ที่เวลาในการสปัตเตอร์ต่างๆ คือ 5, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ.....52

4.3 ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการสปัตเตอร์ต่างๆ (a) 5 นาที, (b) 15 นาที, (c) 30 นาที และ (d) 60 นาที.....53

4.4 การวัดความหนาของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาในการสปัตเตอร์ต่างๆ โดยใช้เทคนิค SEM.....54

4.5 การหาขนาดเกรน.....55

4.6 การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนาต่างๆ.....55

4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่องผ่านและความหนาฟิล์มบาง ที่ความยาวคลื่น 670 nm.....56

4.8 สภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ความหนาของฟิล์มค่าต่างๆ.....57

4.9 ลักษณะทางโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงหลังจากทำการแอนนีลในบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 500°C (a) 75 nm, (b) 229 nm, (c) 521 nm และ (d) 1,166 nm ตามลำดับ.....58

4.10 เปรียบเทียบลักษณะของเกรนระหว่าง (a) ไม่ได้แอนนีล (b) แอนนีลในบรรยากาศ.....59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.11 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm หลังการแอนนีลในอากาศ ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ (a) 200 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C และ (d) 500 °C............ 60

4.12 รอบแตกที่พบหลังจากแอนนีลที่อุณหภูมิ (ก) 400 °C และ (ข) 500 °C........................60

4.13 กราฟแสดงแนวโน้มการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีลในอากาศที่อุณหภูมิในการแอนนีลต่างๆ.. 61

4.14 กราฟแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังจากแอนนีลในบรรยากาศที่อุณหภูมิในการแอนนีลต่างๆ...62

4.15 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm แอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิ (a) 200 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C และ (d) 500 °C...............63

4.16 กราฟแนวโน้มการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน......... 64

4.17 กราฟแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังแอนนีลในก๊าซออกซิเจน..............................65

4.18 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm แอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ (a) 200 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C และ (d) 500 °C.............66

4.19 กราฟแนวโน้มการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน........66

4.20 กราฟแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังแอนนีลในก๊าซไนโตรเจน...............................67

4.21 การหาค่าความหนาที่เหมาะสมของฟิล์มบาง..68

4.22 ลักษณะรูปร่างและขนาดพื้นที่รับแสงที่ทำการศึกษา..70

4.23 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์...71

4.24 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่จะทำการสร้างในงานวิจัยนี้.. 72

4.25 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ ขณะไม่ได้รับแสง..72

4.26 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si 73

4.27 การหากระแสมืด (I0) ของรอยสัมผัส (a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si..........................73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.28 การกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน โดยความเข้มแสงมีค่าต่างๆ....................75

4.29 กระแสแสงที่ความเข้มแสงต่างๆ (a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si 76

4.30 ระบบเครื่องวัดความจุไฟฟ้า-แรงดัน รุ่น HP4284..77

4.31 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงทั้ง 2 โครงสร้าง..................................77

4.32 ความกว้างของบริเวณปลอดภาหะที่แรงดันต่างๆ...78

4.33 ชุดเครื่องมือวัดผลการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตดีเทคเตอร์..................................79

4.34 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงในช่วง 1kHz – 1 MHz..........................75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

การดำเนินชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน มีสิ่งอำนวยความสะดวกเกือบทุกอย่าง ทำให้มนุษย์สะดวกสบายขึ้น ตัวอย่างเช่น รถไฟฟ้า โทรศัพท์มือถือ คอมพิวเตอร์ เป็นต้น มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่อดีตจนมาถึงทุกวันนี้และคาดว่ายังคงพัฒนาอีกยาวไกลในอนาคต งานด้านอิเล็กทรอนิกส์เป็นอีกด้านหนึ่งที่มีการคิดและพัฒนาเพื่อเติมเต็มความต้องการของมนุษย์ และยิ่งในปัจจุบันเทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีการแข่งขันค่อนข้างสูง โดยมุ่งเน้นเพิ่มประสิทธิภาพและรวมเอาเทคโนโลยีหลายๆ อย่างไว้ในอุปกรณ์เดียว และยิ่งถ้ารวมอุปกรณ์ต่างๆไว้ในเครื่องเดียวยิ่งทำให้มีขนาดใหญ่การจะพกพาไปไหนค่อนข้างลำบากทำให้ต้องหาวิธีในการลดขนาดและน้ำหนักของเครื่องมือเหล่านั้นอีก และนี่คือส่วนหนึ่งของค้นคว้าเพื่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกของมนุษย์ที่ไม่มีวันจบสิ้น ในงานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจัดได้ว่าเป็นงานอีกด้านที่วิจัยอย่างต่อเนื่องมานานมากแล้ว และถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนามาก่อนแต่ยังมีการคิดค้นและหาหนทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ฉะนั้นงานวิจัยนี้ได้เล็งเห็นแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อย่างหนึ่ง คือ ตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงหรือโฟโตไดโอด (photodiode) เป็นอุปกรณ์ที่มีการคิดค้นและพัฒนามานาน ทำให้ในปัจจุบันมีตัวตรวจวัดแสงหลายแบบออกมาขายตามท้องตลาดมากมายหลายชนิด ตามลักษณะการใช้งาน เช่น โฟโตไดโอดรอยต่อพี-เอ็น เป็นไดโอดที่มีอัตราเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง, โฟโตไดโอดแบบ PIN เป็นอุปกรณ์ที่มีอัตราความเร็วการทำงานสูงและมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงดี ลักษณะงานที่ใช้ไดโอดประเภทนี้นิยมใช้ในงานสื่อสารด้วยคลื่นแสง เนื่องจาก ไฟโตไดโอดชนิดนี้มีความเร็วในการทำงานสูง และอีกชนิดคือ โฟโตไดโอดแบบอะวาลันช์ เป็นไดโอดที่สามารถทนแรงดันสูง [1-2] จากตัวอย่างไดโอดที่ยกมาข้างต้นนั้น จะเห็นได้ว่าการใช้งานของโฟโตไดโอดมีการใช้อย่างกว้างขวางทั้งอุปกรณ์ขนาดเล็กและอุปกรณ์ขนาดใหญ่ สิ่งที่ทำให้ตัวตรวจวัดแสงเหล่านี้มีลักษณะการทำงานที่ต่างกันคือ ฐานรอง, โครงสร้างและสารที่นำมาใช้ในกระบวนการสร้าง อุปกรณ์ตรวจวัดแสงส่วนใหญ่มีส่วนประกอบหลักๆ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฐานรอง, โครงสร้างภายในของอุปกรณ์และส่วนของบริเวณขั้วที่เป็นจุดเชื่อมต่อเพื่อประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่างๆ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษา แก้ปัญหาและพัฒนาประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อช็อตกีย์ ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ทางศูนย์วิจัยวิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) มีการสร้างและพัฒนามานานทำให้ง่ายต่อการสร้างและวิเคราะห์ผลการทดลอง ไดโอดชนิดนี้มีโครงสร้างที่ไม่ค่อยซับซ้อน โดยจะมีส่วนประกอบหลัก คือ ฐานรอง, โครงสร้างภายในและขั้วโลหะทึบแสง [3-4] จากการวิเคราะห์ไดโอดชนิดนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพของไดโอด ทำได้โดยเปลี่ยนขั้วไฟฟ้าจากสารทึบแสงเป็นสารโปร่งใส เนื่องจากไดโอดที่มีขั้วไฟฟ้าทึบแสงนั้น แสงสามารถทะลุผ่านขั้วโลหะได้น้อยส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานอาจจะลดลง เหตุผลอีกประการคือเมื่อใช้โลหะทึบแสงที่มีความหนามากๆ แสงจะเกิดสะท้อนและกระเจิงออก โดยไม่ทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าทำให้ไดโอดใช้งานไม่เต็มประสิทธิภาพ แต่เมื่อเรานำแนวคิดของเทคโนโลยีโซลาร์เซลล์ มาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ตรวจวัดแสงคือ นำขั้วไฟฟ้าโปร่งใสมาแทนที่ขั้วไฟฟ้าทึบแสงโดยจะทำให้แสงสามารถทะลุผ่านไปยังตัวอุปกรณ์ได้ ทำให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [5-6] สารประกอบโปร่งใสที่ใช้ในปัจจุบันมีด้วยกัน 2 ชนิด คือ สารที่ประกอบด้วยธาตุ 2 ธาตุ เช่น In_2O_3 ZnO, CdO และ SnO_2 สารที่ประกอบด้วยธาตุ 3 ธาตุ เช่น Zn_2SnO_4, $MgIn_2O_4$, $CdSb_2O_6$:Y, $ZnSnO_3$, $GaInO_3$ และ $In_4Sn_3O_{12}$ สารเหล่านี้ถูกนำมาใช้เป็นสารประกอบออกไซด์หลายชนิด ซึ่งได้รับการพัฒนาการออกแบบให้เหมาะสมกับงานนั้นๆ โดยศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม คือ สมบัติทางโครงสร้าง, สมบัติทางไฟฟ้า, สมบัติทางแสง, สมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ [7]

ในระยะแรกของการศึกษาและพัฒนาฟิล์มบางโปร่งใสนิยมใช้ฟิล์มบางที่ประกอบด้วยธาตุจำนวน 2 ธาตุ โดยมีการศึกษาและพัฒนา จนเข้าสู่ปี 1990 มีการเริ่มใช้ฟิล์มบางโปร่งใสที่ประกอบด้วยธาตุจำนวนถึง 3 ชนิด สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์เป็นสารโปร่งใสที่ใช้ในงานวิจัยทางด้านฟิสิกส์และเคมีมานาน ทำให้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนถึงทุกวันนี้ และในการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงของงานวิจัยนี้มีแนวคิดที่จะนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสแทนที่โลหะทึบแสงเดิม เนื่องจากคุณสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์นี้มีความเหมาะสมที่นำมาแทนโลหะทึบแสงได้ ทั้งเรื่องของสภาพต้านทานต่ำ, จุดหลอมเหลวสูงและการส่องผ่านแสงสูง และการศึกษาสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์นี้มีการศึกษามานานมากกว่า 40 ปี ทั้งต่างประเทศและในประเทศไทย มีรายละเอียดดังนี้

การศึกษาและพัฒนาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ในต่างประเทศถึงแม้จะมีการศึกษามานานแล้วก็ตาม แต่การประยุกต์ใช้งานอย่างแพร่หลายพึ่งไม่กี่ปีนี้เอง โดยจะแสดงตัวอย่างงานวิจัยและการประยุกต์ใช้งานในแต่ละปีตั้งแต่ปี 2000-2008 ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยต่างประเทศในปี 2000 – 2008

Donghwan Kim [8] ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธี ion beam sputtering บนฐานรองซิลิคอนผลึกเดี่ยว เตรียมที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 100 °C ในบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน โดยฟิล์มที่ทำการเตรียมมีการส่องผ่านแสงที่สูงถึง 80 % และมีสภาพต้านทานประมาณ 10^{-4} Ω-cm

V. Craciun [9] ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธี ultraviolet-assisted pulsed laser (UVPLD) เตรียมบนฐานรองซิลิคอนและกระจก ฟิล์มบางที่ทำการเตรียมโดยวิธีนี้มีความราบเรียบสม่ำเสมอและมีสภาพต้านทานต่ำประมาณ 4 x 10^{-4} Ω-cm ในงานวิจัยนี้เพื่อศึกษาการเตรียมบางให้เหมาะสมและให้มีคุณสมบัติที่ดี

Ji-Seon Kim, Franco Cacialli และ **Richard Friend** [10] นำอินเดียมทินออกไซด์มาเคลือบด้านขั้วแอโนดของ LED และจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อพัฒนาฟิล์มบางให้เหมาะสมก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วของ LED ต่อไป โดยศึกษาคุณสมบัติต่างๆดังนี้ Ultraviolet photoelectron spectro scopies, atomic force microscopy (AFM), dynamic contact angle measurement, four-point probe และ Hall measurements ซึ่งผลจากการเติมฟิล์มบางหลายๆลักษณะที่แตกต่างกัน ลักษณะของฟิล์มที่เตรียมมีคุณภาพดี พื้นผิวมีความสม่ำเสมอ ความหนาแน่นของพาหะค่อนข้างสูง แต่สภาพคล่องของพาหะค่อนข้างต่ำ ฟังก์ชันงานมีค่าสูง พื้นผิวฟิล์มมีพลังงานสูงทำให้เหมาะสมกับงาน ซึ่งจะเน้นให้ความต่างศักย์บริเวณขั้วทั้งสองมีค่ามากๆ อย่างไรก็ดี งานวิจัยนี้จะเน้นพัฒนาฟิล์มบางเพื่อใช้ต่อไปในอนาคต จึงเน้นศึกษาคุณภาพของฟิล์มบางเป็นส่วนใหญ่

Necmi Biyikli [11] ประยุกต์ใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นชั้นบนสุดของอุปกรณ์โดยวางบนฐานหลายๆ โครงสร้างดังเช่น (AlGaN–GaN, AlGaAs–GaAs, InAlGaAs–InP และ InGaAsP–InP) เพื่อใช้ในย่านความแสง ultraviolet (UV) (400 nm), near-IR (850 nm)และ IR (1550 nm) โดยให้อินเดียมทินออกไซด์ทำหน้าที่คล้ายดักจับแสง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ และเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธี RF magnetron sputtering เมื่อศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางพบว่ามีสภาพต้านทาน 2x 10^{-4} Ω -cm.

Y.S. Kim, J.H. Park และ **D.H. Choi** [12] สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/Au/ITO เตรียมด้วยกระบวนการ RF magnetron sputtering โดยใช้ความหนาของ ITO และ Au ที่แตกต่างกันในแต่ละชั้น ซึ่งผลที่ได้จากการเตรียมฟิล์มบาง ฟิล์มบางมีระนาบที่เด่นชัดคือ (110) สภาพต้านทานมีค่า 5.6 x 10^{-5} Ω-cm และการส่องผ่านแสงประมาณ 71.7 % และในงานวิจัยนี้ศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของฟิล์มบางโดยเปรียบเทียบกันระหว่างโครงสร้าง ITO/Au/ITO ซึ่งเป็นฟิล์มที่ปลูกกันเป็นลำดับชั้นกับฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยต่างๆในการคิดค้นและพัฒนาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ไปจนถึงการประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ต่างๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นเป็นเพียงตัวอย่างงานที่มีการวิจัยและศึกษามาเป็นระยะเวลานาน บางงานวิจัยใช้เวลาติดต่อกันนานหลายปีและตีพิมพ์ผลงานออกมาตลอด บางงานเป็นการศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีต่างกันเพื่อหาแนวทางที่เหมาะสมต่อไป และงานวิจัยอีกมากมายที่ไม่ได้นำเสนอ ส่วนใหญ่ศึกษาเรื่องอินเดียมทินออกไซด์มาทั้งสิ้นเนื่องจากเป็นสารโปร่งใสที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในขณะนี้ ทั้งในประเทศไทยและต่างประเทศต่างศึกษาเรื่องนี้มานานหลายสิบปี ห้องวิจัยหลายๆแห่งในประเทศไทยทำการศึกษาและพัฒนาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยคาดหวังว่าจะพัฒนาอุปกรณ์ทางด้านแสงให้ดียิ่งขึ้น ห้องวิจัยที่ศึกษาสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ในประเทศไทย มีดังนี้

งานวิจัยในประเทศไทย

ภาควิชาฟิสิกส์ มหาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี มีการศึกษาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มานับสิบกว่าปี โดยมีอาจารย์ที่ศึกษาเรื่องนี้อยู่ด้วยกันหลายท่าน เช่น ดร.พัฒนะ รักความสุข ดร.พงศ์พันธ์ จินดาอุดม และ ดร.สุพัฒน์พงษ์ ดำรงรัตน์ เป็นต้น [13] ทำการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีและสภาวะในการเตรียมต่างกัน ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมได้นั้นจะนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์หลายๆอย่าง เช่น อิเล็กโตรโครมิกส์ เซ็นเซอร์ เป็นต้น

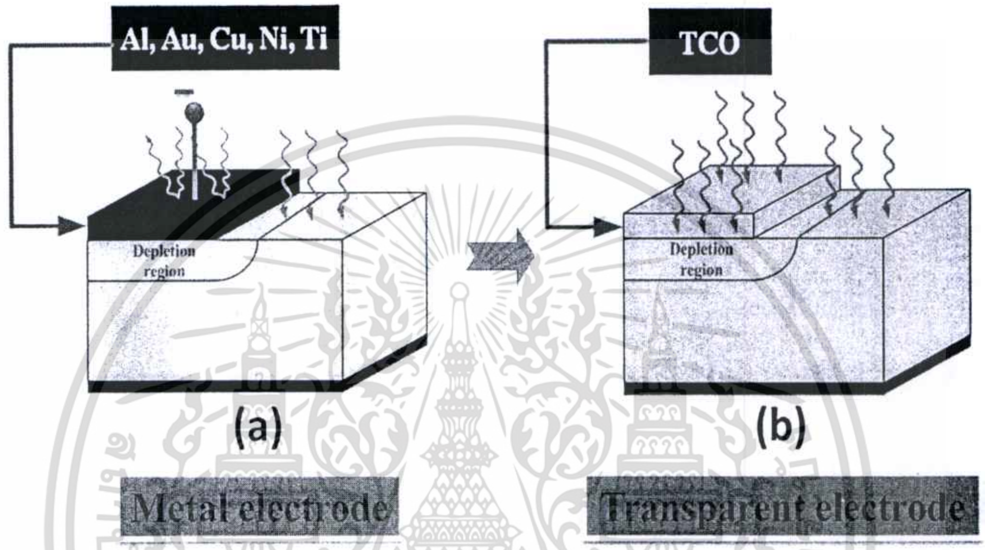
ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมี รศ.ดร. จิติ หนูแก้ว และนักศึกษาปริญญาโท-เอก ร่วมศึกษาเรื่องนี้ด้วย [14] โดยขั้นแรกจะทำการศึกษาลักษณะของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมได้ และหลังจากนั้นประยุกต์เตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ลงบนแผ่นพลาสติก ซึ่งมีการควบคุมอัตราการจ่ายก๊าซเข้าสู่ระบบระหว่างอาร์กอนและออกซิเจน

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมี ผศ. ดร. สุทธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์ [15] เป็นห้องปฏิบัติการที่ศึกษาหลายๆเรื่อง เช่น โซลาร์เซลล์ เซ็นเซอร์ เป็นต้น โดยใช้สารประกอบหลายๆตัวเพื่อเป็นสารตั้งต้น เช่น อินเดียมออกไซด์ ทินออกไซด์ และอินเดียมออกไซด์ เป็นต้น โดยมีทีมงานนักศึกษาปริญญาโทร่วมงานวิจัยและสร้างบนฐานรองที่เป็นซิลิคอนเพื่อประยุกต์ใช้งานต่อไป จะเห็นได้ว่ามหาวิทยาลัยในประเทศไทยเริ่มศึกษาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์กันมากขึ้น ทำให้การเตรียมฟิล์มบางมีความง่ายต่อการศึกษาและหาข้อมูลเพื่อเปรียบเทียบได้ง่าย

เมื่อ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เข้ามามีบทบาทในการศึกษาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีการทำงานวิจัยร่วมกับศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และทำการวิจัยในเรื่องของอุปกรณ์ตรวจวัด โดยศึกษาหลายๆ โครงสร้าง เช่น ไดโอดโครงสร้าง PIN, MSM, MS, CMOS และ การศึกษาฟิล์มเพชร เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้น และในที่นี้จะกล่าวถึงมูลเหตุจูงใจในการพัฒนาประสิทธิภาพของไดโอด โดยโครงสร้างที่จะทำการสร้างนี้คือ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MS ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อนและง่ายต่อการวิเคราะห์ผล โดยจะประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ซึ่งมีความโปร่งใสสูงและมีสภาพต้านทานต่ำ เหมาะสมที่จะนำมาแทนอลูมิเนียม โดยคาดว่าการที่อินเดียมทินออกไซด์เป็นสารโปร่งใสทำให้แสงสามารถทะลุบริเวณขั้วไฟฟ้าและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงได้



รูปที่ 1.1 ความแตกต่างของขั้วไฟฟ้าระหว่าง
(a) ขั้วไฟฟ้าทึบแสง (b) ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

จากรูปจะเห็นว่ารูป 1.1 (a) เมื่อแสงตกกระทบจะไม่สามารถผ่านไปได้ ดังนั้นชั้นปลอดพาหะที่อยู่ใต้ขั้วไฟฟ้าทึบแสงจึงไม่มีแสงทะลุไปถึง ทำให้ไม่มีการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังนั้นประสิทธิภาพของอุปกรณ์น้อยลง ในทางกลับกัน รูป 1.1 (b) เมื่อแสงตกกระทบ แสงสามารถทะลุผ่านไปยังชั้นเขตปลอดพาหะ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และส่งผลให้ประสิทธิภาพของอุปกรณ์ดีขึ้นกว่าขั้วไฟฟ้าทึบแสง

คุณสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์ดังที่กล่าวมาข้างต้น เป็นสารที่มีคุณสมบัติดีในหลายๆ ด้าน การนำฟิล์มบางมาประยุกต์ใช้กับงานด้านสารกึ่งตัวนำ จึงจำเป็นต้องทำการศึกษาคุณสมบัติก่อนที่จะนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MS โดยวิธีการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์นั้น เตรียมโดยวิธีอาร์เอฟ สปัตเตอร์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมและมีความเหมาะสมที่สามารถสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ให้มีประสิทธิภาพ เนื่องจากจะให้ความราบเรียบและสามารถควบคุมความหนาของฟิล์มได้แล้ว ยังเป็นวิธีที่สะดวกและไม่ยุ่งยาก [16] จากนั้นเมื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si แล้ว จะทำการศึกษาคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นฐานต่างๆ เช่น คุณสมบัติกระแส-แรงดัน, คุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันและการตอบสนองทางความถี่ เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติตัวตรวจวัดแสงและนำไปใช้งานต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

จุดมุ่งหมายในการทำวิทยานิพนธ์นี้เพื่อพัฒนาตัวตรวจวัดแสงของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไปของงานวิจัยด้านสารกึ่งตัวนำ โดยใช้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ซึ่งศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์สามารถพัฒนาต่อไปได้ในอนาคต

โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยลำดับตามหัวข้อต่อไปนี้

1. เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยเตรียมด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์ โดยวิเคราะห์ผลจากสีของฟิล์มบางและการยึดติดกับฐานรอง
2. เพื่อศึกษาผลของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์เมื่อมีการปรับเปลี่ยนเงื่อนไขในการเตรียมต่างๆ เช่น ความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อฟิล์มบางหลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพ โดยทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของฟิล์มบาง คือ คุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง
4. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์โดยวิเคราะห์ผลต่างๆเช่น หาองค์ประกอบของธาตุบนฟิล์มบาง ใช้เครื่องมือ X-ray Diffraction (XRD) และ Energy Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometer (EDX) ตรวจสอบพื้นผิวของฟิล์มบางว่ามีความราบเรียบและหาขนาดเกรน โดยใช้เครื่องมือ Scanning Electron Microscope (SEM) วัดความหนาของฟิล์มบาง โดยใช้เครื่อง Surface profiler
5. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ บนฐานรองกระจกสไลด์ โดยวัดค่าสภาพต้านทานแผ่น โดยใช้เครื่องมือวัดแบบ 4 ขั้ว (four point probe)
6. เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยวัดค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยใช้เครื่องมือ UV-Visible spectroscope
7. เพื่อศึกษาการตัวตรวจวัดแสงโดยนำอินเดียมทินออกไซด์ ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และทำการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแส-แรงดัน (I-V) คุณสมบัติความจุไฟฟ้า (C-V) และความถี่ในการใช้งาน (Frequency)
8. เพื่อศึกษาคุณสมบัติของรอยต่อระหว่าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si ว่าเป็นรอยต่อแบบใดเพื่อที่จะเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

งานวิจัยนี้ถือว่าเป็นจุดเริ่มต้นของการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางโปร่งใสเพื่อมาพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงให้ดียิ่งขึ้น โดยนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์มาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส การศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มบางมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้แสงสามารถส่องผ่านได้สูงและมีค่าสภาพต้านทานต่ำ เนื่องจากจะนำไปเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง จากการขอคำชี้แนะหรือศึกษาผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ ทำให้ทราบแนวทางในการเริ่มงานวิจัยนี้ โดยขั้นแรกจะทำการศึกษาเงื่อนไขการสร้างฟิล์มบางเพื่อที่จะได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส และหลังจากนั้นเมื่อได้ฟิล์มบางที่เหมาะสมจะประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสแทนที่อลูมิเนียม ซึ่งสมมติฐานในงานวิจัยนี้จะกล่าวรายละเอียดดังนี้

1. สามารถเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ลงบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยคาดว่าฟิล์มมีการยึดติดกับฐานรองได้ดี และมีความราบเรียบ

2. เมื่อมีการเตรียมฟิล์มที่ความหนาต่างๆ สภาพต้านทานของฟิล์มมีค่าลดลงเมื่อความหนาของฟิล์มบางเพิ่มขึ้น

3. การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มีค่าสูงขึ้นเมื่อความหนาของฟิล์มบางมีค่าเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากเมื่อขนาดของฟิล์มหนาทำให้ฟิล์มมีความสมบูรณ์ของผลึกดีขึ้นส่งผลให้แสงสามารถส่งผ่านได้สูงขึ้น

4. เมื่อทำการแอนนีล (Anneal) ฟิล์มบางทำให้มีการจัดเรียงตัวของผลึกใหม่ ส่งผลทำให้คุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางมีค่าดีขึ้น เช่น สภาพต้านทานมีค่าลดลงเนื่องจากผลึกมีความเป็นระเบียบและสมบูรณ์มากขึ้น การส่องผ่านแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกรนมีความสมบูรณ์ทำให้การกระเจิงที่ระยะขอบเกรนมีค่าน้อยลง แสงจึงทะลุผ่านได้สูงขึ้น

5. เมื่อเปลี่ยนชนิดของก๊าซที่ใช้ในการแอนนีล ทำให้ทราบถึงข้อดีและข้อเสียของก๊าซแต่ละตัว และหาความเหมาะสมสำหรับใช้พัฒนาคุณภาพของฟิล์มบางต่อไป

6. ได้เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่เหมาะสม ทั้งความหนาของฟิล์มบาง อุณหภูมิในการแอนนีล ชนิดของก๊าซในการแอนนีล เป็นต้น

7. สามารถออกแบบและสร้างกระจกต้นแบบของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงได้ โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นองค์ประกอบของขั้วไฟฟ้า

8. สามารถสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า บนฐานรอง n-Si และ p-Si ได้

9. หลังจากศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบาง สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงและวิเคราะห์ผลที่ได้สามารถสรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่สร้างมีประสิทธิภาพที่ดีและสามารถพัฒนาใช้งานต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้เริ่มตั้งแต่ศึกษาคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ และเมื่อได้เงื่อนไขของฟิล์มบางที่เหมาะสมแล้ว จึงได้นำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงต่อไป โดยมีขอบเขตงานวิจัย ดังนี้

1. สร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอร์บนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ได้ โดยมีการยึดติดกับฐานรองดีและฟิล์มบางมีความสม่ำเสมอ
2. สร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ลงบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ ที่ความหนาของฟิล์มต่างๆ
3. ศึกษาคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เตรียมบนฐานรองที่เป็นกระจกสไลด์ โดยตรวจสอบคุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง
4. ปรับปรุงคุณภาพของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยการแอนนีล ที่ อุณหภูมิต่างๆ คือ 200, 300, 400 และ 500 $^{\circ}$C
5. แอนนีลฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ในบรรยากาศที่ต่างกันคือ อากาศ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน
6. ศึกษาผลกระทบของอุณหภูมิและบรรยากาศในการแอนนีลของฟิล์มบาง โดยนำฟิล์มบางไปวัดผลต่างๆ เช่น คุณสมบัติทางโครงสร้างที่เปลี่ยนไป ความราบเรียบของฟิล์ม ขนาดเกรน สภาพต้านทานไฟฟ้าและการส่องผ่านแสง เป็นต้น
7. วิเคราะห์ผลจากการเตรียมฟิล์มและหาเงื่อนไขที่ดีที่สุด ที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง
8. ออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบที่จะนำอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง
9. สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงและทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน, แรงดันภายใน (V_{bi}), ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์ ($\emptyset_{bn}$) และการตอบสนองทางความถี่ (Frequency response)

1.5 ขั้นตอนของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์ เพื่อที่จะออกแบบการทดลองต่อไป เช่น จุดหลอมเหลว, สภาพต้านทาน, การส่องผ่านแสง, วิธีการเตรียมฟิล์ม, ค่าความแข็งและเปราะ ความยืดหยุ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ออกแบบการศึกษาเพื่อเตรียมฟิล์มบางโดยจะเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธี อาร์เอฟ สปัตเตอร์ ที่เวลาในการสปัตเตอร์ 5, 15, 30 และ 60 นาที (เนื่องจากไม่รู้อัตราการสปัตเตอร์ของอินเดียมทินออกไซด์ จึงกำหนดเป็นระยะเวลาในการทำ)

3. หลังจากทำการเตรียมฟิล์ม นำฟิล์มวัดคุณสมบัติต่างๆ เช่น ความหนา, ความราบเรียบของผิวฟิล์ม, สภาพต้านทาน และการส่องผ่านแสง เป็นต้น

4. เมื่อศึกษาคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบางแล้ว นำผลมาวิเคราะห์และวางแผนการทดลองขั้นต่อไป โดยสิ่งที่วิเคราะห์ได้จากผลในหัวข้อที่ 1.5.3 คือ อัตราการสปัตเตอร์, สภาพต้านทานที่เปลี่ยนไปเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น และการส่องผ่านแสงของฟิล์มที่เปลี่ยนที่ความหนาฟิล์มแตกต่างกัน

5. ปรับปรุงคุณภาพด้วยการแอนนีล ที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 $^{\circ}$C ในบรรยากาศของ อากาศ, ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน

6. หลังจากทำการปรับปรุงคุณภาพแล้ว นำฟิล์มบางมาวัดคุณสมบัติต่างๆ สมบัติทางโครงสร้าง, สมบัติทางไฟฟ้า และสมบัติทางแสง

7. จากผลในหัวข้อ 1.5.1-1.5.5 เมื่อวิเคราะห์ผลการทดลองจะสามารถหาเงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับนำไปประยุกต์ใช้งานได้

8. ออกแบบโครงสร้างและกระจกต้นแบบสำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสง โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า

9. ดำเนินการสร้างตัวตรวจวัดแสง โดยมีกระบวนการที่ใช้ เช่น Sputter, Evapolator, Photolithography, Diffusion และEtching

10. นำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างมาทดสอบคุณสมบัติต่างๆ คือลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน, แรงดันภายใน, ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์ และอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืด

งานวิจัยนี้ศึกษาตั้งแต่คุณสมบัติของฟิล์มบางไปจึงถึงการประยุกต์ใช้ฟิล์มบางเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โดยจะแบ่งหัวข้อในวิทยานิพนธ์ออกเป็นทั้งหมด 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงที่มาของงานวิจัย เหตุใดจึงต้องมีการศึกษาค้นคว้าและต้องพัฒนาอุปกรณ์ตรวจวัดแสงเดิมให้ดีขึ้น และสาเหตุที่นำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์มาเป็นขั้วไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปร่งใสแทนโลหะอลูมิเนียม ซึ่งสมมติฐานเกี่ยวกับงานวิจัยนี้คาดว่าฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่นำมาใช้นี้จะประยุกต์ใช้กับไดโอดของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้และมีคุณสมบัติทางไดโอดที่ดี

บทที่ 2 อินเดียมทินออกไซด์ เนื่องจากงานวิจัยนี้เริ่มจากการศึกษาฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ต่อไป ทำให้การศึกษาคุณสมบัติต่างๆของอินเดียมทินออกไซด์จึงเป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่สำคัญสำหรับงานวิจัยนี้ จึงต้องทำการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ของอินเดียมทินออกไซด์ก่อน และในบทนี้ได้กล่าวถึงคุณสมบัติทั้งข้อดีและข้อเสียของอินเดียมทินออกไซด์เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป และรวมถึงทฤษฎีของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงในโครงสร้างต่างๆ

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดรอยต่อ ITO/n-Si และ ITO/p-Si

บทที่ 4 การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ในบทนี้จะกล่าวถึงการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมในการนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงชนิดช็อตกีย์โครงสร้าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si แบบแนวตั้ง และการศึกษาคุณสมบัติของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงจะทำการศึกษาคุณสมบัติ I-V และ C-V

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ ในบทนี้จะเป็นการสรุปผลการทดลองทั้งหมดที่ทำการศึกษารวมทั้งแนวทางในการปรับปรุงเพื่อให้งานวิจัยนี้ดียิ่งขึ้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

ในบทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เช่น ลักษณะเฉพาะตัวของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ เครื่องมือที่ใช้วัดและวิเคราะห์ผลการทดลอง เช่น XRD, SEM, EDX, UV-VIS Spectrophotometer, Surface profile และ Four point probe รวมไปถึงชนิดของตัวตรวจวัดแสง

2.1 อินเดียมทินออกไซด์

ถึงแม้ว่าวัสดุตัวนำโปร่งใสจะมีการค้นคว้าและพัฒนามากว่า 45 ปี [17-18] แต่แท้จริงนั้น มีการนำมาใช้เพียงไม่กี่ชนิด เช่น ZnO, In_2O_3, SnO_2 และ ITO สารประกอบแต่ละชนิดล้วนแต่มีการศึกษามายาวนาน แต่โดยทางคุณสมบัติต่างๆ สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นสารที่มีคุณสมบัติดีที่สุด ทั้งคุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้า คุณสมบัติทางด้านแสง และมีความคงทนต่อสารเคมี ทำให้มีการใช้อย่างแพร่หลาย ทั้งงานด้าน เซลล์แสงอาทิตย์ หน้าต่างแบบการปลดปล่อยต่ำ แผงแสดงผล หน้าต่างดีฟรอส วงจรรวม เป็นต้น

สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ (Tin-doped indium oxide หรือ ITO) จัดอยู่ในกลุ่มที่มีโครงสร้างผลึกเป็นแบบ cubic bixbyite เกิดจากการเจือดีบุก (Sn) เข้าไปใน อินเดียมออกไซด์ (Indium (III) oxide หรือ In_2O_3) ซึ่งดีบุกจะเข้าไปแทนที่อะตอมของอินเดียมไอออน (In^{3+}) เมื่อดีบุกไปสร้างพันธะระหว่างออกซิเจนจะทำให้เกิดเป็นทินออกไซด์แบบ SnO หรือ SnO_2 โดยที่ดีบุกแต่ละตัวจะมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนเท่ากับ +2 และ +4 ตามลำดับ [19] ค่าวาเลนซ์อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้มีผลโดยตรงกับสภาพความนำไฟฟ้าของอินเดียมทินออกไซด์ โดยอิเล็กตรอนที่มีค่าวาเลนซ์อิเล็กตรอนที่ต่ำกว่า SnO ซึ่งมีวาเลนซ์เท่ากับ +2 จะทำให้ความหนาแน่นของพาหะลดลงเนื่องจากมีโฮลเกิดขึ้นซึ่งทำให้สภาพความนำไฟฟ้าลดลง และในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนของ SnO_2 ซึ่งมีเวเลนซ์เท่ากับ +4 เป็นสารชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ประเภทที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (wind band gap) มีค่าประมาณ 3.5-4.2 V [20] มีค่าการส่องผ่านแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและค่าการสะท้อนสูงในคลื่นช่วงอินฟราเรด สภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ ดังนั้นสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์จึงมีการนำใช้ในงานต่างๆ เช่น ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของงานด้านแสงเนื่องจากมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

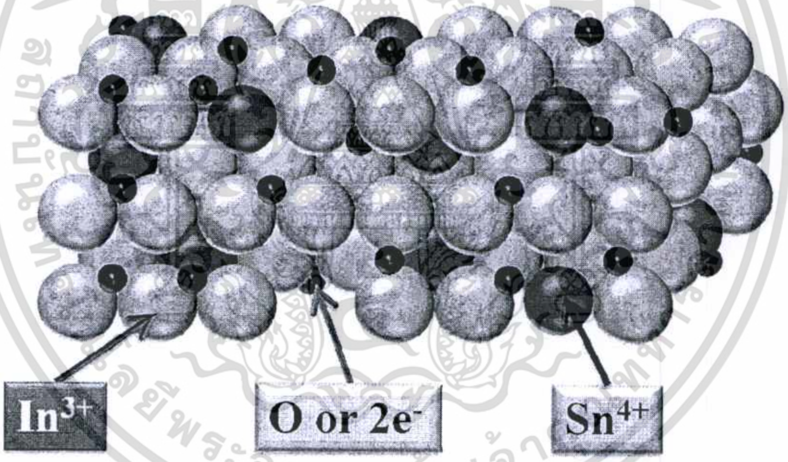
สภาพต้านทานต่ำและนิยมนำมาเคลือบเพื่อเป็นชั้นกันสะท้อนของอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งคุณสมบัติต่างๆ ของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ สรุปดังนี้

2.1.1 การประยุกต์ใช้งานจองอินเดียมทินออกไซด์

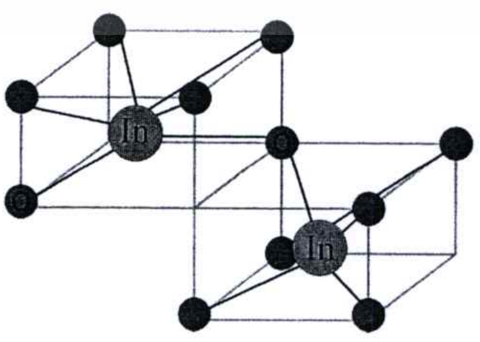
1. หน้าต่างแบบการปลดปล่อยต่ำ (Low emissivity windows)
2. เซลล์แสงอาทิตย์ (Solor cell)
3. หน้าต่างและกระจกแบบอิเล็กโตรโครมิก (Electro chromic windows)
4. แผงแสดงผล (Flat panel display)
5. หน้าต่างดีฟรอส (Defrosting windows)

2.1.2 โครงสร้างและสูตรทางโครงสร้าง [21]

อินเดียมทินออกไซด์เกิดจากการเจือทินลงในอินเดียมออกไซด์ โดยทินจะเข้าไปแทนตำแหน่งของอินเดียมบางตำแหน่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างอะตอมของอินเดียม (In_2O_3) ถูกเจือด้วยดีบุก (Sn)



รูป 2.2 โครงสร้างของ อินเดียมออกไซด์ (In_2O_3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 สมบัติทางกายภาพ [22]

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์

คุณสมบัติ	**อินเดียมทินออกไซด์**
Molecular formula	In_2O_3 : Sn
State of matter	ของแข็ง
Melting point	1800-2200 °C (2800-3500 °F)
Density	7120-7160 kg/m^3 at 293 K
Appearance	เป็นผงสีขาว - เหลือง
Molecular mass	277.64 g/mol

2.1.4 สมบัติทางไฟฟ้า

สารประกอบอินเดียมทินออไซด์จัดว่าเป็นสารที่คุณสมบัติทางไฟฟ้าค่อนข้างดี เนื่องจากมีสภาพต้านทานไฟฟ้าต่ำ และมีคุณสมบัตินำไฟฟ้าได้ดี ค่าสภาพต้านทานจะขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆในการเตรียมฟิล์มบาง เช่น ความหนา อุณหภูมิ ความสมบูรณ์ของผลึก เป็นต้น ส่วนใหญ่จะใช้งานอยู่ในช่วงประมาณ 100 Ω-cm [23]

2.1.5 สมบัติทางด้านแสง

สมบัติอีกประการหนึ่งของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์คือมีการประพฤติตัวแบบโลหะที่มีความยาวคลื่นแสงยาว เพราะมีค่าความยาวคลื่นพลาสมาเหนือ 1 μm ซึ่งสำหรับที่ความยาวคลื่นยาวจะทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการสะท้อนสูง อีกประการคือการสะท้อนคลื่นความร้อนจะแปรผกผันกับค่าความต้านทานแบบแผ่นของฟิล์ม การส่องผ่านแสงของอินเดียมทินออกไซด์มีค่ามากกว่า 80 % ที่ใช้งานในปัจจุบันและมีดัชนีหักเห 1.95

2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง

2.2.1 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ [24]

การศึกษาโครงสร้างผลึกโดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรกโตรมิเตอร์ โดยใช้รังสีเอ็กซ์ความยาวคลื่นเดียวตกกระทบสารตัวอย่าง ซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ สารตัวอย่างจะหมุนไปเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ เพื่อให้การเลี้ยวเบนสอดคล้องกับกฎของแบรกก์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2455 W.H. Bragg และ W.L. Bragg ได้เสนอแนวคิดว่า เราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือระนาบ (plane) ซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนทั้งนี้ลำคลื่นที่สะท้อนออกไปจากระนาบต่างๆดังกล่าวจะมีความเข้มสูงและแทรกสอดแบบเสริมกัน ถ้าหากความแตกต่างระหว่างทางเดินของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียง (path difference) มีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบดังสมการ 2.1

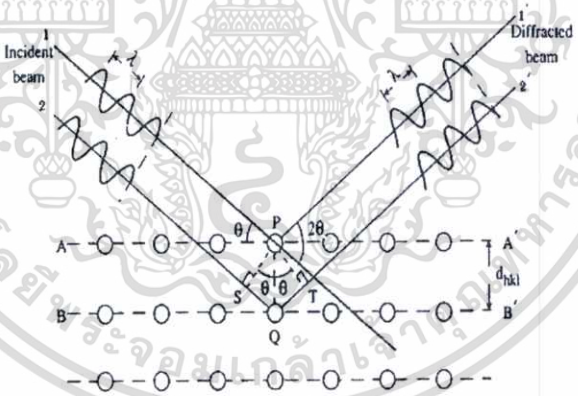
$$2d_{hkl} \sin\theta = n\lambda \qquad (2.1)$$

โดยที่ d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...

λ คือ ความยาวคลื่น

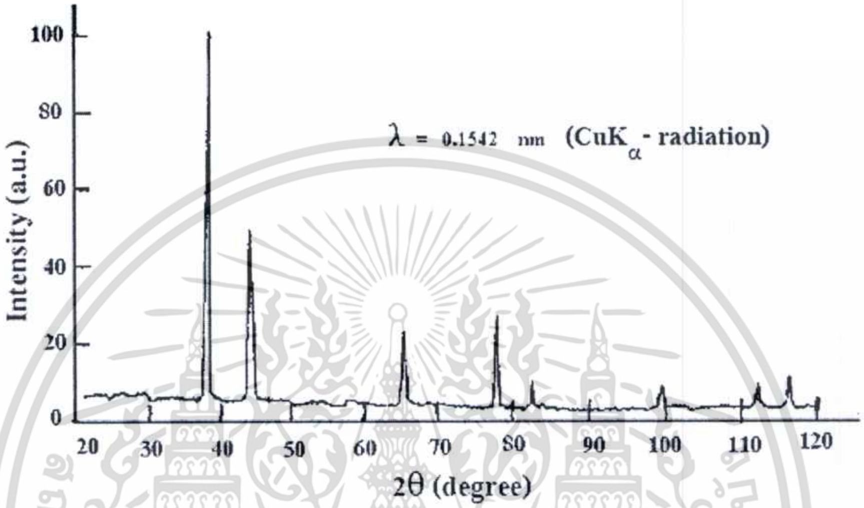


รูปที่ 2.3 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

ระนาบต่าง ๆ ของผลึกที่ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ต้องสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่าระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับแนวที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบน (diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมตกกระทบ (2θ) ดังรูปที่ 2.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4 กราฟ XRD แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า รูปแบบการเลี้ยวเบน (diffraction pattern) ซึ่งสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันก็จะมีรูปแบบการเลี้ยวเบนต่างกัน สังเกตได้จากพีค (peak) ในรูปแบบการเลี้ยวเบนสำหรับการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกนั้น สามารถทำได้โดยการคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก, ขนาดของเกรนและความเครียดในระดับจุลภาคได้จากสูตรดังต่อไปนี้



รูปที่ 2.4 ตัวอย่างของสเปกตรัมที่ได้จาก XRD

สมการสำหรับหาค่าคงที่ของโครงผลึก (lattice constant) สำหรับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์หาได้จากสมการ 2.2 []

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \tag{2.2}$$

และสำหรับโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนอลหาได้จากสมการ 2.3

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3}\left[\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2}\right] + \frac{l^2}{c^2} \tag{2.3}$$

เมื่อ a, c คือ ค่าคงที่ของโครงผลึก

h, k, l คือ ระนาบของผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เครื่องมือวัดการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ [25]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Diffraction : XRD) เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง ที่นิยมใช้อย่างแพร่หลายในงานด้านเคมีและเคมีชีวภาพ โดยใช้ในการตรวจวัดโครงสร้างของโมเลกุลต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นสารประกอบอนินทรีย์, ดีเอ็นเอ, โปรตีนที่มีอยู่ตามธรรมชาติ, รวมถึงวัสดุที่สังเคราะห์ขึ้น ผู้ผลิตได้พัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในเทคนิคนี้ให้มีความสามารถมากยิ่งขึ้นและใช้งานได้ง่ายขึ้น ทำให้เอื้อประโยชน์สำหรับนักวิทยาศาสตร์ที่จะนำไปใช้ปรับปรุง พัฒนา หรือยกระดับการวิเคราะห์ วิจัย หรือตรวจสอบในระดับสูงขึ้นไป

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของแบรกก์

XRD เป็นเทคนิคที่เสริมเทคนิค spectroscopic อื่นๆ เช่น เทคนิคการเรืองแสงของรังสีเอ็กซ์ (X-ray Fluorescence: XRF) โดยที่ XRF สามารถบอกได้ว่าวัสดุเหล่านั้นประกอบด้วยธาตุอะไรบ้าง ในขณะที่ XRD นั้นจะช่วยให้สามารถรู้ได้ว่าธาตุเหล่านั้นมีองค์ประกอบเป็นอย่างไร

หลักการพื้นฐาน

การวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD นั้นจะใช้คุณสมบัติการเลี้ยวเบนรังสีของโครงสร้างผลึก ซึ่งเป็นไปตามสมการของ Bragg

$$n\lambda = 2d\sin\theta \tag{2.4}$$

โดยที่ $n = 1, 2, 3, \ldots$

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

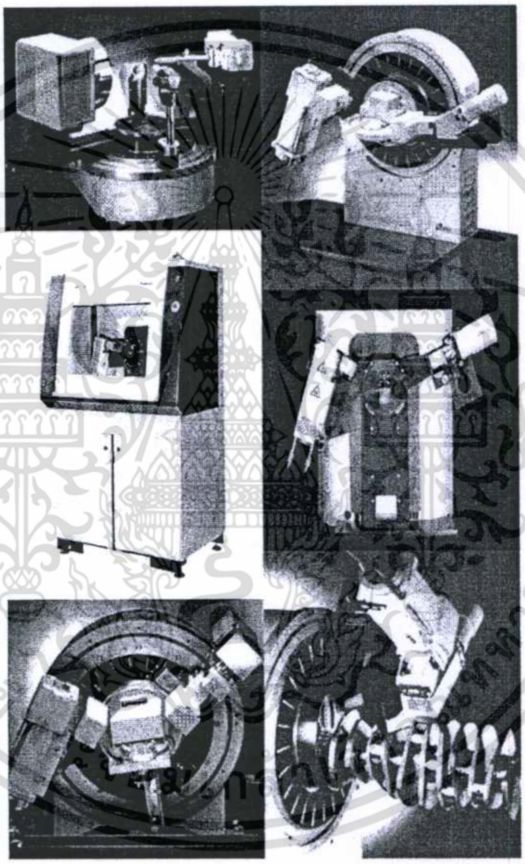
d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

ในขั้นตอนแรกต้องทำการปลูกผลึกที่สนใจแล้วนำผลึกที่ได้ไปแช่ไนโตรเจนเหลว ผลึกที่แช่แข็งนี้จะไปลด radiation damage ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างการเก็บรวบรวมข้อมูลและลดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เคลื่อนไหวของอุณหภูมิภายในผลึก ผลึกจะถูกวางในเครื่อง diffractometer แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่ง เทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่างๆ จะถูกนำมาพล็อตจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละระนาบที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิดด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพ เคมี และคุณสมบัติเชิงกลอย่างมากมาย



รูปที่ 2.5 เครื่องมือที่ใช้เทคนิค การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

2.2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

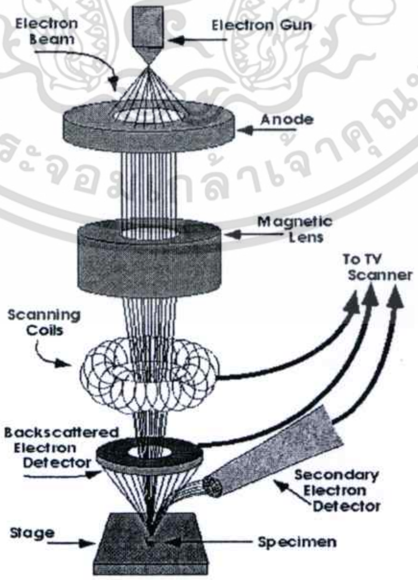
ในปี พ.ศ. 2478 แมก นอลล์ (Max Knoll) ได้คิดค้นหลักการ และวิธีการในการประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดขึ้น และต่อมา แมนเฟรด วอน อาเดนเน (Manfred Von Ardenne) ได้ประดิษฐ์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเครื่องแรกสำเร็จในปี พ.ศ. 2481 โดยเครื่องมือที่ประดิษฐ์ได้นั้นยังมีกำลังขยายไม่สูงมากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2498 ชารเลส์ วิลเลียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
107446

แอ็ทเลย์ (Charles William Oatley) และทีมงานจากเคมบริดจ์ ได้สร้างกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีความละเอียดสูงถึง 250 Å

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบระหว่างกล้องจุลทรรศน์แบบแสงกับกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

สมบัติทางฟิสิกส์	แบบแสง	แบบอิเล็กตรอนแบบส่องกราด
Resolution		
-easy	5 μm	0-2 μm
-skilled	0-2 μm	10 nm
-special	0-1 μm	0-5 nm
Depth of focus	Poor	High
Mode		
-transmission	Yes	Yes
-refraction	Yes	Yes
-diffraction	Some	Many
Field of view	Small	Large enough
Signal	Only as image	Available for processing
Cost	Low	High



รูปที่ 2.6 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดดังแสดงในรูปที่ 2.6 เริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งมีหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจากไส้หลอด ผ่านขั้ว อาโนด (anode) กลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า พร้อมทั้งบังคับให้กลุ่มอิเล็กตรอนให้มีลักษณะเป็นลำ โดยลำอิเล็กตรอนจะกราดไปบนพื้นผิวของตัวอย่างโดยขดลวดสนามแม่เหล็กบนระนาบ xy เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าเพื่อส่งต่อไปให้ระบบสร้างภาพต่อไป

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อนกราด

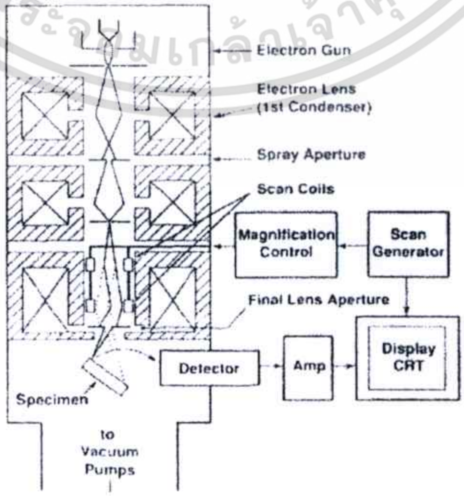
Scanning Electron Microscope คือกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนแทนแสงในการสร้างภาพขยายของวัตถุ มีกำลังขยายมากกว่ากล้องจุลทรรศน์ที่ใช้แสงมาก จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้ในการถ่ายภาพที่ต้องการรายละเอียดและกำลังขยายสูง

Scanning Electron Microscope แบ่งได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ ซึ่งทั้งสองชนิดมีลักษณะการทำงานและภาพที่ถ่ายได้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ได้แก่

- Transmission Electron Microscope หรือ TEM ในภาษาไทยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน
- Scanning Electron Microscope หรือ SEM ในภาษาไทยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ส่วนประกอบและหลักการทำงาน

โดยสังเขปของ SEM แสดงในภาพที่ 2.7 ส่วนบนสุด เป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.7 การทำงานของ SEM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ เรียกว่าปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามคอลัมน์ซึ่งมีสภาพสุญญากาศ ด้วยความต่างศักย์เร่ง (Accelerating Voltage) ในช่วง 0 – 30 kV (บางเครื่องอาจทำได้สูงถึง 50 kV) โดยทิศทางการเคลื่อนที่จะถูกควบคุมด้วยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic lens) 2 ชุด หรือมากกว่า และปริมาณของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยแอพเพอร์เจอร์ (aperture) หรือช่องเปิด ซึ่งมีขนาดต่าง กัน ตามลักษณะการใช้งาน

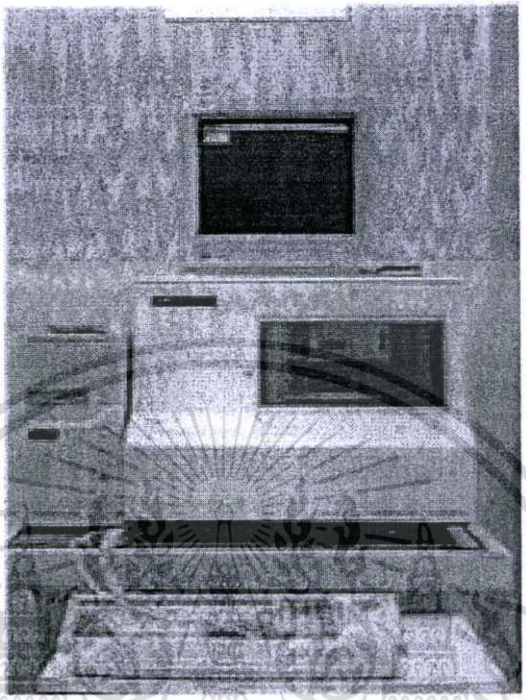
เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) นับว่าเป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุ (Objective lens) ซึ่งเป็นเลนส์ชุดสุดท้าย จะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (electron beam) ให้ไปตกบนผิวของตัวอย่าง โดยมีสแกนคอยล์ (scan coil) ทำหน้าที่กราดลำอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวของตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะเกิดสัญญาณ (Signal) ต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกัน และ SEM จะมีอุปกรณ์สำหรับตรวจจับสัญญาณ (Detector) ชนิดต่าง ๆ เหล่านั้น แล้วส่งไปประมวลผลเป็นภาพแสดงบนจอภาพต่อไป ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electrons : SE) สัญญาณชนิดนี้ จะให้ข้อมูล เกี่ยวกับลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เป็นสัญญาณที่ถูกนำมาใช้ในการสร้างภาพมากที่สุด ภาพที่ได้จากสัญญาณชนิดนี้ เรียกว่าภาพอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron Image : SEI) อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Back Scattered Electrons : BSE) ให้ข้อมูลเกี่ยวกับส่วนประกอบทางเคมีบนผิวของตัวอย่าง และแสดงให้เห็นลักษณะความสูงต่ำของพื้นผิว นอกเหนือจากสัญญาณเหล่านี้แล้ว ยังมีสัญญาณอีกหลายชนิดที่เกิดขึ้น เช่น เอ็กซ์เรย์ (X-Ray), คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic wave), ออเจอิเล็กตรอน (Auger electron) เป็นต้น ซึ่งสัญญาณแต่ละชนิดจะให้ข้อมูลของตัวอย่างแตกต่างกันไป

2.2.3 ระบบวัดสภาพการจัดเรียงของพื้นผิว [26]

Surface profileเป็นเครื่องมือที่ตรวจสอบสภาพการจัดเรียงของพื้นผิวของวัตถุตัวอย่างโดยการใช้เข็มขนาดเล็กลากผ่านบนพื้นผิววัตถุเพื่อดูลักษณะความราบเรียบและความต่อเนื่องในการจัดเรียงตัวของผลึกในวัตถุตัวอย่าง สามารถนำมาใช้วัดความแตกต่างระหว่างผิววัตถุความหนาของวัตถุที่อยู่บนชิ้นงานจากการศึกษาได้นำมาวัดความหนาของอินเดียมทินออกไซด์ที่อยู่บนฐานรองกระจกสไลด์และความราบเรียบของพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ในการวิเคราะห์สภาพการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

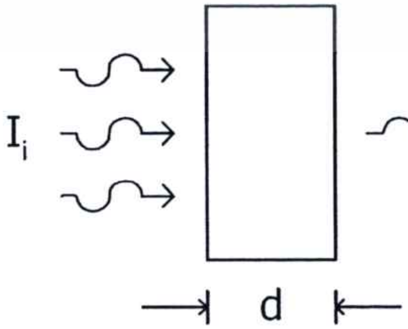
จัดเรียงของพื้นผิวของอินเดียมทินออกไซด์จะใช้ระบบวัดสภาพการจัดเรียงของพื้นผิว ของบริษัท Tencore ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ภาพเครื่องระบบวัดสภาพการจัดเรียงของพื้นผิว ของบริษัท Tencore

2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง

สำหรับในการทดลองสามารถหาการส่องผ่านแสงของตัวอย่างได้ ทั้งจากเครื่องมือวัดและสามารถนำค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดมาคำนวณหาพารามิเตอร์ต่างๆที่ต้องการ เช่น ดัชนีหักเห การดูดกลืนแสงในเนื้อสาร เป็นต้น พิจารณาจากแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง และแสงที่ส่งผ่าน ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 แผนภาพการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าการสะท้อน และการส่งผ่านแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{\left(1 - R^2 e^{-2\alpha d}\right)} \tag{2.5}$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \tag{2.6}$$

โดยที่ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อน

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

I_t คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง

I_i คือ ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

I_r คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อน

n คือ ดัชนีหักเห

ถ้าสารตัวอย่าง มีความหนามากพอที่ $R^2e^{-2\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ (2.5) จะเขียนใหม่ได้เป็น

$$T = \frac{I_t}{I_i} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \tag{2.7}$$

ในการทดลองของการดูดกลืนแสงนั้น สัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1\text{-}R)^2$ มีค่าคงที่ และสมการ (2.7) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = \frac{1}{d}\ln\left(\frac{I_i}{I_t}\right) + \text{ค่าคงที่} \tag{2.8}$$

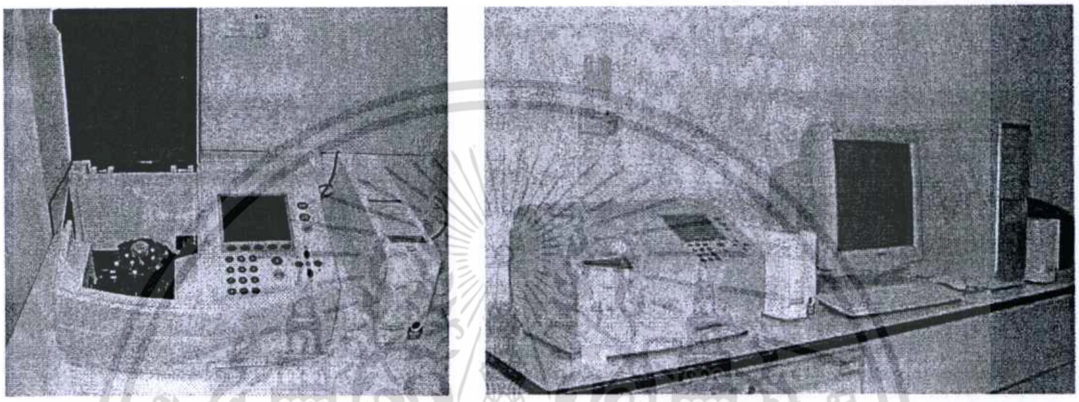
ค่าคงที่ในสมการ (2.8) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนที่ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (α_0) และต้องนำค่านี้มาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยัง แถบนำเท่านั้น

ระบบวัดการส่งผ่านของแสง (UV-VIS Spectrophotometer)

ต้นกำเนิดแสง → โมโนโครเมเตอร์หรือส่วนควบคุมความยาวคลื่น→ เซลล์ที่ใส่สารตัวอย่าง → มาตรวัดแสง → เครื่องขยายและแยก สัญญาณและประมวลผล → คอมพิวเตอร์



รูปที่ **2.10** เครื่อง UV-VIS ยี่ห้อ Thermo electron corporation รุ่น Helios

เครื่อง Spectrophotometer ชนิดลำแสงคู่ ดังแสดงรูปที่ 2.10 เป็นเครื่องที่ใช้ลำแสง 2 ลำแสง ลำแสงหนึ่งผ่านสารละลาย อีกลำแสงหนึ่งผ่านสารละลายเปรียบเทียบ (Blank) แบ่งออกเป็น 2 ชนิด

1. ชนิด double beam และ double detector หรือ dual channel instruments แสงที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์แล้ว จะถูกแยกออกเป็น 2 ลำแสง ด้วยกระจกรูปตัว V เรียกว่า beam splitter ลำแสงหนึ่งผ่านเซลล์ที่ใส่สารละลายตัวอย่าง อีกลำแสงผ่านสารละลาย blank แล้วจะไปยังเครื่องวัดแสงที่แยกกัน เครื่องวัดแสงทั้งคู่นี้จะต้อง เหมือนกัน (matched detectors) ค่าที่วัดจะเข้าเครื่องอิเลคทรอนิคส์เพื่อหาอัตราส่วน

2. ชนิด double beam และ single detector อาจเรียก double beam in time configuration แสงที่ผ่านโมโนโครเมเตอร์แล้วจะถูกแบ่งเป็น 2 ลำแสงด้วย rotating mirror หรือ “chopper” จะผ่านสารละลายและ blank สลับกันไป แล้วที่เหลือมารวมกันด้วย grid mirror ซึ่งเป็นช่องแสงผ่านและสะท้อนต่อไปยังมาตรวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการทำงาน

การหาปริมาณสารใดสารหนึ่งโดยวิธีการทางห้องปฏิบัติการมีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้มากคือการวัดความเข้มของสี (colorimetry) หรือวัดความเข้มแสง โดยการเปรียบเทียบกับสารละลายมาตรฐาน(standard solution) เครื่องวัดการดูดกลืนแสงมีหลอดไฟกำเนิดแสง (light source) ส่องแสงผ่านไปยังตัวแยกแสง (monochromator) ผ่านสารตัวอย่าง(sample) ผ่านตัวไวแสง (photo sensor) แล้วจึงอ่านค่าออกมา แสงที่มองเห็น(visible light) เป็นแสงสีขาวที่เกิดจากการรวมตัวกันของแสงสีต่างๆ มีสีหลักอยู่ 7 สี คือ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีแสด และสีแดง เมื่อแสงสีขาวตกกระทบวัตถุแก้วแล้วทำให้มองเห็นวัตถุเป็นสีใดๆ แสดงว่าวัตถุดูดกลืนแสงสีอื่นๆ หมด แต่สะท้อนแสงที่ตามองเห็นออกมา แต่วัตถุนั้นๆ ดูดกลืนทุกสีไว้ได้หมดจะมองเห็นวัตถุเป็นสีดำ แสงอัลตราไวโอเลต (ultraviolet light) เป็นแสงที่มีคุณสมบัติในการทำให้อิเล็กตรอนของอะตอมเกิดการส่งผ่าน เมื่อร่างกายถูกแสงนี้เป็นเวลานานอาจเกิดอันตราย ตัวอย่างเช่น ผิวหนังไหม้เกรียม เยื่อบุลูกตาถูกทำลาย และอาจเกิดเป็นมะเร็งของผิวหนังได้

กฎของแสงเมื่อแสงตกกระทบวัตถุอาจเกิดการดูดกลืนแสง การส่องผ่าน การกระจาย การสะท้อนกลับ แต่กฎของแสงที่นำมาใช้วัดค่าดูดกลืนแสงถือว่ามีเฉพาะแสงที่ตกกระทบ แสงที่ดูดกลืน และแสงที่ส่องผ่าน โดยไม่คำนึงถึงแสงที่ถูกรบกวน กฎของแลมเบิร์ต (Lambert's law) กฎของแลมเบิร์ต (ค.ศ.1760) กำหนดว่าแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความหนาแน่นของตัวกลางที่แสงผ่าน กฎของเบียร์ (Beer's law) กำหนดว่าแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารในของเหลว อุปกรณ์ของเครื่องและคุณสมบัติ สามารถแบ่งได้ดังนี้ คือ

1. ภาคจ่ายกระแสไฟฟ้า (power supply) มีความสำคัญต่อเครื่องวัดการดูดกลืนแสงมาก เพราะความไม่คงที่ของกระแสไฟฟ้าทำให้อ่านค่าดูดกลืนแสง หรือค่าแสงาองผ่านไม่คงที่ แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ 1. แบตเตอรี่ 2. แระแสไฟฟ้าสลับ

2. หลอดกำเนิดแสง มีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา ซึ่งต้องเลือกใช้ให้ถูกต้องเหมาะสมกับของเหลวที่นำมาวัดค่าดูดกลืนแสง เช่น 1. หลอดไฮโดรเจน 2. หลอดทังสเตน 3. หลอดทังสเตนฮาโลเจน 4. หลอดเนิสต์ – โกลเวอร์ 5. หลอดโกลบาร์

3. ตัวแยกแสง (monochromator) เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่แยกแสงหลายสีหรือหลายความยาวคลื่น ให้กลายเป็นแสงสีเดียวที่มีความยาวคลื่นในช่วงแคบๆ โดยอาศัยการดูดกลืนแสงช่วงแคบๆ โดยอาศัยการดูดกลืนแสง การสะท้อนกลับหรือการหักเห แสงสีเดียวมีความสำคัญมาก เนื่องจากทำให้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นและค่าดูดกลืนแสงมีช่วงที่เป็นเส้นตรงยาวมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และเพิ่มความไวในการวัด เพราะสามารถใช้แสงสีเดียวที่มีความยาวคลื่นตรงกับความยาวคลื่นที่สารนั้นๆ มีการดูดกลืนแสงสูงสุด ตัวแยกแสงที่ใช้ในเครื่องวัดการดูดกลืนแสงมีอยู่ 3 ชนิดคือ 1. ตัวกรองแสง 2. ปริซึม 3.เกรตติง

4. ช่องแสง (slit) เป็นอุปกรณ์ควบคุมปริมาณแสงที่จะเข้าสู่ตัวแยกแสง หรือแสงที่ออกจากตัวแยกแสง ช่องแสงประกอบด้วยโลหะขอบบาง 2 แผ่น วางขนานกันในระนาบเดียวกัน ระยะห่างระหว่างช่องแสงอาจคงที่หรือปรับเลื่อนได้

5. ช่องใส่คิวเวทท์ ช่องใส่คิวเวทท์ที่ดีควรสามารถจับยึดให้คิวเวทท์ให้อยู่ในตำแหน่งได้ตลอดเวลาที่วัด มีการสะท้อนเล็กน้อย (มักเป็นสีดำ) และป้องกันแสงจากภายนอกเล็ดลอดเข้าไปสู่คิวเวทท์

6. คิวเวทท์ (curette หรือ cell) ภาชนะสำหรับใส่ของเหลวที่จะนำไปวัดความเข้มของแสงมีอยู่หลายแบบ หลายขนาด เพื่อความเหมาะสมกับงานแต่ละประเภท เช่น แก้ว ควอทซ์ พลาสติก

7. ตัวไวแสง (photo sensor หรือ photo detector) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มของแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วส่งต่อไปยังภาคขยายสัญญาณและวงจรอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆ เพื่อสามารถแสดงค่าออกมาในรูปค่าดูดกลืนแสงหรือแสงส่องผ่าน ตัวไวแสงแต่ละชนิดมีความแตกต่างกันในช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนอง อัตราเร็วในการตอบสนอง ความเป็นเส้นตรงของการตอบสนอง และความไว ตัวไวแสงมีอยู่หลายชนิด เช่น 1.โฟโตเซลล์ 2. โฟโตทิวบ์ 3.โฟโตมัลติพลายเออร์ทิวบ์ 4.สารกึ่งตัวนำ

8. ภาคขยายสัญญาณ (amplifier) มีหน้าที่หลักในการขยายสัญญาณไฟฟ้าจากตัวไวแสงให้มีปริมาณมากพอที่จะอ่านค่าออกมาได้ โดยมีการรบกวนสัญญาณอื่นๆ น้อยที่สุด

9. ภาคแสดงผล (read out device) มีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นหน่วยวัดที่ต้องการ ตัวอย่างเช่น ค่าดูดกลืนแสง ค่าเปอร์เซ็นต์การส่องผ่าน หรือความเข้มข้น เป็นต้น

10. ระบบไมโครโพรเซสเซอร์ พบในเครื่องมือรุ่นใหม่ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูง ระบบไมโครโพรเซสเซอร์จะทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของเครื่องแบบอัตโนมัติแบบกึ่งอัตโนมัติ หรือใช้คำนวณทางคณิตศาสตร์ ทำให้สามารถวิเคราะห์หาปริมาณสารด้วยเทคนิคต่างๆ ได้มากขึ้น เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสงที่ใช้ระบบไมโครโพรเซสเซอร์จึงมีประสิทธิภาพสูงกว่า และใช้ง่านกว่าเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ไม่มีระบบไมโครโพรเซสเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประโยชน์ของการใช้งาน

1. ใช้ในการวิเคราะห์ทางเคมีทั้งทางด้านปริมาณวิเคราะห์และคุณภาพวิเคราะห์

2. ใช้ในการวัดค่าดูดกลืนแสงหรือ %T

2.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ในการวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity:ρ) ของแท่งตัวนำ สามารถทำได้โดยง่ายในกรณีที่สามารถเตรียมแท่งสาร ที่มีหน้าตัด A มีขนาดความยาว l และที่สำคัญต้องทำขั้วไฟฟ้าที่ปลายทั้งสองด้านของแท่งสารให้เป็นรอยสัมผัสโอห์มิค เพื่อให้กระแสไฟฟ้าสามารถไหล เมื่อให้ความต่างศักย์แก่แท่งสารนี้ V โวลต์และวัดกระแสที่ไหลผ่านแท่งกึ่งตัวนำ I จะได้ว่า

$$J = \sigma.\varepsilon \tag{2.9}$$

หรือ

$$\frac{I}{A} = \frac{1}{\rho}\frac{V}{l} \tag{2.10}$$

ดังนั้น สภาพต้านทาน หรือ Resistivity

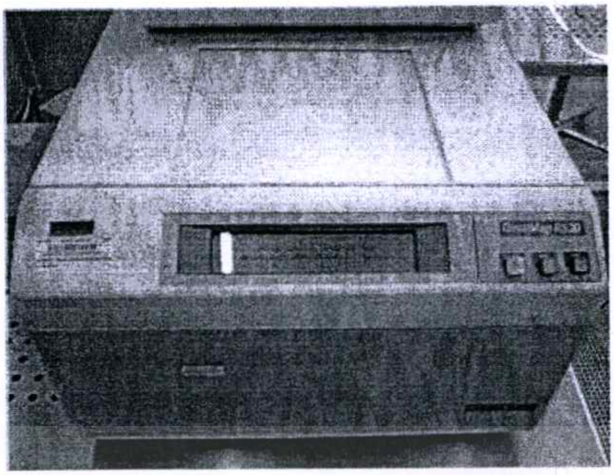
$$\rho = \frac{A}{l}\frac{V}{l} \tag{2.11}$$

ระบบวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้ว (Four Point Probe) [27]

ระบบวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้ว เป็นระบบที่ใช้วัดค่าสภาพความต้านทาน (Resistivity) และค่าความต้านทานเชิงแผ่น (Sheet resistance) ของฟิล์มบางตัวอย่าง

(ก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ข)

รูปที่ 2.11 เครื่องวัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้ว ของบริษัท Prometrix รุ่น Omni Map ® RS35

หลักการทำงานของระบบวัดความต้านทานจำเพาะโดยวิธี 4 ขั้ว ก็คือ จะใช้ขั้วไฟฟ้า 4 ขั้วที่มีการวางขบวนขั้วไฟฟ้าเป็นแนวเส้นตรงโดยที่ขั้วไฟฟ้าทั้งหมดจะมีระยะห่างเท่ากัน วางขบวนขั้วไฟฟ้าดังกล่าวลงบนผิวหน้าของฟิล์มบางตัวอย่างจากนั้นจะมีการให้กระแสแก่คู่ขั้วด้านนอกแล้ววัดความต่างศักย์ที่คู่ขั้วที่อยู่ด้านใน จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสภาพความต้านทานและค่าความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มบาง ในการตรวจสอบค่าความต้านทานเชิงแผ่นของอินเดียมทินออกไซด์จะใช้วัดความต้านทานจำเพาะ โดยวิธี 4 ขั้วเชิงเส้นของบริษัท Prometrix รุ่น OmniMap RS35 ดังรูปที่ 2.11

2.5 โฟโตไดโอด [28-29]

โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ประเภทหนึ่งของ อุปกรณ์ตรวจวัดแสง มักใช้ตรวจวัดความเข้มแสงในงานทางด้านวิทยาศาสตร์และในอุตสาหกรรมที่ต้องการ ความแม่นยำสูง สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาทำเป็นโฟโตไดโอด ได้แก่ ซิลิคอน อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์เจอร์มาเนียม, แกลเลียมไนไตรด์ และซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นต้น

2.5.1 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง

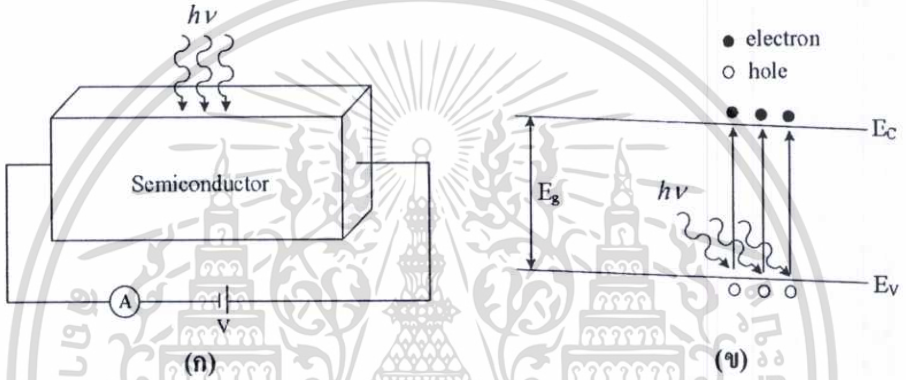
ตัวตรวจวัดแสงเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีความไวต่อแสงและสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานระบบสื่อสารด้วยใยแก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือถูกใช้เป็นตัววัดความเข้มแสงในวงจรสวิตช์แสง ซึ่งสามารถแบ่งโครงสร้างและหลักการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังนี้

2.5.1.1 โฟโตคอนดักเตอร์

โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ง่ายที่สุด เพราะว่ามีเพียงแท่งสารกึ่งตัวนำเพียงอย่างเดียว เมื่อโฟโตคอนดักเตอร์ได้รับแสงตกกระทบ จะทำให้มีสภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าแสงได้ ซึ่งกระแสแสงจะขึ้นอยู่กับอัตราการเกิดของพาหะ โดยมีปัจจัยอื่นๆ เช่น ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ และความสามารถในการดูดกลืนแสง ส่วนการใช้งานจะป้อนแรงดันไบแอสให้แก่โฟโตคอนดักเตอร์ที่ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 (ก) โครงสร้างของโฟโตคอนดักเตอร์
(ข) แถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์ เมื่อได้รับแสง

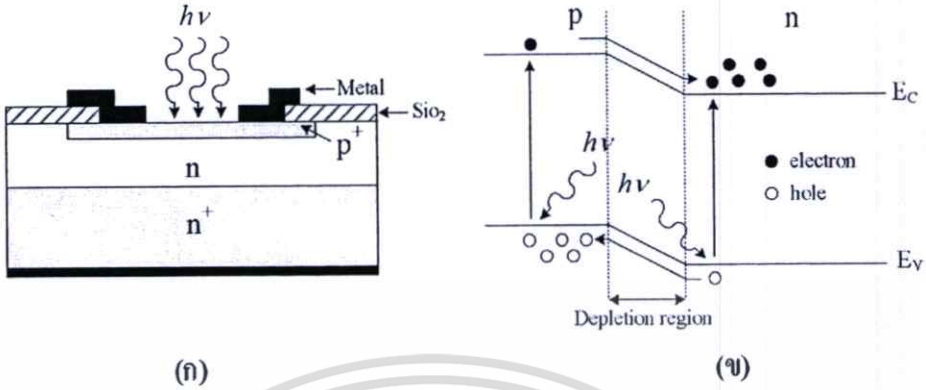
2.5.1.2 โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น หรือ พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ p-n เมื่อมีแสงตกกระทบที่รอยต่อ p-n จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น

หลักการทำงานของ โฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อ p-n ดังแสดงในรูปที่ 2.13 (ก) แสดงภาพตัดขวางของพี-เอ็นโฟโตไดโอด ที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และต่อติดกับสารกึ่งตัวนำชนิด n เป็นรอยต่อ p-n ที่รอยต่อ p-n นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้น ชั้น p เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ 1 μm ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ p-n เป็นย่านปลอดพาหะ เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu > E_g$) แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืนโดยพลังงานโฟตอนของแสง



รูปที่ 2.13 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น
(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นเมื่อได้รับแสง

ซึ่งจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้า และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

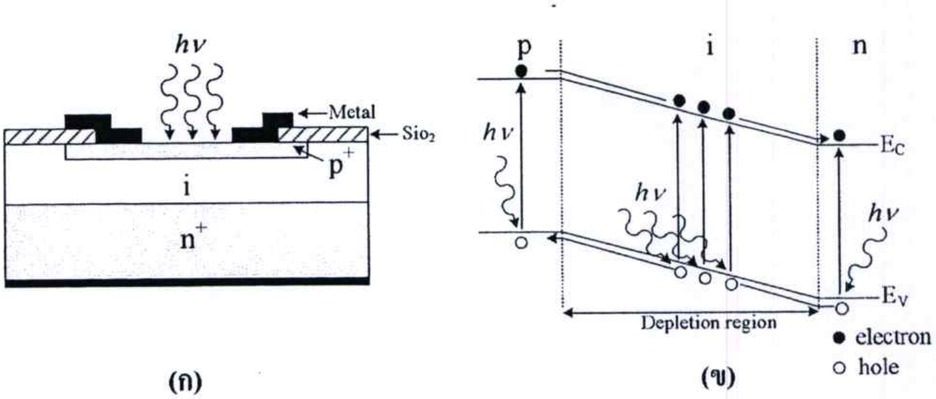
ในรูปที่ 2.13 (ข) แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-n การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ชั้นปลอดพาหะและชั้น n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในพัดพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนกรณีโฮลจะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้น n หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ชั้น p และทำให้ชั้น n จะมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ถ้าต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอกอิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปสู่วงจรภายนอก

ลักษณะสมบัติเด่นของโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น พบว่าจะทำงานได้เร็วกว่า โฟโตคอนดัคเตอร์ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสที่เกิดจากการแพร่ จึงมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ช้าเมื่อเทียบกับโฟโตไดโอดที่จะกล่าวต่อไป

2.5.1.3 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n

โฟโตไดโอดแบบ p-i-n หรือ พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงและความเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.14 (ก) โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

(ข) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เมื่อได้รับแสง

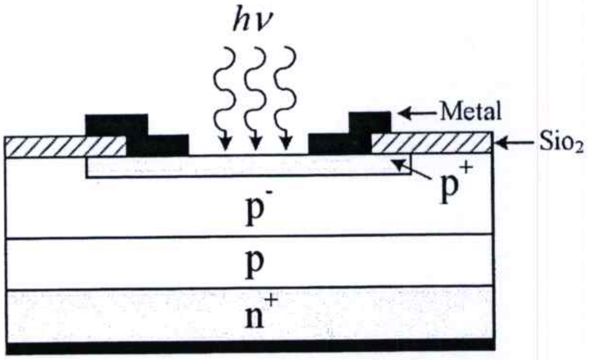
มีโครง สร้างดังรูปที่ 2.14 (ก) ประกอบด้วยส่วน p^+ ส่วน i (intrinsic) และส่วน n^+ แต่มีขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้ว คือขั้ว p^+ เป็นอาโนดและขั้ว n^+ เป็นคาโทด ส่วนชั้น i จะมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโด๊ปด้วยสาร เจือปนด้วยปริมาณที่น้อยมากเพื่อให้มีสภาพต้านทานสูง ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนจะถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดที่บางมากๆ เพื่อให้โฟตอนในแสงทะลุผ่านไปถึงชั้น i และที่ชั้น i นี้มีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ และโฟตอนเหล่านี้มีพลังงานมากพอที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ เนื่องจากชั้น i มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน p^+ และด้าน n^+ เป็นผลให้ไดโอดเมื่อได้รับแรงดันไบแอส จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้น i และเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมที่ส่วน i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i ซึ่งลักษณะของแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แสดงได้ดังรูปที่ 2.14 (ข)

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

2.5.1.4 โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์

โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ คือ โฟโตไดโอดแบบพี-เอ็น หรือ แบบ p-i-n แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษ นั่นคือให้ไดโอดทำงานใกล้ๆ กับจุดพังทลาย (breakdown point) เนื่องจากที่ใกล้จุดพังทลายของรอยต่อพี-เอ็น สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะหรือในชั้น i จะมีค่าสูงจนกระทั่งสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์การทวีคูณของพาหะได้ ดังนั้นในภาวะนี้กระแสแสงจะมีค่าสูงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



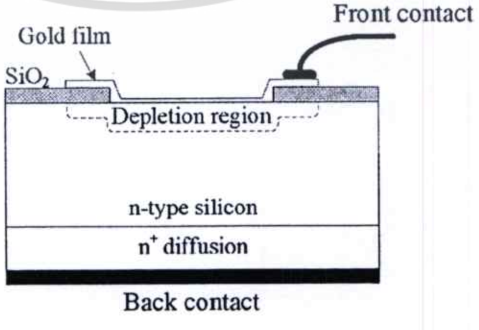
รูปที่ 2.15 โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ชนิดรีชทรู

ไดโอดจึงมีสมบัติเป็น โฟโตไดโอดความเร็วสูง (high sensitive photodiode) และเนื่องจากสนาม ไฟฟ้าในช่วงนี้สูงมาก ความเร็วของพาหะจึงมีค่าสูง ทำให้ความไวในการทำงานจึงสูงมาก ในรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างของโฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ชนิดรีชทรู เมื่อให้แรงดันไบแอสแบบย้อนกลับแก่อุปกรณ์ จะเกิดบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ pn^+ แล้วขยายกว้างไปจนถึงส่วน p^- ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามา โฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น p^+ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังรอยต่อ pn^+ ซึ่งสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้จะเร่งให้อิเล็กตรอนวิ่งไปชนกับโครงร่างผลึกและทำให้เกิดปรากฏการณ์ อะวาลานซ์ขึ้น

2.5.2 รอยสัมผัสช็อตกีย์

โครงสร้างของช็อตกีย์โฟโตไดโอด

ช็อตกีย์โฟโตไดโอด สร้างขึ้นจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้น p จะถูกแทนด้วยฟิล์มโลหะที่บางมาก เช่น ทองคำ หนาประมาณ 15 nm โครงสร้างของช็อตกีย์โฟโต-ไดโอด แสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของช็อตกีย์โฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นฟิล์มโลหะบางๆ นี้ จะทำให้แสงสามารถผ่านทะลุชั้นโลหะลงไปได้ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะจะเกิดขึ้นที่ใต้ชั้นฟิล์มโลหะ โฟตอนที่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะบางๆ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ถ้าเปรียบเทียบกับ โฟโตไดโอดโครงสร้าง p-i-n แล้ว ช็อตกีย์โฟโตไดโอดจะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้จากโครงสร้างช็อตกีย์โฟโตไดโอดยังมีค่าของความต้านทานและความจุไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูงกว่า สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ได้ดี

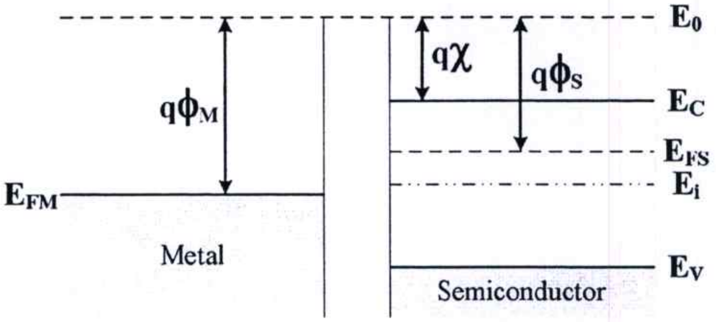
อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว (surface state)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

รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าคือ รอยสัมผัสแบบโอห์มมิค (ohmic contact) และรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ (schottky contact) ซึ่งรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ส่วนรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์เป็นรอยสัมผัสที่แสดงคุณสมบัติเรคติไฟร์ (rectifier) คล้ายกับไดโอด โดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์เท่านั้น

2.5.3 กลไกการเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์

แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.17 ระดับสุญญากาศ (vacuum level, E_0) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของเข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์

ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มิ (fermi level, E_{FM}) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_c) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย $\emptyset_M$ มีค่าดังสมการที่ 2.12 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น อลูมิเนียม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.3 V

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \tag{2.12}$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (E_i) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_c) ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย $\emptyset_S$ มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มิ ดังสมการที่ 2.13

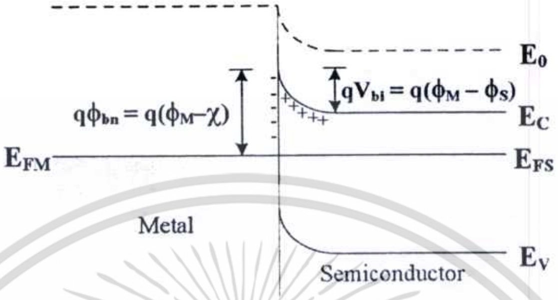
$$q\phi_s = E_0 - E_{FS} \tag{2.13}$$

ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ (electron affinity : χ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้เท่ากับ 4.05 V

การเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\emptyset_M > q\emptyset_S$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่ง-ตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D^+) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier, V_{bi}) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.14

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \tag{2.14}$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ช็อตกีย์ (schottky barrier, $\emptyset_{bn}$,) มีค่าดังสมการที่ 2.4 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตกีย์ต่างๆกัน

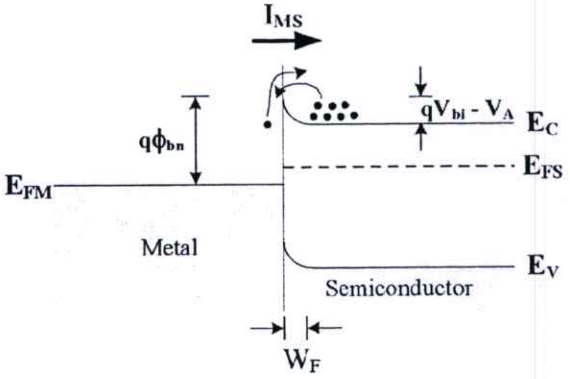
$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \tag{2.15}$$

2.5.4 รอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะได้รับไบอัส

2.5.4.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 2.19 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น (V_{bi}-V_A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ

ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อตกีย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงช็อตกีย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ (2.16)

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)-1\right] \qquad (2.16)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si)

$\emptyset_{bn}$ คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์

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

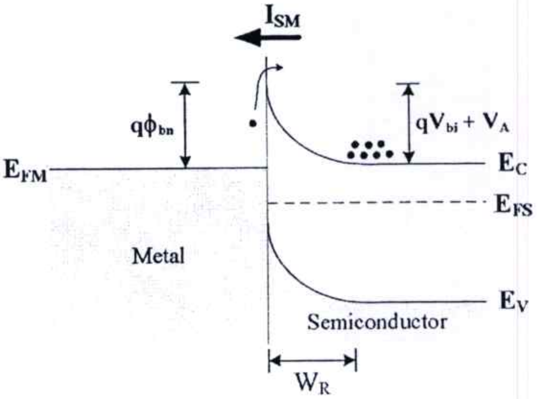
k คือ ค่าคงที่โบลต์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

2.5.4.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 2.20 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.20 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

โลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ($V_{bi}+V_A$) และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น

ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อน ที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อตกีย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ (2.17)

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \tag{2.17}$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

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

$\emptyset_{bn}$ คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์

k คือ ค่าคงที่โบลต์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width, W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ (2.18) โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S(V_{bi}+V_A)}{qN_D}} \tag{2.18}$$

โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

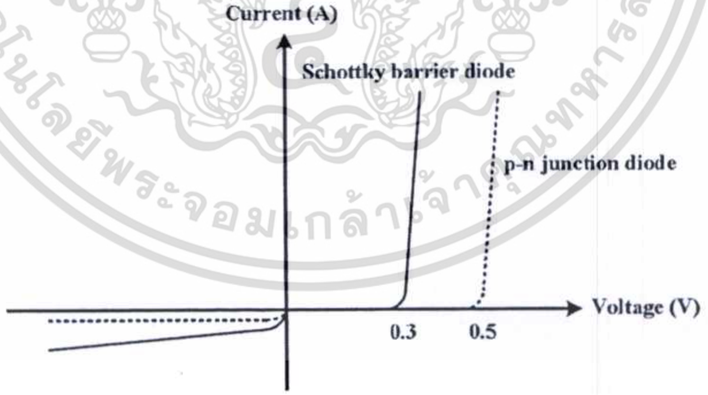
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602 x 10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

2.5.5 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสเรคติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อ p-n คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 2.21 พบว่าแรงดันภายในของช็อตกีย์ไดโอดมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ p-n ที่มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนกระแสรั่วไหลของช็อตกีย์ไดโอดมีค่าสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อ p-n เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

2.5.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์

ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.22 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ มีค่าดังสมการที่ 2.197

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$C = \frac{A\varepsilon_S}{W} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.19)$$

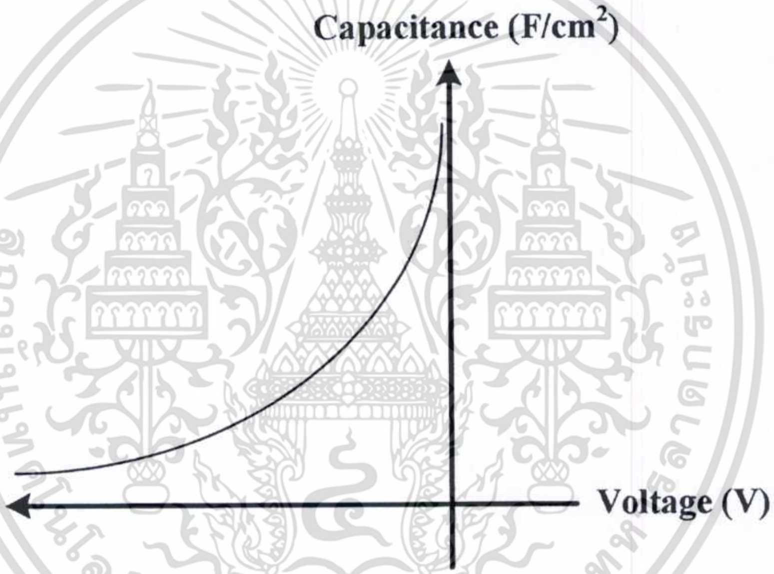
โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

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

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.22 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

หลังจากได้เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบางที่เหมาะสมสำหรับประยุกต์ใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแล้ว ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและกระบวนการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโดยใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า โดยโครงสร้างที่ทำการออกแบบ คือ ITO/n-Si และ ITO/p-Si ในการออกแบบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นแรกทำการศึกษาเพื่อหาขนาดแลรูปร่างของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่จะทำการสร้าง และเมื่อได้ขนาดและรูปร่างแล้ว ขั้นที่สอง จะต้องออกแบบเพื่อทำการสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง โดยใช้ขนาดและรูปร่างที่ได้จากขั้นตอนแรกมาสร้าง ซึ่งในขั้นตอนนี้ต้องออกแบบเพื่อประยุกต์ใช้อินเดียมทินออกไซด์ที่ได้ศึกษาในขั้นต้นมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงด้วย โดยการวิเคราะห์หาความเหมาะสมของพื้นที่และลักษณะรูปร่าง เราวิเคราะห์โดยใช้ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ (I-V) และ แรงดันภายใน (V_{bi}) เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาขั้นต้น โดยใช้อุปกรณ์ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ได้ไดโอดที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น

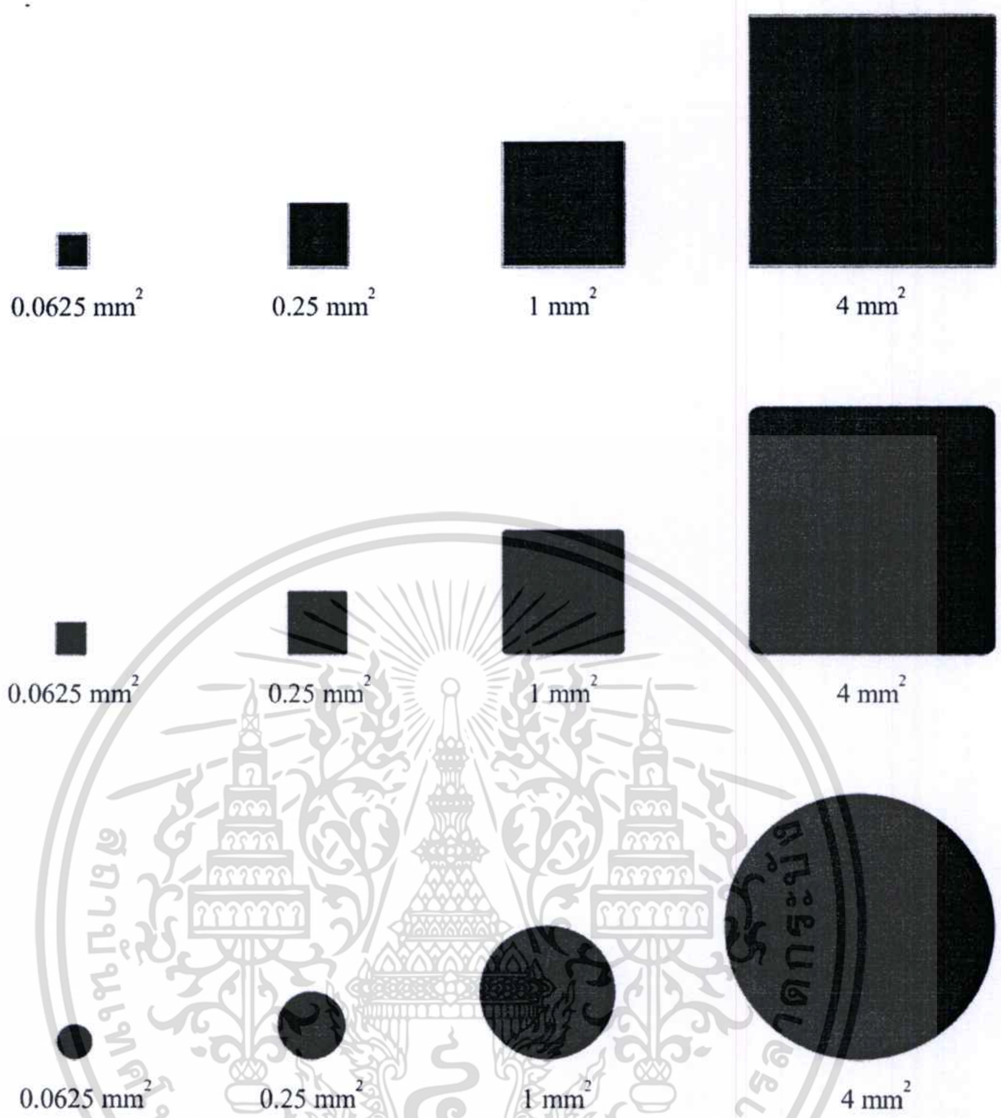
3.1 การออกแบบ และสร้างกระจกต้นแบบ

ที่กล่าวตอนต้นว่าการออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ ขั้นแรกศึกษาขนาดและรูปร่างของอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ขั้นสองออกแบบเพื่อสร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงโดยใช้ขนาดและรูปต่างตามขั้นตอนแรก

ขั้นแรก ออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบเพื่อหาขนาดและรูปร่างที่เหมาะสมสำหรับพัฒนาสร้างเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงรอยสัมผัสช็อตกีย์

รูปร่างที่ทำการศึกษานี้ ส่วนใหญ่ที่โรงงานอุตสาหกรรมหรือห้องวิจัยต่างๆ ได้มีการทดลองแล้วว่าสามารถดึงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงออกมาได้มากที่สุด ทำให้งานวิจัยนี้ได้ออกแบบรูปร่างออกเป็น 3 รูปแบบ คือ สี่เหลี่ยม สี่เหลี่ยมมุมโค้ง และวงกลม โดยขนาดของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สร้างกันส่วนใหญ่จะไม่ทำขนาดใหญ่ ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพของไดโอดลดลง ดังนั้นเราจึงออกแบบขนาดของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยใช้พื้นที่เป็นตัวกำหนดขนาดของอุปกรณ์ ซึ่งจะใช้ขนาด 0.0625 mm^2, 0.25 mm^2, 1 mm^2 และ 4 mm^2 แสดงดังรูป ที่ 3.1

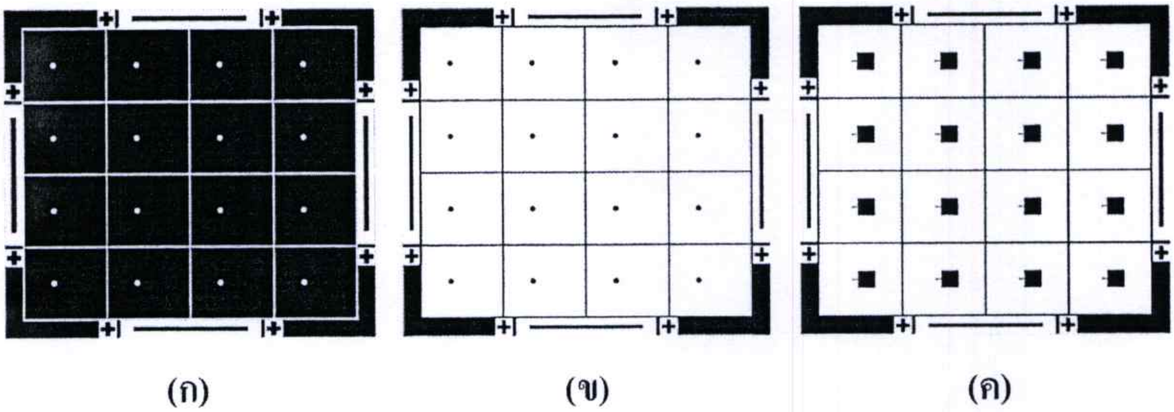
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ขนาดและลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยม, สี่เหลี่ยมขอบมน และวงกลมของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ตามลำดับ

ขั้นสอง เมื่อทำการศึกษาลวดลายที่เหมาะสมแล้ว ว่าจะใช้รูปร่างไหนและขนาดของพื้นที่เท่าไร จากนั้นจะทำการออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบเพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงรอยต่อช็อตกีย์ ทำการออกแบบกระจกต้นแบบไว้ทั้งหมด 3 แบบ คือ Oxide Mask (เพื่อสกัดชั้นออกไซด์ให้เป็นหลุมก่อนที่จะปลูกฟิล์มบาง ITO ลงไป), ITO Mask (เพื่อสกัดชั้นฟิล์ม ITO ให้เป็นรูปร่างและขนาดตามที่ได้ทดลองขั้นตอนแรก) และ Al Mask (เพื่อสกัดชั้นอลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้า) ดังแสดงในรูป 3.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง (ก) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้นออกไซด์ (ข) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้น ITO (ค) ลวดลายต้นแบบสำหรับชั้น Al

3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสนี้ จะใช้เทคโนโลยีของซิลิคอนซึ่งเป็นเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมที่ใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ การสร้างลวดลายต่างๆจะใช้เทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หลังจากขั้นตอนการออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบ แล้วจึงเริ่มกระบวนการสร้างโดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นและพี ระนาบ (100) ซึ่งมีค่าสภาพต้านทาน 10 Ω-cm และมีความหนาประมาณ 300 μm ขั้นตอนกระบวนการสร้างมีดังต่อไปนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน
    - อุลตร้าโซนิค (Ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ที่ขจัดไอออนแล้ว (di-ionization water: DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
    - จุ่มใน DI 1 แก้ว
    - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
    - ต้มในกรดพิรันยา (Piranha) จำนวน 1 แก้ว 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
    - จุ่มใน DI 1 แก้ว
    - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
    - จุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric Acid: HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 20 นาที
    - จุ่มใน DI 2 แก้ว
    - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 1

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชั่น (Thermal Oxidation) ให้ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 5000 Å เงื่อนไขและกระบวนการสร้างมีดังนี้

- ทำการออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชั่นแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1000 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที

3. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็นเข้มข้น

การแพร่สารเจือชนิดเอ็นเข้มข้นที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสชนิดโอห์มมิค (Ohmic contact) ขั้นตอนการแพร่สารเจือมีดังนี้

- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังแผ่นซิลิคอน โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH_4F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที เป็นเวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- เปิดเตา ปรับอุณหภูมิของเตาเป็น 1050 °C และทำการจ่ายก๊าซไนโตรเจนขั้นต้น โดยมีอัตราการไหล 500 cc/นาที
- ใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิภายในเตา เมื่ออุณหภูมิของเตามีค่าประมาณ 1050 °C แล้วให้เพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 800 cc/นาที
- ทำการดันฐานรองที่มีแผ่น Phosphorus และแผ่นซิลิคอนอยู่เข้าไป โดยเริ่มจากนำฐานรองวางทิ้งไว้ที่ปากเตาเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ทั้งแผ่นPhosphorus และแผ่นซิลิคอนมีการปรับอุณหภูมิ จากนั้นค่อยๆดันที่รอบรับแผ่นซิลิคอน เข้าไปในเตาจนถึงตำแหน่งที่เหมาะสม (ประมาณกลางเตา) ทิ้งไว้ 20 นาที
- หยุดการจ่ายก๊าซไนโตรเจน แล้วทำการจ่ายก๊าซออกซิเจน (แบบแห้ง) โดยมีอัตราการไหล 1200 cc/นาที และมีอุณหภูมิ 400 °C เป็นเวลา 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เมื่อครบตามเวลา ค่อยๆดึงโบทออก แล้วทิ้งไว้ที่ปากเตา เป็นเวลา 5 แล้วนำฐานรองออกจากเตา

4. กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 2

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชั่น ให้ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1500 Å เงื่อนไขและกระบวนการสร้างมีดังนี้

สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เดิมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH_3F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที เป็นเวลา 5 นาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ทำการออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชั่นแบบชื้นเป็นเวลา 10 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1000 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที

5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 1 เพื่อสกัดชั้นซิลิคอนออกไซด์

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 1ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ขึ้นลวดลายย้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้วๆละ 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นครั้งที่สอง (post bake) ให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสงโดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH_3F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที เป็นเวลา 1 นาที 30 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

6. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม (ด้านหน้าแผ่นซิลิคอน)

เคลือบผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสูญญากาศ (Vacuum Evaporation) ที่ความดันประมาณ 2 x 10^{-6} Torr

7. กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 2 เพื่อสกัดลวดลายโลหะอลูมิเนียม ครั้งที่ 1
   - อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
   - เคลือบน้ำยาไวแสง AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
   - อบแผ่นครั้งแรก ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20นาที
   - ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
   - ขึ้นลวดลายน้ำไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย 2 แก้วๆ ละ 20 วินาที
   - จุ่มใน DI 2 แก้ว
   - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
   - อบแผ่นครั้งที่สอง ให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- สกัดชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อสร้างเป็นขั้วอิเล็กโทรด โดยใช้สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ซึ่งมีส่วนผสมของ H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ทำการจุ่มลงในสารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

8. กระบวนการสปัตเตอร์ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

การปลูกฟิล์มบางของอินเดียมทินออกไซด์ จะใช้สารเคลือบเป็นเป้า (target) เป็นอินเดียมทินออกไซด์ที่มีความบริสุทธิ์ 99.99% ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 นิ้ว ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่าง In_2O_3 90 wt% กับ SnO_2 10 wt% ในโครงงานนี้ใช้เทคนิคในการปลูกฟิล์มบางที่ไม่มีการให้อุณหภูมิแก่ฐานรองรับโดยขั้นตอนการทำงานในระบบมีดังนี้

- ติดตั้ง ITO target
- เช็คระบบ

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 (หมุน2.5รอบ และวาล์วทุกตัวเปิด)
- เปิดสวิทซ์ Rotary pump (main switch) และเปิดสวิทซ์ 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 แล้วปิดหัวถัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อาร์กอนแก๊ส กลับมาเปิดวาล์ว NV. ใหม่รอให้ได้ pressure < $1x10^{-1}$ bar อีกครั้ง ทำอย่างนี้ประมาณ 3 ครั้ง เมื่อครบแล้วให้ปิด stop valve และเปิดอาร์กอนแก๊สมาขังไว้ในท่อ)

- ปิดวาล์ว RV.
- เปิดวาล์ว FV. แล้วทดลองใช้ geissler tube วัดอากาศใน Chamber (geissler tube ไม่ควรติด) รอประมาณ 3 นาที
- เปิดวาล์ว MV. (ค่อยๆเปิดจนสุด) และรอจนระบบมี pressure ใน chamber < $1x10^{-5}$ bar โดยวัดได้จาก B-A vacuum gague (หรือ ion-gauge)
- เติม liquid N_2 เมื่อได้ pressure ประมาณ $1x10^{-5}$ bar และเติมทุกๆ 30 นาทีจนกว่าจะได้ base pressure <$1x10^{-6}$
- ปิดสวิทซ์ 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
- เปิดสวิทซ์ 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 5นาที)

    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 จนเป็นสวิทซ์ของ RF power switch
- ปิด Ar gas โดย

    ปิดวาล์ว NV.

    Stop valve

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปิดหัวถังแก๊ส

- เปิดวาล์ว MV. จนสุด และรออีก 1 ชั่วโมง
- ปิดสวิทซ์ AC switch ของ RF power switch หลังจากปิดสวิทซ์ RF switch แล้ว 15 นาที
- ปิดวาล์ว MV.
- ปิดสวิทซ์ diffusion pump แล้วรออีก 30 นาที
- ปิดวาล์ว FV.
- ปิดสวิทซ์ rotary pump
- Leak pressure ของ rotary pump ในทันที
- ปิดระบบ cooling water

9. กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 3 (ITO Mask) และ มาร์กที่ 2 (Aluminium Mask)

เนื่องจากสารละลาย HCl ที่ไว้ใช้สำหรับสกัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์นั้นจะสกัดเอาอลูมิเนียมออกไปด้วย จึงต้องมีการปรับซ้อนทั้ง ITO Mask และ Aluminium Mask เพื่อป้องกันไม่ให้อลูมิเนียมโดนสกัดออก

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 3 (ITO Mask) ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 (Aluminium Mask) ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- สกัดชั้นฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ออก เพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส โดยจุ่มลงในสารละลาย HCL(HCL : DI อัตราส่วน 1 : 1) ที่อุณหภูมิ 40°C เป็นเวลา 30 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

10. กระบวนการอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Annealing)

การอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เป็นกระบวนการทางความร้อนเพื่อทำให้โครงสร้างของฟิล์มสมบูรณ์ขึ้น มีสมบัติทางไฟฟ้าดีขึ้น และทำให้การยึดเกาะกับซิลิคอนดีขึ้น โดยนำชิ้นงานไปอบในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300 °C เป็นเวลา 15 นาที อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1000 cc/นาที

11. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม (ด้านหลังแผ่นซิลิคอน)

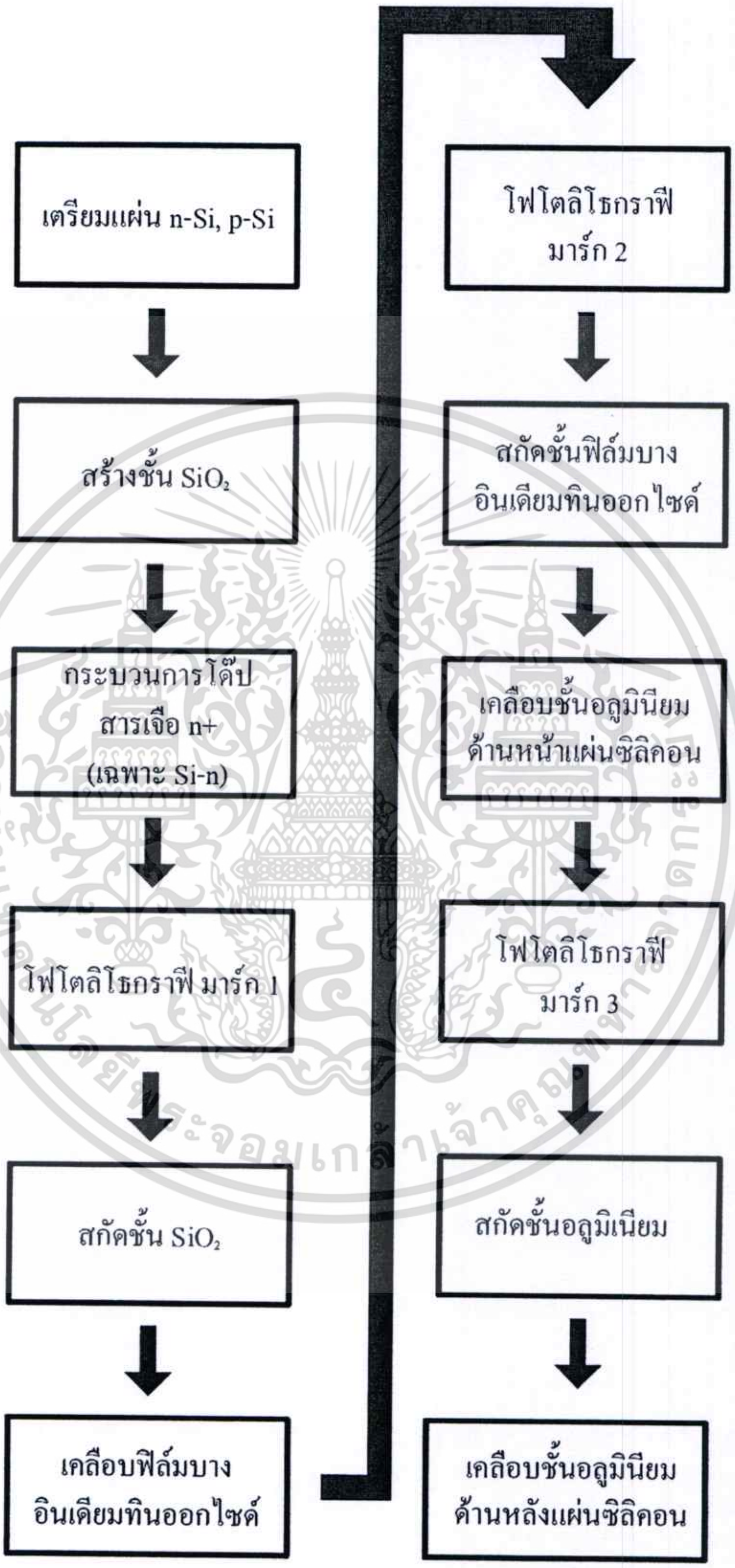
- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20นาที
- ทำการสกัดชั้นออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการสร้าง schottky photodetector มีขั้นตอน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 สรุปกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง schotty photodetector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองเริ่มต้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ยังไม่เคยมีการใช้สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์มาประยุกต์ใช้กับตัวตรวจวัดแสง ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงต้องเริ่มทำการศึกษาตั้งแต่กระบวนการเตรียมฟิล์มบางเพื่อให้มีความเหมาะสมที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงให้มีประสิทธิภาพสูงต่อไป หลังจากการศึกษาการเตรียมฟิล์มบางแล้ว จะนำฟิล์มบางเข้าสู่กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงต่อไป

ในการทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ขั้นตอนแรกศึกษาและเตรียมฟิล์มบาง และอีกขั้นตอนคือการใช้ฟิล์มบางเพื่อทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง รวมไปถึงการวัดผลการทดลองต่างๆ

4.1 การศึกษาและเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

กระบวนการนี้เริ่มต้นจากการศึกษาลักษณะเฉพาะตัวของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ เนื่องจากเป็นสารประกอบประเภทเซรามิก มีความแข็ง แต่เปราะ จุดหลอมเหลวสูง จึงต้องหาวิธีในการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ จากที่การศึกษากระบวนการในการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ มีหลายกระบวนการแต่เมื่อมาวิเคราะห์ถึงความสะดวกและวิธีที่นิยมใช้กันส่วนใหญ่คือ สปัตเตอร์ เนื่องจากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีเครื่องสปัตเตอร์ ซึ่งง่ายและสะดวกอีกทั้งยังเป็นวิธีที่นิยมในการเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

ฉะนั้นเมื่อเลือกวิธีสปัตเตอร์ในการเตรียมฟิล์มบาง จะได้มาดูในเรื่องของขอบเขตงานที่จะทำการศึกษา และการประยุกต์ใช้งานต่อไปนั้น คุณลักษณะของฟิล์มบางที่เหมาะสมควรมีค่าการส่องผ่านแสงสูงและสภาพต้านทานต่ำ เนื่องจากจะทำเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส หลังจากที่ทำการศึกษาจากงานวิจัยที่ตีพิมพ์ระดับนานาชาติ พบว่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางจะดี เมื่อความสมบูรณ์ของฟิล์มสูง นั่นก็คือเกรนมีความสมบูรณ์ มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบโดยมีการเรียงตัวไปในทิศทางเดียวกัน (Crystallization) เมื่อกำหนดทิศทางการศึกษาคุณสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง จึงแบ่งการทดลองออกเป็นส่วนๆ คือ การศึกษาฟิล์มบางที่ยังไม่ได้ปรับปรุงคุณภาพและส่วนของการปรับปรุงคุณภาพให้เหมาะสมกับการนำไปใช้งาน ในการทดลองนี้จะทำ

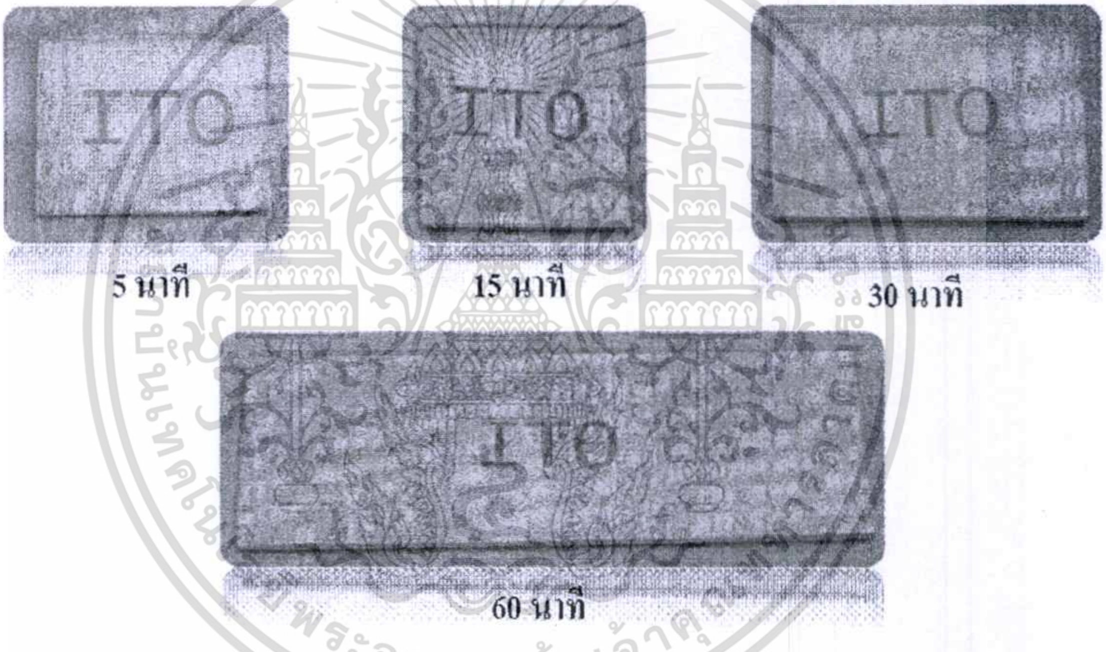
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสปัตเตอร์ฟิล์มบางที่เวลา 5, 15, 30 และ 60 นาที [30-32] การแอนนีลจะทำในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ไนโตรเจนและอากาศ ควบคุมเวลาในการแอนนีลที่ 15 นาที [33-35] ผลการทดลองทั้ง 2 ส่วน แสดงดังต่อไปนี้

4.1.1 การศึกษาคุณสมบัติฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ไม่ได้แอนนีล

4.1.1.1 การวัดคุณสมบัติทางโครงสร้าง

การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ใช้วิธีอาร์เอฟ สปัตเตอร์ ลักษณะฟิล์มบางที่เตรียมได้ แสดงดังรูปที่ 4.1



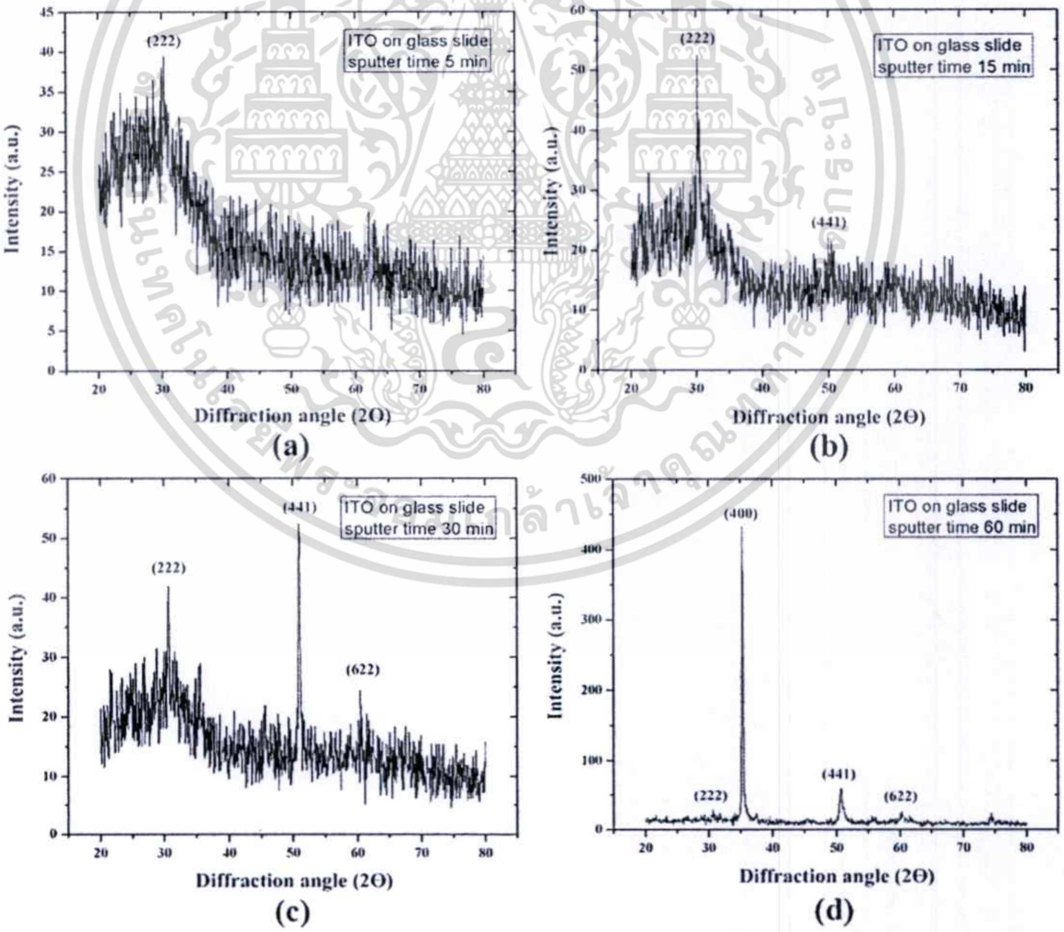
รูปที่ 4.1 ลักษณะของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เวลาต่างกัน

จากรูปที่ 4.1 เป็นฟิล์มบางในการเตรียมที่เวลาต่างกัน คือ 5, 15, 30 และ 60 นาที ความหนาของฟิล์มจะมีความแตกต่างกันตามเวลาในการเตรียม การตรียมฟิล์มบางจะทำบนฐานรองที่เป็นกระจกใส เมื่อใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มนาน ความหนาของฟิล์มจะหนามากขึ้น ฟิล์มที่เตรียม 5 นาที จะเห็นว่าผิวของฟิล์มยังขุ่นมัว สังเกตไม่ชัดนักว่ามีฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เคลือบอยู่หรือมีอยู่น้อยมาก และเมื่อสังเกตฟิล์มที่เตรียม 15 นาที จะเริ่มเห็นฟิล์มบางๆเกาะบนกระจก โดยมีสีต่างๆกันคือ สีม่วงอมชมพู สีเขียว เป็นต้น ส่วนที่เวลา 30 นาที เริ่มสังเกตเห็นฟิล์มบางเริ่มมีริ้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นและสามารถเห็นได้ชัดเจน และที่เวลา 60 นาทีนั้น จะเห็นว่าริ้วและสีต่างๆจะมีความเด่นชัดกว่าฟิล์มที่เวลาในการเตรียมน้อยกว่า

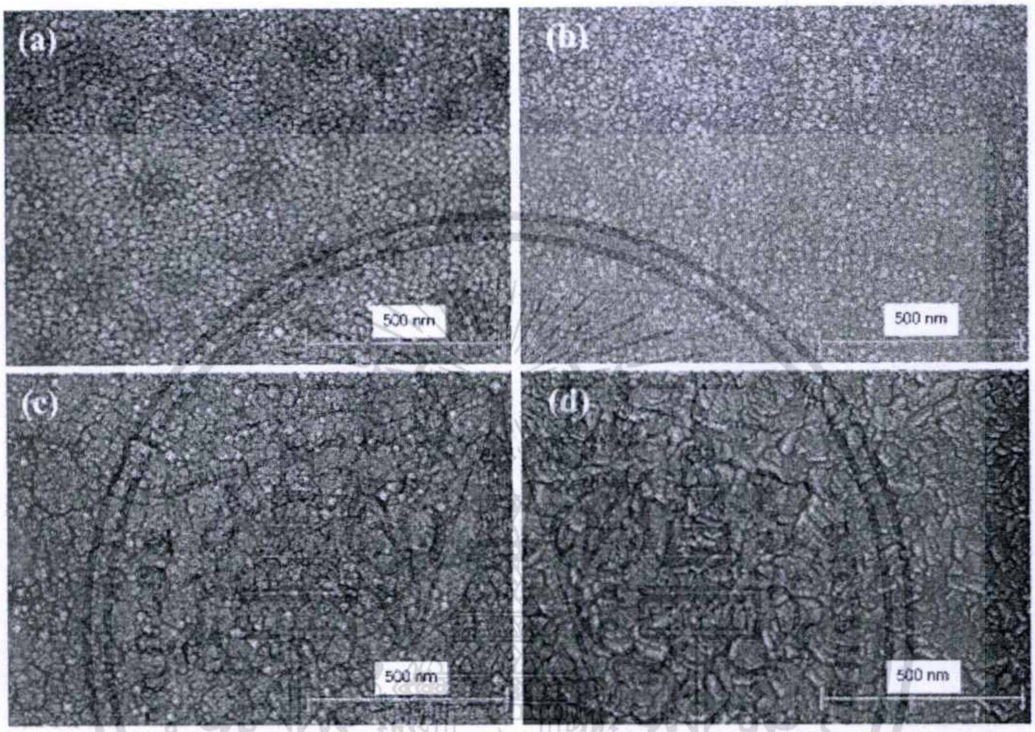
องค์ประกอบทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์จากรูปที่ 4.2 แสดงระนาบต่างๆ คือ (222), (400), (441) และ (622) ซึ่งระนาบเหล่านี้เป็นระนาบของอินเดียมทินออกไซด์ [36-37] ดังนั้นจึงมั่นใจว่าฟิล์มบางที่ทำการปลูกนี้มีองค์ประกอบของอินเดียมทินออกไซด์ และจากรูปที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าระนาบ (400) เมื่อเวลาในการเตรียมฟิล์มบางเพิ่มขึ้นความเด่นชัดของระนาบเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจนที่สุด เป็นผลจากการจัดเรียงตัวของผลึกที่ค่อนข้างสมบูรณ์ทำให้เห็นระนาบที่ชัดเจน ส่วนระนาบ (222),(441) และ (622) ถึงแม้ว่าจะมีระนาบที่ไม่ชัดเจนเป็นผลเนื่องมาจากการจัดเรียงตัวที่ยังไม่ค่อยสมบูรณ์แต่ก็ยังแสดงคุณสมบัติของอินเดียมทินออกไซด์ ที่เวลาในการสปัตเตอร์น้อยๆระนาบของกราฟที่ได้จะมีระนาบที่ไม่เด่นชัด แสดงให้เห็นถึงความสมบูรณ์ของฟิล์มที่เตรียม ณ เวลาแตกต่างกัน



รูปที่ 4.2 องค์ประกอบทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ที่เวลาในการสปัตเตอร์ต่างกัน (a) 5 นาที, (b) 15 นาที, (c) 30 นาที และ (d) 60 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.3 แสดงลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางในการเตรียมที่เวลาต่างๆ รูป 4.3 (a) ฟิล์มบางที่ 5 นาที ลักษณะพื้นผิวมีความสมบูรณ์น้อย สังเกตจากสีของพื้นผิวที่มีทั้งสีเทาและสีดำสลับกัน ส่วนที่เป็นสีเทานั้นเป็นฟิล์มบางที่ค่อนข้างราบเรียบ ส่วนพื้นที่ส่วนสีดำอาจจะเป็นฟิล์มบางที่ยังไม่ค่อยสม่ำเสมอหรือมีความพรุนอยู่ทำให้ฟิล์มมีความสมบูรณ์ค่อนข้างน้อย



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

รูป 4.3 (b) ฟิล์มบางที่ 15 นาที ฟิล์มเริ่มมีการจัดเรียงตัวดีขึ้น สังเกตได้จากสีของฟิล์มไม่มีจุดด่างดำสลับกับสีเทาเหมือนที่เตรียม ที่เวลา 5 นาที ลักษณะของพื้นผิวสังเกตเป็นผลึกขนาดใกล้เคียงกันกระจายทั่ว และรูป 4.3 (c) ฟิล์มบางที่ 30 นาที เริ่มมีการจับตัวของผลึกเกรนดีขึ้นกว่าเดิม เมื่อเปรียบเทียบกับรูป 4.3 (a) และ 4.3 (b) จากรูปพื้นผิวของฟิล์มมีความราบเรียบดีและระยะของเกรนเริ่มมีการผสานกันได้ดี ความราบเรียบที่ดีกว่าเดิมนั่นแสดงว่าผลึกเริ่มมีการจัดเรียงตัวดีขึ้น ส่วนรูป 4.3 (d) เป็นรูปที่เตรียม ที่เวลา เวลา 60 นาที รูปนี้ค่อนข้างชัดเจนที่เกรนมีความสมบูรณ์กว่ารูปที่ผ่านมา จะเห็นขนาดของเกรนที่มีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีความสมบูรณ์ของผลึกดีมาก ความราบเรียบของพื้นผิวดี [38] นั่นแสดงให้เห็นว่าฟิล์มบางที่ทำการเตรียมที่เวลา 60 นาที ความสมบูรณ์ของผลึก การจัดเรียงตัวของเกรน และความราบเรียบของพื้นผิวฟิล์มดีเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบกับที่เวลา 5,15 และ 30 นาที การวิเคราะห์ผลการทดลองระหว่าง XRD และ SEM ผลที่ได้มีความสอดคล้องกัน เวลาในการเตรียมฟิล์มที่ 5 นาทีความสมบูรณ์ของผลึกมีค่าค่อนข้างน้อย และจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเวลาในการเตรียมมากขึ้น

ความหนาของฟิล์มบางมีวิธีหาดังแสดงในรูปที่ 4.4 การหาความหนาได้จากเทคนิค SEM โดยถ่ายภาคตัดขวางของฟิล์มบาง สามารถหาขนาดความหนาดังแสดงดังรูป ที่เวลาในการเตรียมเพิ่มขึ้นความหนาของฟิล์มยิ่งมาก ส่วนลักษณะของเกรนมีการจัดเรียงตัวเป็นแนวตั้ง เมื่อแสงตกกระทบอาจจะทำให้มีการส่งผ่านมายังแนวตั้งได้ดี ดังนั้นการกระเจิงแสงจึงมีค่าที่ค่อนข้างน้อยตามไปด้วย และเมื่อสังเกตความสม่ำเสมอ ฟิล์มมีความสม่ำเสมอค่อนข้างดี

รูปที่ 4.4 การหาความหนาของฟิล์มบาง ด้วยเทคนิค SEM

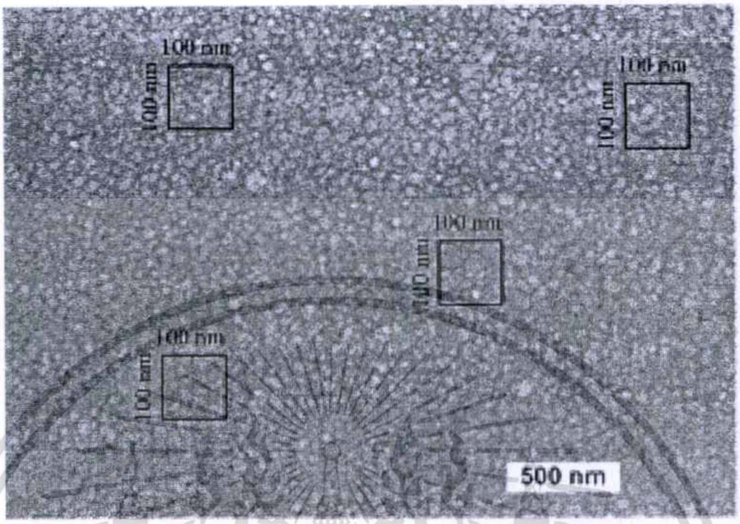
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบการวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคที่แตกต่างกัน

เวลาในการเตรียม (min)	วัดความหนาด้วย SEM (nm)	วัดความหนาฟิล์มด้วย Surface profile (nm)
5	75	*
15	229	*
30	521	502
60	1,166	1,120

หมายเหตุ * หมายถึง ไม่สามารถวัดได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาขนาดเกรนของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ มีวิธีหาดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งการหาขนาดของเกรนในปัจจุบันมีหลายวิธี แต่วิธีที่เราทำนี้เป็นการหาค่าเฉลี่ยว่าจำนวนเกรนที่อยู่ในกรอบสี่เหลี่ยมหารด้วยระยะของกรอบ ซึ่งจะได้ขนาดของเกรนโดยเฉลี่ย



รูปที่ 4.5 การหาขนาดเกรน

ตาราง 4.2 ขนาดเกรนที่เวลาในการเตรียมฟิล์มบางแตกต่างกัน

เวลาการสปัตเตอร์	ขนาดเกรน (nm)
5 นาที	24
15 นาที	30
30 นาที	47
60 นาที	76

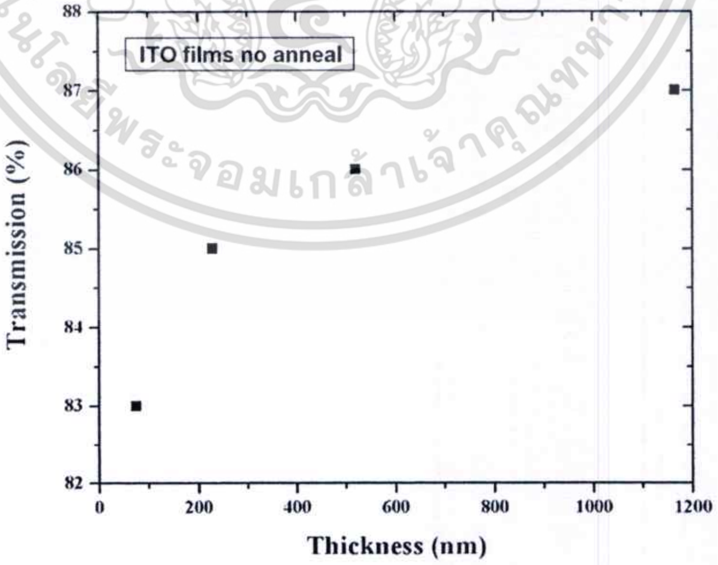
4.1.1.2 การวัดคุณสมบัติทางแสง

การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มีค่าสูงในย่านแสงในช่วง 400-800 nm สังเกตได้จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์มีค่าสูงถึงประมาณ 80% ขึ้นไป จากเส้นกราฟ a, b, c และ d เป็นกราฟแสดงค่าการส่องผ่านแสงของฟิล์มบางที่ความหนาต่างๆ เมื่อพิจารณางานที่จะนำไปใช้ต่อไปโดยจะนำตัวตรวจวัดแสงทดสอบกับเลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สีแดง (ความยาวคลื่น 670 nm) เส้นกราฟ a ที่ความหนาของฟิล์มประมาณ 75 nm ถึงแม้ว่าฟิล์มบางจะมีความหนาน้อยที่สุดแต่นั่นไม่ใช่ปัจจัยที่ทำให้การส่องผ่านแสงสูงตามไปด้วย เนื่องจากการจัดเรียงตัวของผลึกมีความไม่สมบูรณ์ เมื่อแสงตกกระทบจะเกิดทั้งการทะลุผ่าน การสะท้อนและการดูดกลืน ซึ่งแสงบางส่วนจะกระเจิงออกไปทำให้ค่าการส่องผ่านแสงมีค่าลดลง ส่วนในเส้นกราฟ b, c การส่องผ่านแสงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากการจัดเรียงตัวของผลึกมีค่าสมบูรณ์ขึ้น ทำให้การส่องผ่านแสงมีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย เส้นกราฟ d เป็นฟิล์มบางที่ความหนาประมาณ 1,166 nm ถึงแม้ว่าเป็นฟิล์มที่มีความหนาค่อนข้างมาก แต่ค่าการส่องผ่านแสงมีค่าสูงที่สุดเนื่องจากการจัดเรียงตัวของผลึกมีความสมบูรณ์ เมื่อแสงตกกระทบการกระเจิงจึงมีค่าน้อยทำให้การส่องผ่านมีค่าสูง

รูปที่ 4.6 การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนาต่างๆ

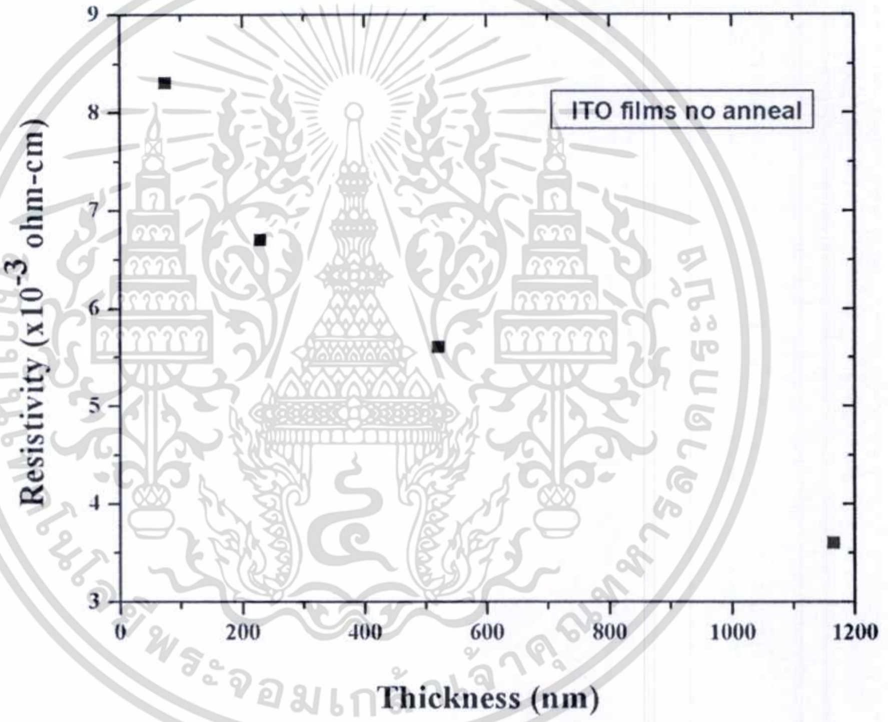


รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการส่องผ่านและความหนาฟิล์มบาง ที่ความยาวคลื่น 670 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.3 การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

สภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ความหนาเปลี่ยนไปนั้นแสดงดังรูปที่ 4.8 จากรูปเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานกับความหนาฟิล์มบาง แนวโน้มของกราฟนั้นเมื่อความหนาฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นสภาพต้านทานจะมีค่าน้อยลง เพราะความสมบูรณ์ของผลึกและความราบเรียบของผิวฟิล์มจะมีค่าค่อนข้างดีที่ความหนาฟิล์มมาก ทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะไปได้อย่างสะดวก ซึ่งตรงกันข้ามกับฟิล์มที่มีความหนาน้อย ความสมบูรณ์ของผลึกค่อนข้างต่ำ ความสม่ำเสมอของผิวฟิล์มน้อย ทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะไม่สะดวก ส่งผลทำให้กระแสมีค่าน้อย โดยที่สภาพต้านทานมีค่าเป็นส่วนกลับของกระแส ฉะนั้นเมื่อกระแสมีค่าน้อย สภาพต้านทานจึงมีค่ามากขึ้น



รูปที่ 4.8 สภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ความหนาของฟิล์มค่าต่างๆ

สภาพต้านทานของฟิล์มบางที่ความหนาเปลี่ยนไปนั้นแสดงดังรูปที่ 4.8 จากรูปเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสภาพต้านทานแผ่นกับความหนา แนวโน้มของกราฟนั้นเมื่อความหนาฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นสภาพต้านทานจะมีค่าน้อยลง เพราะความสมบูรณ์ของผลึกและความราบเรียบของผิวฟิล์มจะมีค่าค่อนข้างดีที่ความหนาฟิล์มมาก ทำให้สภาพคล่องของพาหะไปได้อย่างสะดวก ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

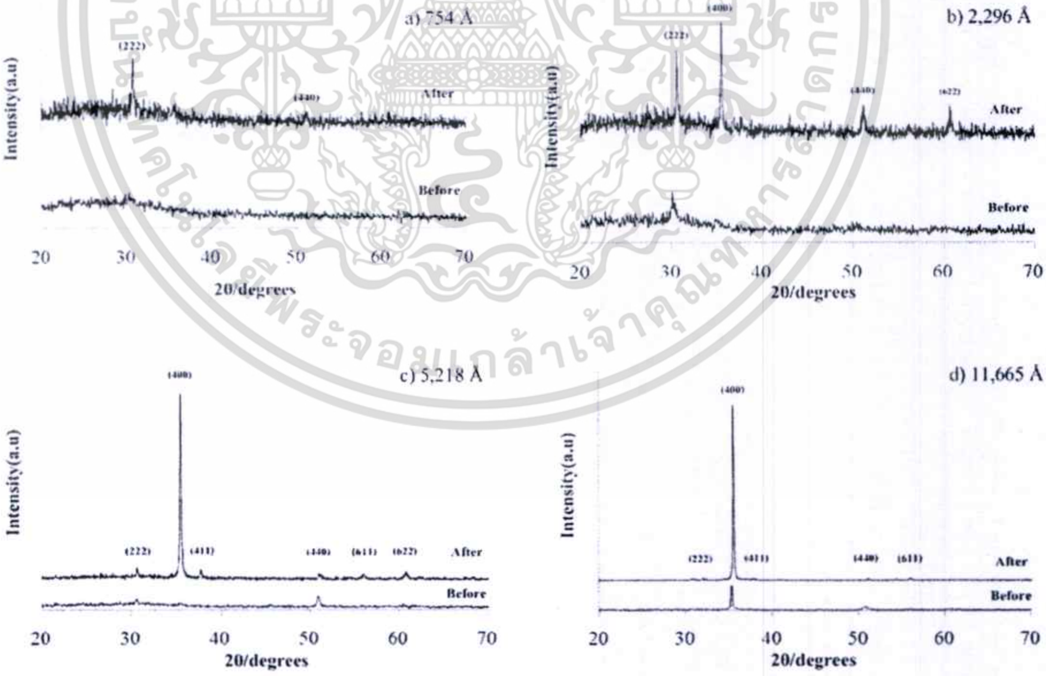
ตรงกันข้ามกับฟิล์มที่มีความหนาน้อย ความสมบูรณ์ของผลึกค่อนข้างต่ำ ความสม่ำเสมอของผิวฟิล์มน้อย ทำให้สภาพคล่องของพาหะต่ำ ส่งผลทำให้กระแสมีค่าน้อย สภาพต้านทานจึงมีค่าสูงขึ้น

4.1.2 การแอนนีลฟิล์บางอินเดียมทินออกไซด์ในบรรยากาศ

การแอนนีลในบรรยากาศทั่วไป เป็นจุดเริ่มต้นของการปรับปรุงคุณภาพ เนื่องจากได้ศึกษาผลกระทบเบื้องต้นของก๊าซที่อยู่ทั่วไปในบรรยากาศ ง่ายและประหยัดค่าใช้จ่ายในการทดลอง และอีกประการคือในอากาศมีส่วนผสมของก๊าซไนโตเจนและออกซิเจนในอัตราส่วนประมาณ (3:1) ทำให้ผลการทดลองที่ออกมามีทั้งผลที่เกิดจากก๊าซไนโตเจนและออกซิเจน ซึ่งจะทำให้เห็นผลบางประการที่ทำให้มีแนวคิดและพัฒนาต่อไป

4.1.2.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง

การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์หลังจากทำการแอนนีลในอากาศ การแอนนีลทำให้ฟิล์มมีการปรับปรุงคุณภาพให้ดีขึ้นกว่าเดิม

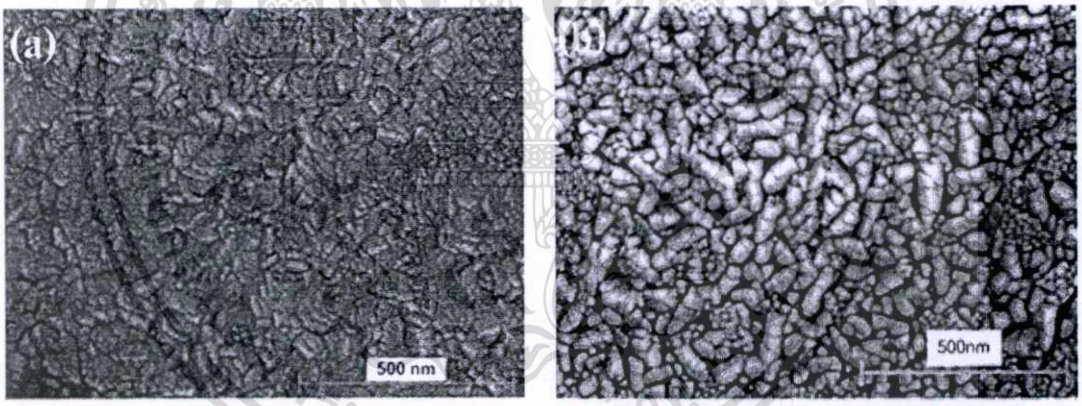


รูปที่ 4.9 ลักษณะทางโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงหลังจากทำการแอนนีลในบรรยากาศ ที่อุณหภูมิ 500°C (a) 75 nm, (b) 229 nm, (c) 521 nm และ (d) 1,166 nm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกและโครงสร้างมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9 จากรูปเปรียบเทียบลักษณะทางโครงสร้างของฟิล์มบางระหว่างก่อนการแอนนีลและหลังจากการแอนนีล ที่อุณหภูมิ 500 °C รูป 4.9 (a) ฟิล์มบางที่ความหนา 75 nm ก่อนการแอนนีลระนาบมีความเด่นชัดค่อนข้างน้อย หลังจากแอนนีลในบรรยากาศ ระนาบมีความเด่นชัดขึ้น สามารถวิเคราะห์ว่าความสมบูรณ์ของผลึกดีขึ้นกว่าเดิม รูป 4.9 (b) ฟิล์มที่ความหนา 229 nm หลังจากการแอนนีลกราฟแสดงระนาบเด่นชัดขึ้นและมีระนาบที่มีความเด่นชัดเพิ่มมากขึ้นจากเดิมหลายระนาบ คือ (400), (440) และ (622) เดิมมีเฉพาะระนาบ (222) เท่านั้นที่เด่นชัด ส่วนในรูปที่ 4.9 (c) และ 4.9 (d) ระนาบมีความเด่นชัดมากขึ้นตามลำดับ แสดงว่าเมื่อนำฟิล์มไปแอนนีล ผลึกมีการจัดเรียงตัวในทิศทางที่ดีขึ้นยิ่งขึ้น [39]

ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางหลังการแอนนีลในบรรยากาศ ผลึกมีการจัดเรียงตัวดีขึ้นกว่าเดิม มีความสมบูรณ์ของผลึกมากขึ้น ดังแสดงรูปที่ 4.10 แต่สิ่งที่แตกต่างคือรูปร่างของเกรน ที่แปรเปลี่ยนตามชนิดของก๊าซที่ใช้ในการแอนนีลเมื่อเปรียบเทียบระหว่างฟิล์มที่ไม่ทำการแอนนีลและแอนนีล

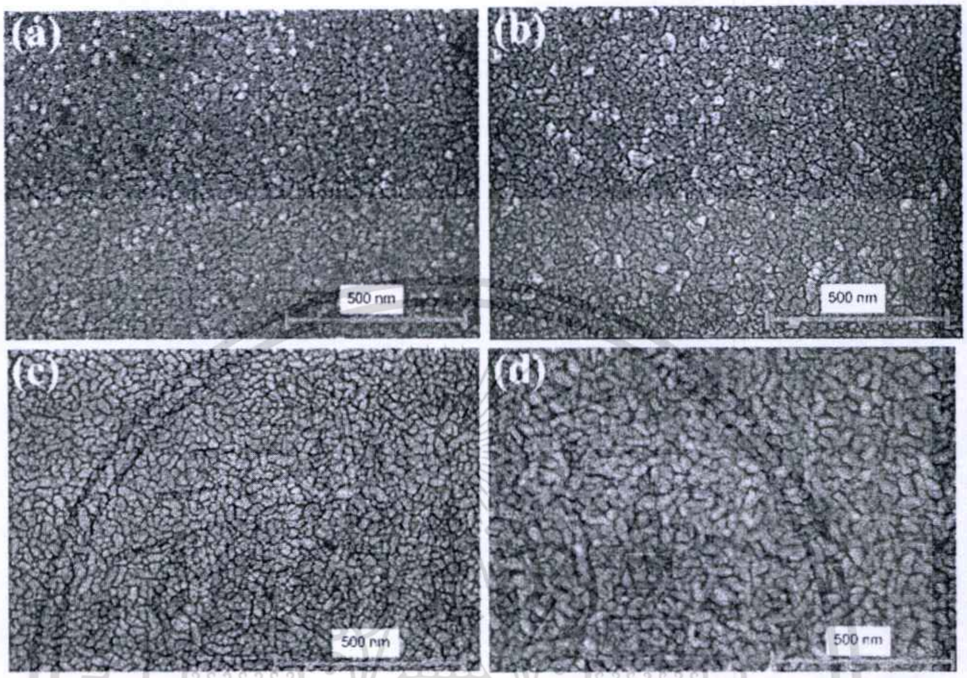


รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบลักษณะของเกรนระหว่าง (a) ไม่ได้แอนนีล (b) แอนนีลในบรรยากาศ

ในบรรยากาศ ลักษณะของเกรนมีการเปลี่ยนรูปร่างต่างจากเดิมโดยก่อนนั้นมีลักษณะเป็นผลึกยึดติดกันเป็นแผ่นอย่าหนาแน่น หลังจากการแอนนีลสามารถจำแนกรูปร่างของผลึกออกเป็น 2 ลักษณะ ซึ่งอาจจะเกิดจากองค์ประกอบของบรรยากาศที่ประกอบด้วยก๊าซหลายชนิด เช่น ไนโตรเจนและออกซิเจน ฉะนั้นลักษณะเกรนที่เปลี่ยนไปนี้อาจจะเป็นผลจากชนิดของก๊าซทำให้ลักษณะของเกรนออกมาแตกต่างกัน ลักษณะเกรนที่จำแนกได้เป็นแบบผลึกที่มีรูปร่างตามยาวเรียงต่อกันคล้ายเส้น ส่วนเกรนอีกรูปหนึ่งมีลักษณะมนๆมีขนาดเล็กว่าเกรนที่ลักษณะตามแนวยาว เมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเทียบปริมาณของเกรนทั้ง 2 รูปแบบ เกรนลักษณะเรียงตัวตามแนวยาวมีปริมาณมากกว่าเกรนที่มีลักษณะมนๆ คาดว่าเกรนที่มีลักษณะตามยาวจะเป็นผลจากก๊าซไนโตรเจนที่มีประมาณมากในอากาศ ส่วนเกรนรูปร่างมนเป็นผลจากก๊าซออกซิเจน



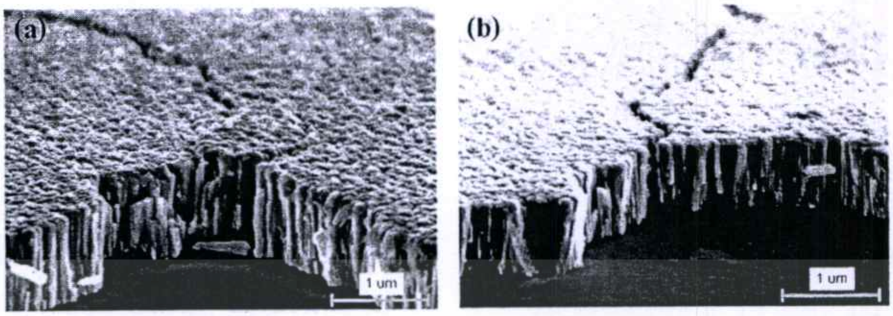
รูปที่ 4.11 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm หลังการแอนนีลในบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างกัน คือ (a) 200 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C และ (d) 500 °C ตามลำดับ

จากรูปที่ 4.11 จะเห็นว่าลักษณะผิวฟิล์มบางมีการเปลี่ยนแปลงหลังจากแอนนีลแล้วนั้นเป็นผลจากชนิดของก๊าซและอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีล ชนิดของก๊าซทำให้ลักษณะของเกรนมีความแตกต่าง ส่วนอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีล ส่งผลให้เกิดการแปรเปลี่ยนของผลึกในลักษณะที่ต่างกัน ดังรูป 4.11(a) และ 4.11 (b) การเปลี่ยนแปลงของเกรนยังเห็นความแตกต่างไม่ชัด แต่พื้นผิวเรียบสม่ำเสมอขึ้น [40] ส่วนรูป 4.11 (c) และ 4.11 (d) เกรนมีการจัดเรียงตัวได้ดีขึ้น แต่เกิดรอยแยกบนผิวฟิล์ม ซึ่งรอยแยกที่เกิดขึ้นนี้ลึกลงไปข้างล่างทำให้ฟิล์มมีการรอยแตกเป็นจุดๆ ลึกลงไปในโครงสร้าง สังเกตรอยแยกได้จากรูปที่ 4.12

ผลจากการแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ ดังที่เห็นในรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าถึงแม้ที่อุณหภูมิที่ 400 °C และ 500 °C จะทำให้การจัดเรียงตัวของฟิล์มดี ขึ้นจากเดิม แต่ก็เกิดสิ่งหนึ่งที่ทำให้คุณสมบัติทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

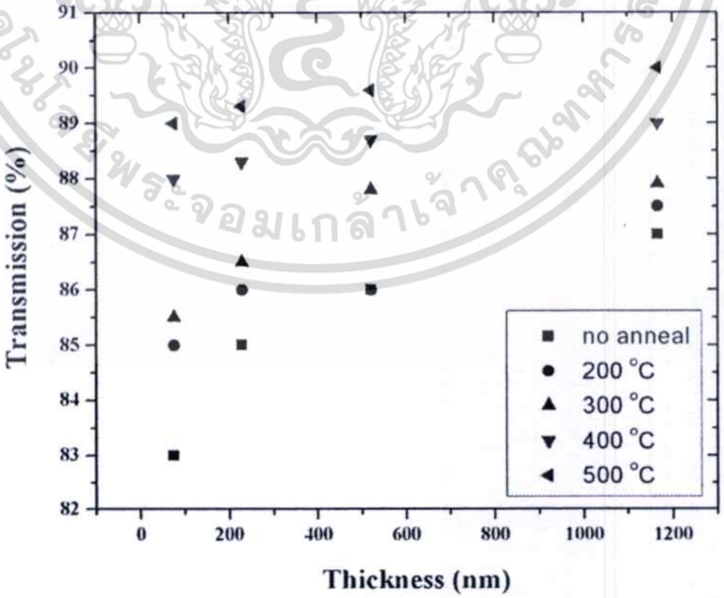
โครงสร้างของฟิล์มแย่ลงคือ เกิดรอยแตก อย่างประปรายบนฟิล์มบนพื้นผิวฟิล์มบาง ฟิล์มบางที่แตกเหล่านี้ บางจุดเนื้อฟิล์มร่อนและหลุดออกจากฐานรอง



รูปที่ 4.12 รอบแตกที่พบหลังจากแอนนีลที่อุณหภูมิ (ก) 400 °C และ (ข) 500 °C

ผลที่เกิดนี้ส่งผลให้ เมื่อนำไปสร้างเป็นขั้วของไดโอด คุณสมบัติของไดโอดอาจจะลดประสิทธิภาพลงมากกว่าเพิ่มประสิทธิภาพ ฉะนั้นเมื่อดูจากผลการทดลอง สามารถวิเคราะห์เบื้องต้นว่าถึงแม้การใช้อุณหภูมิสูงจะทำให้ได้รูปผลึกที่สมบูรณ์กว่าอุณหภูมิต่ำๆ แต่ก็ส่งผลเสียหลายอย่างต่อฟิล์มเช่นกัน

4.1.2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง



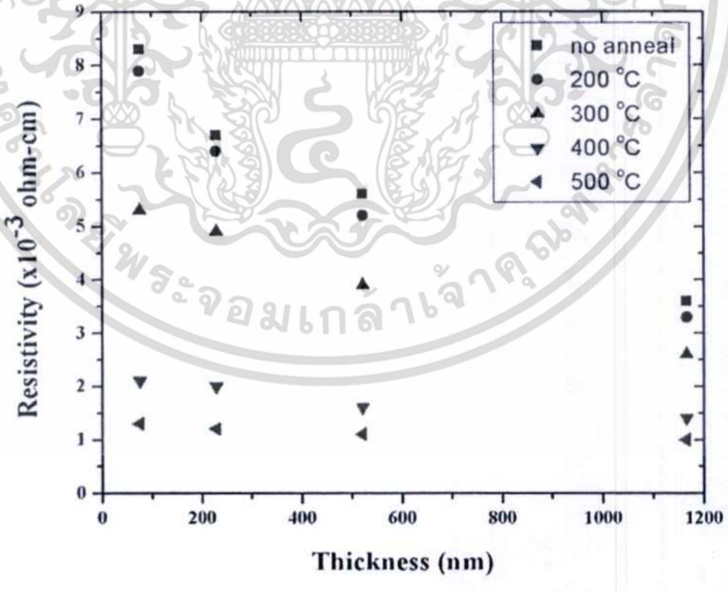
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงแนวโน้มการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีลในบรรยากาศที่อุณหภูมิในการแอนนีลต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าการส่องผ่านแสงมีค่าเพิ่มขึ้นมากกว่าก่อนแอนนีล เป็นผลเนื่องจากเกรนมีความสมบูรณ์ขึ้นทำให้การกระเจิงแสงที่ระยะขอบเกรนมีค่าน้อยลง แสงส่วนใหญ่สามารถทะลุผ่านฟิล์มบางลงไปได้มากขึ้น เมื่อสังเกตที่อุณหภูมิ 500 °C การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆที่จุดเดียวกัน เมื่อนำค่าการส่องผ่านแสงมาคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) มีค่าเปลี่ยนแปลงแต่ไม่มากนักมีค่าประมาณ 3.7 eV [41]

4.1.2.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

จากรูป 4.14 จะเห็นว่าแนวโน้มมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิในการแอนนีลเพิ่มขึ้น เป็นผลจากการจัดเรียงตัวของผลึกที่มีความสมบูรณ์ขึ้น ทำให้พาหะมีความคล่องตัวมาก เมื่อสภาพคล่องตัวของพาหะมีค่าสูงจะทำให้เกิดกระแสมากขึ้น ซึ่งในทางตรงกันข้ามนั้นค่าสภาพต้านทานจะมีค่าลดลง จากกราฟค่าสภาพต้านทานจะเห็นว่าที่อุณหภูมิในการแอนนีล 200 °C สภาพต้านทานไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าก่อนแอนนีลและเมื่ออุณหภูมิในการแอนนีลเพิ่มขึ้นสภาพต้านทานจะมีค่าลดลงตามลำดับ โดยสภาพต้านทานที่น้อยสุดมีค่าประมาณ 1×10^{-3} A ที่อุณหภูมิในการแอนนีล 500 °C และความหนาของฟิล์มบาง 1,166 nm [42]

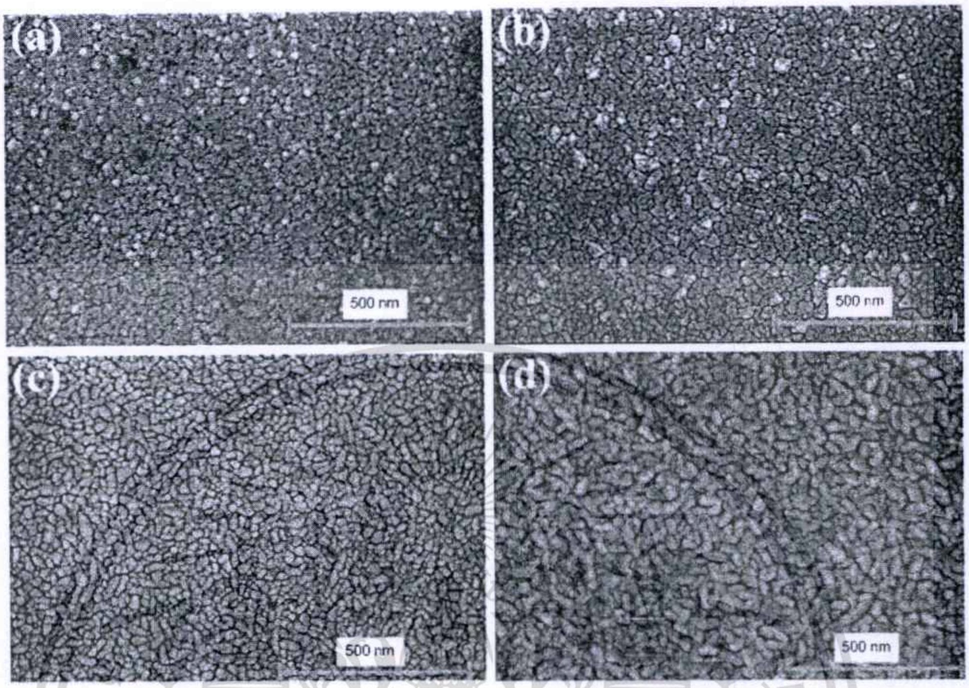


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังจากแอนนีลในบรรยากาศที่อุณหภูมิในการแอนนีลต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 ฟิล์มบางแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน

4.1.3.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง



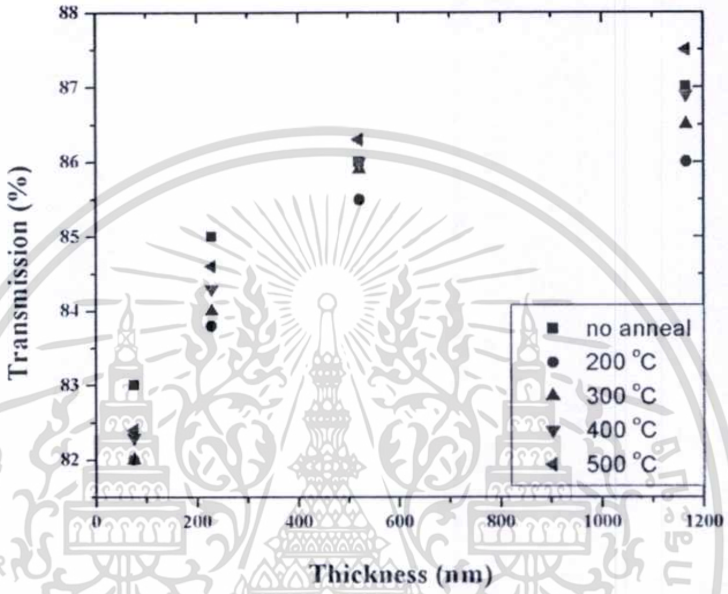
รูปที่ 4.15 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm แอนนีลใน บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิ (a) 200 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C และ (d) 500 °C

การจัดเรียงตัวของผลึกเมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน แสดงจากรูปที่ 4.15 (a) แอนนีลที่อุณหภูมิ 200 °C จัดเรียงตัวคนละทิศละทาง ผลึกบางตำแหน่งมีขนาดเล็กและใหญ่กระจายอย่างประปรายทั่วทั้งแผ่น มีความสม่ำเสมอน้อย 4.15 (b) แอนนีลที่อุณหภูมิ 300 °C ผลึกเริ่มเคลื่อนที่เข้าจับกลุ่มและรวมเป็นผืนติดกัน สังเกตได้จากรูป เสมือนเป็นจุดเริ่มต้นการจัดเรียงตัวใหม่ของผลึกที่ทำให้มีความสมบูรณ์ของฟิล์มดียิ่งขึ้น [43] 4.15 (c) แอนนีลที่อุณหภูมิ 400 °C สังเกตที่ผลึก จะเริ่มจัดเรียงตัวใหม่ดูได้จากลักษณะของเกรนที่มีความสม่ำเสมอ ความราบเรียบดีกว่าเดิมและมีความหนาแน่นสูงกว่าฟิล์มที่แอนนีลในอุณหภูมิที่ผ่านมา ความหนาแน่นที่สูงขึ้นนี้เกิดจากการที่ผลึกจับตัวกันดีขึ้น และ4.15 (d) แอนนีลที่อุณหภูมิ 500 °C ฟิล์มมีความสมบูรณ์ดีกว่าการแอนนีลที่อุณหภูมิต่างๆ จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางจะเห็นลำดับการเปลี่ยนแปลงของฟิล์ม เริ่มต้นจากฟิล์มที่มีการจัดเรียงตัวไม่สมบูรณ์ เมื่ออุณหภูมิเริ่มสูงขึ้นผลึกเริ่มจับตัวกันหนาแน่นมากขึ้น หลังจากนั้นมีการจัดเรียงตัวของผลึกใหม่ การจัดเรียงตัวใหม่นี้ทำให้ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สม่ำเสมอของพื้นผิวจะดีขึ้นและขนาดเกรนมีความสม่ำเสมอ ซึ่งแตกต่างกับก่อนแอนนีลผลึกมีขนาดเล็กใหญ่กระจายประปราย บางตำแหน่งมีความราบเรียบค่อนข้างต่ำ และฟิล์มบางที่ความหนาต่างๆ มีแนวโน้มไปในทิศทางเช่นเดียวกับที่ความหนา 229 nm [44]

4.1.3.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง

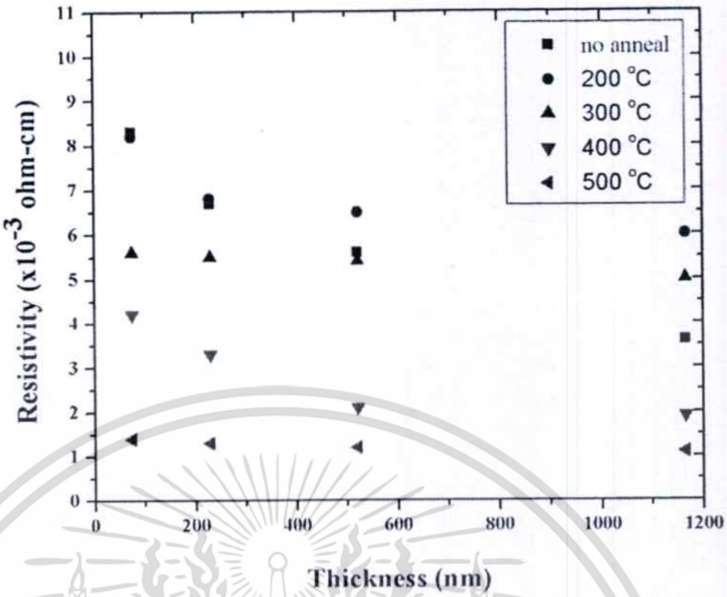


รูปที่ 4.16 กราฟแนวโน้มการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน

ลักษณะพื้นผิวของฟิล์มบางหลังแอนนีลมีคุณภาพดีขึ้น และจากรูปที่ 4.16 จะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้แอนนีลสูงขึ้นการส่องผ่านแสงจะมากขึ้นตามลำดับเนื่องจากผลึกมีความสมบูรณ์ทำให้แสงสามารถส่องผ่านดีขึ้นกว่าเดิม จากรูปที่ 4.16 นี้เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลเปรียบเทียบระหว่างอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีลว่าที่อุณหภูมิใดจะมีการส่องผ่านแสงสูง แต่เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบกับฟิล์มบางที่ไม่ได้ทำการแอนนีลจะเห็นว่าการส่องผ่านแสงมีค่าต่ำลง เนื่องจากเมื่อนำฟิล์มมาแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจน พันธะของฟิล์มจะมีออกซิเจนเข้าไปจับพันธะกับ Sn กลายเป็น O-Sn ส่งผลให้ช่องว่างแถบพลังงานแคบลง ผลกระทบจากช่องว่างแถบพลังงานที่ลดลงนี้ [45-47] ส่งผลให้แสงสามารถส่องผ่านได้น้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการส่องผ่านแสงฟิล์มเริ่มต้นก่อนแอนนีล แต่ผลของผลึกที่สมบูรณ์ก็ยังมีผลต่อการส่องผ่านด้วยเช่นกัน โดยฟิล์มที่แอนนีล 400 °C และ 500 °C ที่ความหนา 1,166 nm การส่องผ่านแสงมีค่าสูงกว่าก่อนแอนนีล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังแอนนีลในก๊าซออกซิเจน

จากรูปที่ 4.17 คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางหลังแอนนีลในบรรยากาศออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีลนั้นจะเห็นว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสภาพต้านทาน ไฟฟ้าของฟิล์มมีค่าลดต่ำลง และเมื่อความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้นสภาพต้านทานก็ลดลงเช่นกัน การลดลงของสภาพต้านทานมีแนวโน้มการลดลงเช่นเดียวกับแอนนีลในบรรยากาศ ดังนั้นกล่าวได้ว่าการแอนนีลทำให้ผลึกมีความสมบูรณ์และคุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางดีขึ้น [48-49]

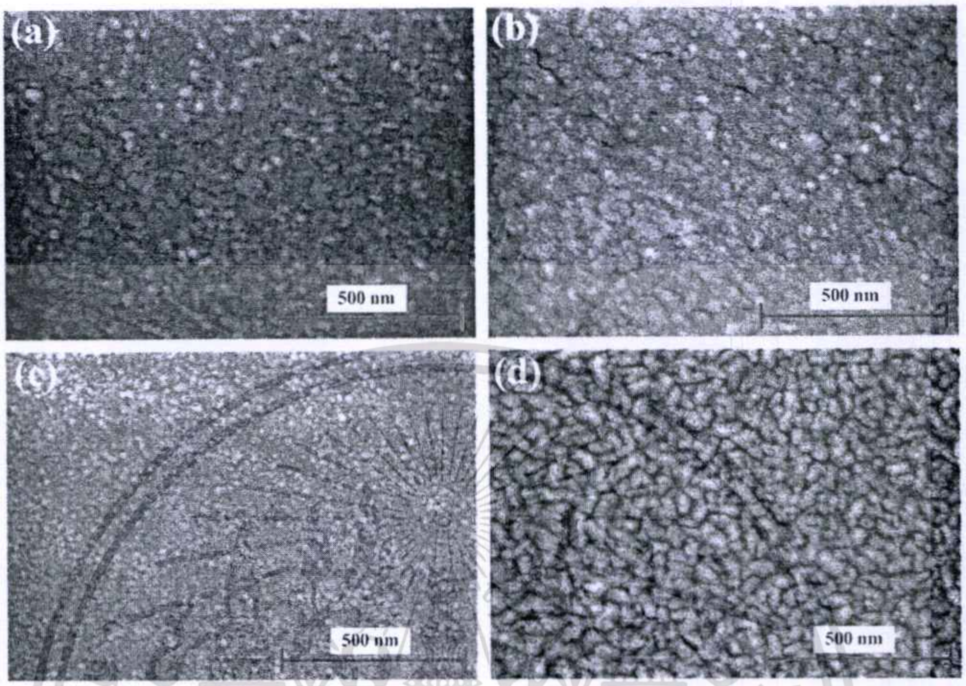
4.1.4 ฟิล์มบางแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

4.1.4.1 การศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง

ลักษณะการเปลี่ยนแปลงรูปผลึกที่แอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไน โตรเจนจะคล้ายๆกับการเปลี่ยนแปลงที่แอนนีลในบรรยากาศและก๊าซออกซิเจนที่ผ่านมา แสดงดังรูปที่ 4.18 แต่ลักษณะของผลึกเท่านั้นที่มีความแตกต่างอย่างชัดเจน ผลึกที่ได้หลังการแอนนีลนี้มีลักษณะเรียงต่อกันเป็นแนวยาว ความหนาแน่นมีค่าเพิ่มจากเดิม (ก่อนแอนนีล) และในที่นี้การเปลี่ยนแปลงก๊าซที่ใช้ในการแอนนีลโดยทำในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนมีผลทำให้ผลึกมีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น [50-51]

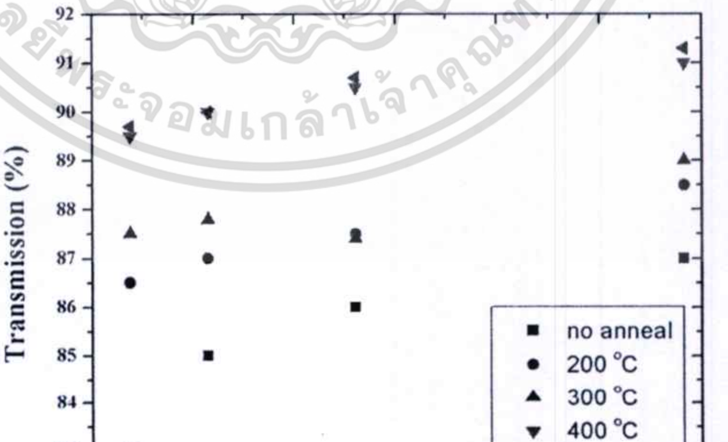
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และลักษณะของฟิล์มบางที่ความหนาต่างๆ ก็มีลักษณะการเปลี่ยนแปลงของผลึกเป็นในทิศทางเดียวกับตัวอย่างฟิล์มที่ แต่อาจจะแตกต่างกันในเรื่องของความสมบูรณ์ของผลึก



รูปที่ 4.18 ลักษณะพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm แอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ (a) 200 °C, (b) 300 °C, (c) 400 °C และ (d) 500 °C

4.1.4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสง



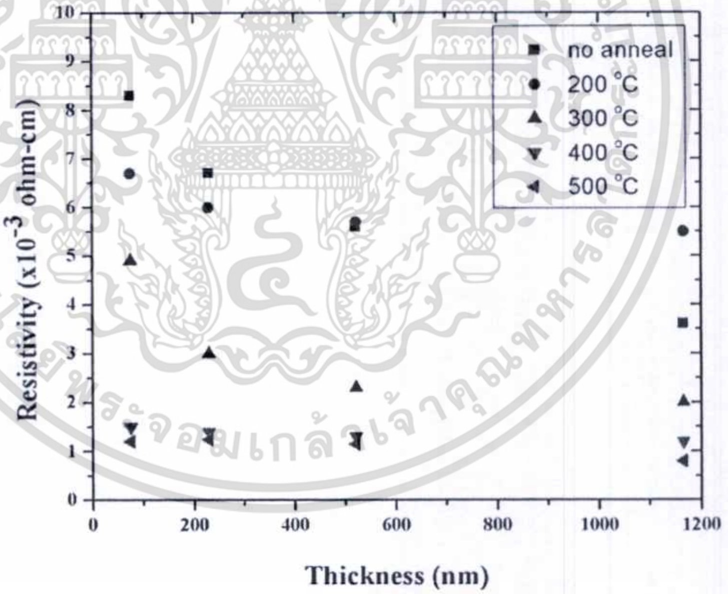
รูปที่ 4.19 กราฟแนวโน้มการส่องผ่านแสงหลังจากแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แนวโน้มการส่องผ่านฟิล์มแสงของบางหลังการแอนนีล ค่าการส่องผ่านมีแนวโน้มสูงขึ้นและการเพิ่มขึ้นของการส่องผ่านมีลักษณะคล้ายกับการแอนนีลในบรรยากาศ จากรูปที่ 4.19 ค่าการส่องผ่านแสงมีค่าสูงขึ้นกว่าก่อนแอนนีล เมื่อเปรียบเทียบฟิล์มที่ความหนาเดียวกันแต่เปลี่ยนอุณหภูมิที่ใช้แอนนีล พบว่าการการส่องผ่านที่เพิ่มขึ้นมีทิศทางเดียวกับอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีล โดยที่อุณหภูมิ 500 °C การส่องผ่านแสงของฟิล์มบางมีค่าสูงที่สุดเมื่อเทียบกับอุณหภูมิอื่นๆที่จุดเดียวกัน แต่เมื่อเปรียบเทียบที่อุณหภูมิเดียวกันฟิล์มที่ความหนา 1,166 nm มีค่าการส่องผ่านแสงสูงสุด ประมาณ 91.5 % [52]

4.1.4.3 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

รูปที่ 4.20 แสดงแนวโน้มการลดลงของสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง เมื่อพิจารณาที่ความหนาเท่ากัน เมื่อใช้อุณหภูมิแอนนีลสูงๆ สภาพต้านทานมีค่าลดลงและที่อุณหภูมิในการแอนนีลที่ 500 °C ฟิล์มบางมีสภาพต้านทานต่ำที่สุด

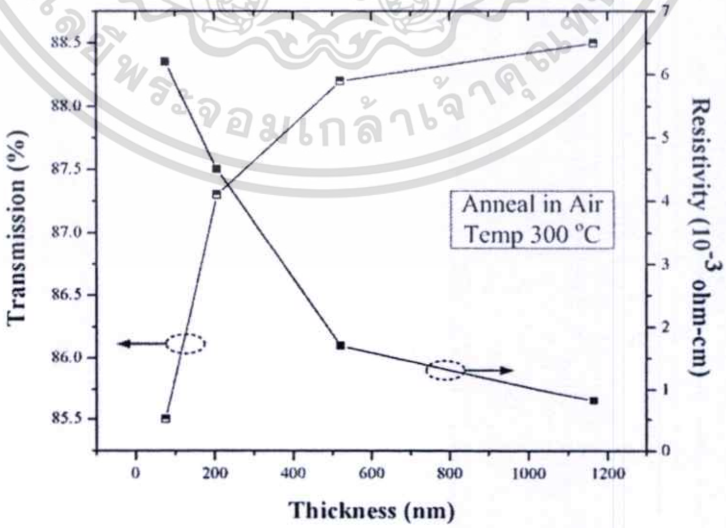


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงแนวโน้มสภาพต้านทานแผ่นหลังแอนนีลในก๊าซไนโตรเจน

จากการทดลองตอนที่ 1 ศึกษาสมบัติฟิล์มบางก่อนและหลังแอนนีล โดยพิจารณาคุณสมบัติของฟิล์ม ได้แก่ คุณสมบัติทางโครงสร้าง, คุณสมบัติด้านแสง และคุณสมบัติทางไฟฟ้า ก่อนทำการแอนนีลฟิล์มบางมีความสมบูรณ์ของผลึกค่อนข้างต่ำแต่เมื่อแอนนีลในบรรยากาศต่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกมีความสมบูรณ์มากขึ้น การส่องผ่านแสงมีแนวโน้มดีขึ้นและค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลง แต่เมื่อแอนนีลในอุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C พื้นผิวฟิล์มมีรอยแยกและแตกลึกเข้าไปในเนื้อของฟิล์ม ซึ่งจากผลนี้ทำให้ที่อุณหภูมิ 400 °C และ 500 °C ไม่เหมาะสมที่จะนำมาแอนนีลฟิล์มบางเพื่อใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง และเมื่อเปรียบเทียบอุณหภูมิ 200 °C และ 300 °C ที่อุณหภูมิ 300 °C มีค่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทานดีกว่า ฉะนั้นจึงเป็นอุณหภูมิที่มีความเหมาะสมสำหรับนำมาแอนนีลฟิล์ม การหาค่าความหนาของฟิล์มบางที่เหมาะสมสามารถหาได้จากรูปที่ 4.21 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทาน ที่ความหนาฟิล์มต่างๆ ความหนาฟิล์มบางที่เหมาะสม สามารถดูได้จากจุดตัดระหว่างเส้นกราฟการส่องผ่านแสงและเส้นกราฟสภาพต้านทาน และจุดที่เหมาะสมเมื่อแอนนีลในอากาศคือ 230 nm และฟิล์มบางที่แอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนและก๊าซไนโตรเจนมีค่าประมาณ 230 nm เช่นเดียวกัน จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทาน ของฟิล์มที่แอนนีลทั้ง 3 บรรยากาศ ฟิล์มบางที่ความหนา 230 nm มีความเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงต่อไป ถึงแม้ว่าที่ความหนาฟิล์ม 1,166 nm จะมีทั้งค่าการส่องผ่านแสงสูงและสภาพต้านทานต่ำ แต่ใช้เวลาในการเตรียมฟิล์มบางมากกว่าที่ความหนา 230 nm ถึง 3 เท่า แต่ค่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทานมีความแตกต่างไม่มาก และเมื่อได้เงื่อนไขในการเตรียมฟิล์มบาง โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนีล คือ 300 °C และความหนาฟิล์มบางที่ 230 nm จากตารางที่ 4.3 เป็นตารางเปรียบเทียบค่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางที่ไม่แอนนีลและแอนนีลในบรรยากาศต่างๆ



รูปที่ 4.21 การหาค่าความหนาที่เหมาะสมของฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าการแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนมีค่าการส่องผ่านสูงและมีค่าสภาพต้านทานต่ำกว่าฟิล์มที่ไม่ได้แอนนีลและแอนนีลในบรรยากาศต่างๆ

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบค่าการส่องผ่านแสงและสภาพต้านทานไฟฟ้า

	ไม่แอนนีล	**อากาศ**	**ก๊าซออกซิเจน**	**ก๊าซไนโตรเจน**
การส่องผ่านแสง (%)	85	86.5	83.5	88
สภาพต้านทาน ($x10^{-3}$ Ω-cm)	6.7	4.8	5.2	2.8

เมื่อทำการศึกษาฟิล์มบางก่อนและหลังทำการแอนนีลจะได้เงื่อนไขในการสร้างฟิล์มบางดังแสดงต่อไปนี้

- ความหนาฟิล์มบางที่เหมาะสม 230 nm
- การแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน
- อุณหภูมิในการแอนนีล 300 °C
- เวลาในการแอนนีล 15 นาที

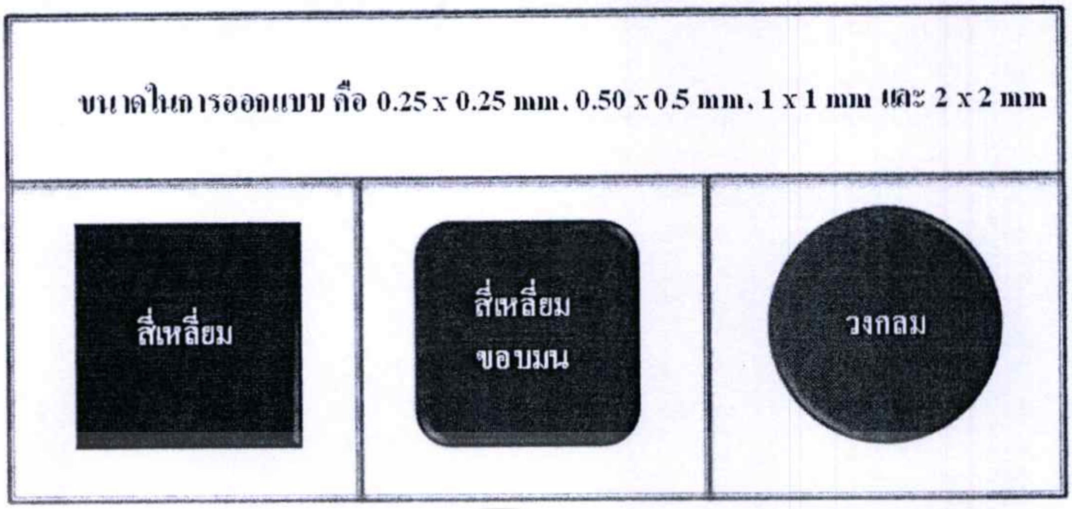
4.2 สร้างตัวตรวจวัดแสงโดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส

การทดลองตอนที่ 2 นี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกศึกษาขนาดและรูปร่างสำหรับนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง และนำฟิล์มบางไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงและศึกษาคุณสมบัติ ได้แก่ คุณสมบัติกระแส-แรงดัน, คุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน และผลการตอบสนองทางความถี่ เป็นต้น

4.2.1 ส่วนที่ 1 ออกแบบและหาขนาด รูปร่างของพื้นที่รับแสงที่เหมาะสม

ลักษณะรูปร่างในกระบวนการสร้างมีด้วยกันหลายรูปแบบ เช่น สี่เหลี่ยม สี่เหลี่ยมมุมโค้ง และวงกลม งานวิจัยนี้จะศึกษารูปร่างที่มีความเหมาะสมโดยใช้คุณสมบัติกระแส-แรงดันมาวิเคราะห์และในแต่ละรูปร่างจะมีพื้นที่ที่แตกต่างกัน 4 แบบ คือ 0.0625 mm^2, 0.25 mm^2, 1 mm^2 และ 4 mm^2 แสดงดังรูปที่ 4.22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.22 ลักษณะรูปร่างและขนาดพื้นที่รับแสงที่ทำการศึกษา

ในกระบวนนี้ทำการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองซิลิคอน การวิเคราะห์ผลเพื่อหากระแสรั่วมืด (I_0) ของฟิล์มบางในแต่ละพื้นที่และรูปร่างที่แตกต่างกัน เพื่อที่จะทำการเลือกลักษณะขนาดและรูปร่างที่เหมาะสม ก่อนจะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสต่อไป โดยขนาดและรูปร่างที่มีกระแสมืดต่ำที่สุด ผลการทดลองแสดงต่อไปนี้

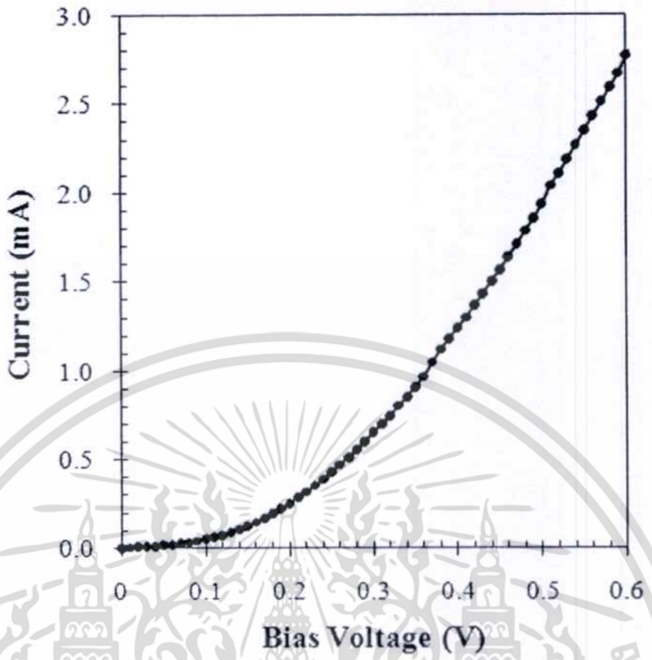
ตารางที่ 4.4 เปรียบเทียบกระแสมืดของฟิล์มบางที่มีขนาดและรูปร่างต่างๆ

ขนาดพื้นที่รับแสง	กระแสมืด (μA)		
(mm^2)	สี่เหลี่ยม	สี่เหลี่ยมขอบมน	วงกลม
0.0625	4.62	4.52	4.36
0.25	17.9	17.8	16.8
1	70.3	69.6	66.9
4	278.2	274.4	265.2

จากตารางเมื่อพิจารณาที่รูปร่างแบบเดียวกันแต่พื้นที่รับแสงแตกต่างกัน พบว่ากระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดของพื้นที่รับแสงมากขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบกระแสมืด ซึ่งพิจารณาขนาดของพื้นที่รับแสงเท่ากันแต่รูปร่างแตกต่างกัน รูปร่างวงกลมมีกระแสมืดต่ำกว่ารูปร่างอื่นๆ จากตารางที่ 4.4 นี้ เมื่อพิจารณาโดยใช้กระแสมืดเปรียบเทียบระหว่างพื้นที่รับแสงและขนาดที่แตกต่างกัน พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขนาดพื้นที่รับแสง 0.0625 mm^2 และรูปร่างวงกลมมีค่ากระแสมืดต่ำที่สุดจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงต่อไป



รูปที่ 4.23 ลักษณะเฉพาะกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์

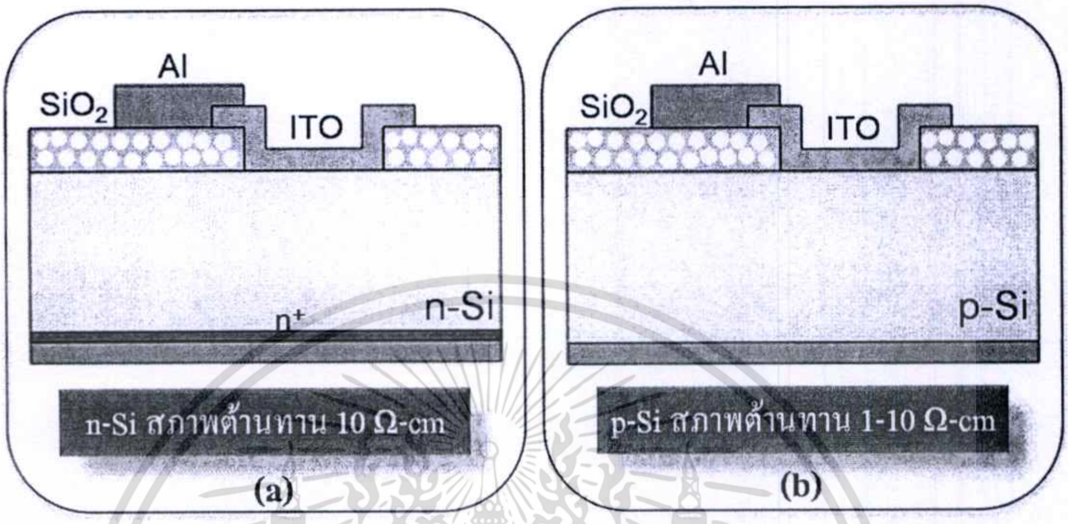
จากรูปที่ 4.23 เมื่อนำผลที่ได้จากการวัดลักษณะกระแส-แรงดันมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเป็นแกนตั้งและแรงดันเป็นแกนนอน พบว่าเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์โดยมีแรงดันภายใน (V_{bi}) ที่ 0.2-0.4 V ซึ่งมีค่าที่สอดคล้องกับคุณสมบัติของช็อตกีย์ [53]

4.2.2 ส่วนที่ 2 สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสง

จากการทดลองขั้นตอนที่ผ่านมา เริ่มต้นที่การศึกษาและวิเคราะห์ หาเงื่อนไขในการสร้างฟิล์มบางที่เหมาะสมก่อนที่จะนำไปสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงต่อไป การสร้างตัวตรวจวัดแสงโดยนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส จะสร้างด้วยกัน 2 โครงสร้างคือ ITO/n-Si ความต้านทานแผ่น (10 Ω-cm) และ ITO/p-Si ความต้านทานแผ่น (1-10 Ω-cm) ซึ่งไดโอดที่สร้างเป็นชนิดแนวตั้ง แสดงดังรูปที่ 4.24 หลังจากกระบวนการสร้างไดโอดทั้ง 2 โครงสร้าง จึงนำอุปกรณ์ไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของรอยต่อ ได้แก่ แรงดันภายใน (V_{bi}),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

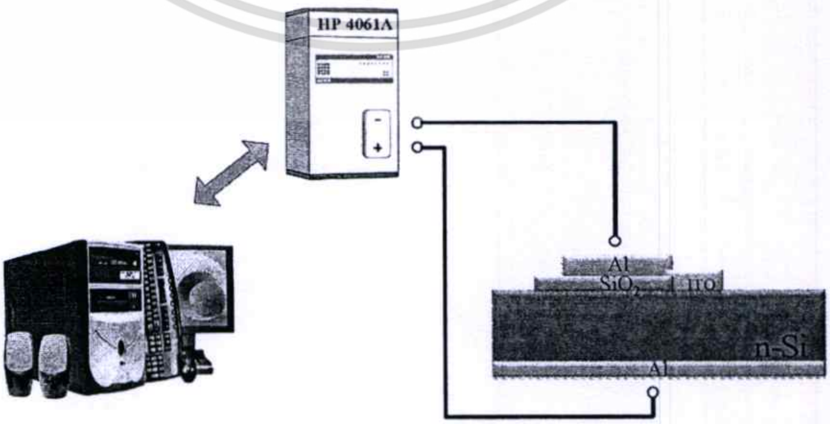
กำแพงศักย์ช็อตกีย์ และกระแสมืด เป็นต้น แล้ววิเคราะห์ค่าที่ได้เพื่อเป็นแนวทางปรับปรุงประสิทธิภาพและนำไปสร้างต่อไป จากนั้นทำการทดสอบลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน และผลการตอบสนองทางความถี่ ซึ่งผลการทดลองทั้งหมดจะนำเสนอต่อไปนี้



รูปที่ 4.24 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่จะทำการสร้างในงานวิจัยนี้ (a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si

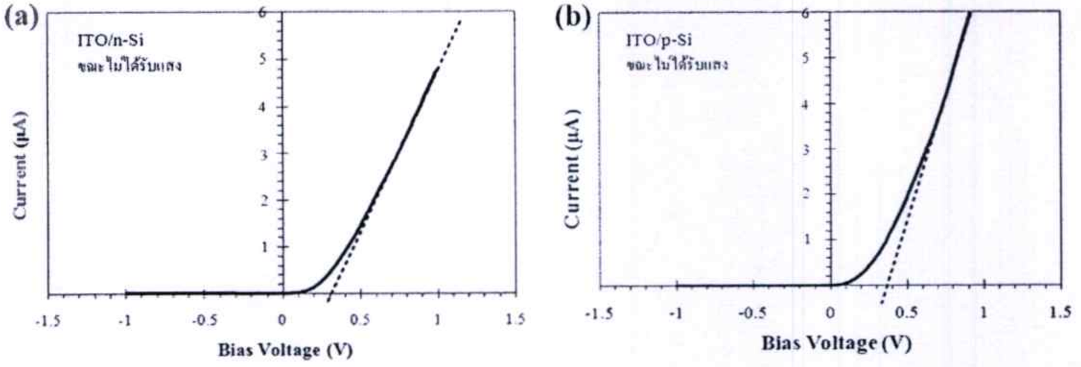
4.2.2.1 การทดสอบลักษณะสมบัติของรอยสัมผัสช็อตกีย์

จากการศึกษาลักษณะของรอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si โดยใช้ระบบเครื่องมือวัดแสดงดังรูปที่ 4.25 ซึ่งผลการทดลองพบว่ารอยสัมผัสทั้ง 2 เป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ แสดงดังรูปที่ 4.26 รอยสัมผัส ITO/n-Si มีแรงดันภายในประมาณ 0.3 V และรอยสัมผัส ITO/p-Si มีแรงดันภายในประมาณ 0.35V กระแสมืดมีค่า 5.03 μA (ITO/n-Si) และ 5.38 μA (ITO/p-Si)



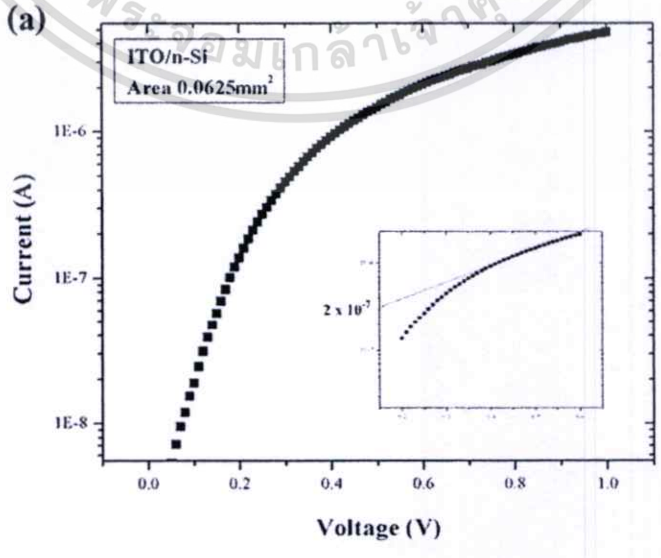
รูปที่ 4.25 ระบบเครื่องมือวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของโฟโตดีเทคเตอร์ ขณะไม่ได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

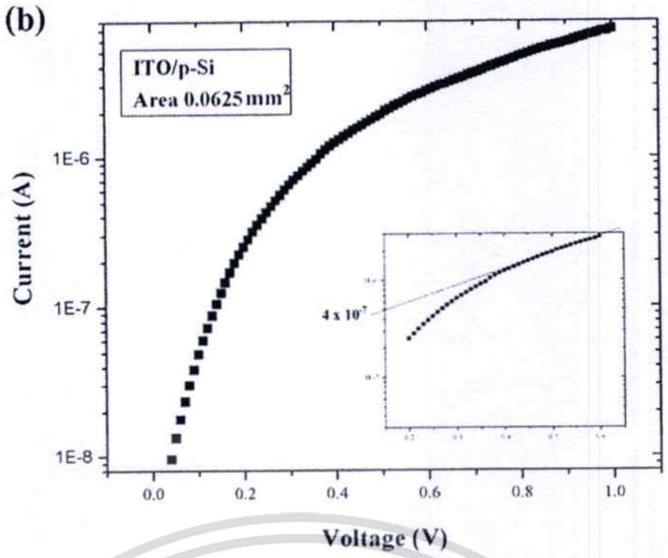


รูปที่ 4.26 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si

จากผลการทดสอบค่ากระแส-แรงดัน สามารถคำนวณความสูงของกำแพงศักย์ช็อตกีย์ได้ แสดงดังรูปที่ 4.27 จากรูปแสดงการหาค่าความสูงของกำแพงศักย์ช็อตกีย์ของรอยสัมผัน ITO/n-Si ($\emptyset_{bn}$) และ ITO/p-Si ($\emptyset_{bp}$) โดยจากสมการที่ 4.1 จะเห็นว่าค่าความสูงของกำแพงศักย์มีผลต่อกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับของรอยสัมผัส ITO/n-Si และ ITO/p-Si มีค่า 3.2 μA และ6.4 μA ตามลำดับ สามารถคำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์ ดังนี้ ($\emptyset_{bn}$) = 0.74 V และ ($\emptyset_{bp}$) = 0.73 V จากการคำนวณหาค่าความสูงกำแพงศักย์นี้จะเห็นว่าค่าความสูงของรอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si เป็นรอยสัมผัสที่มีค่า $q\emptyset_M > q\emptyset_S$ ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ แต่พบว่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสระหว่าง ITO/p-Si มีค่า 0.72 V ซึ่งควรจะมีค่า 0.38 V ($\emptyset_{bn}+\emptyset_{bp}= E_g(si)$) เกิดจากผลของ surface state ซึ่งในกระบวนการสปัตเตอร์ [54-56] โดยจะเกิดชั้นSiO_2 ขึ้นอยู่ระหว่างชั้นของ ITO และ ซิลิคอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 การหากระแสมืด (I0) ของรอยสัมผัส (a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si

$$\varnothing_{bn} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad (4.1)$$

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์มันน์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน

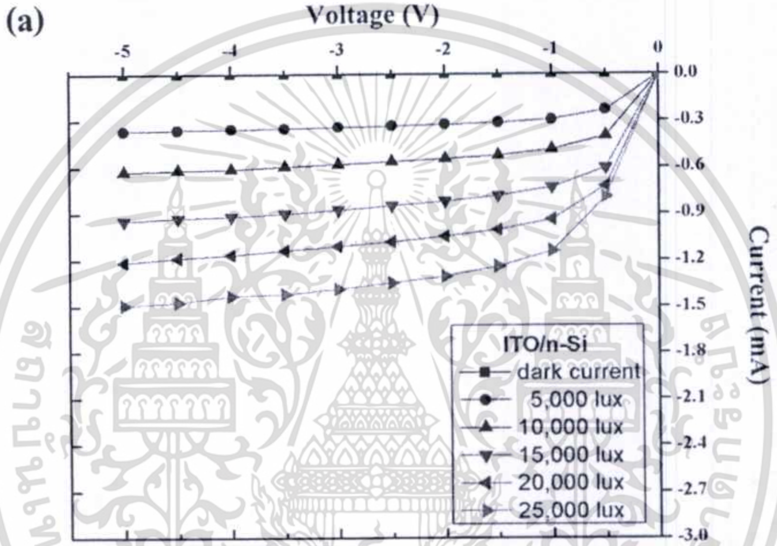
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

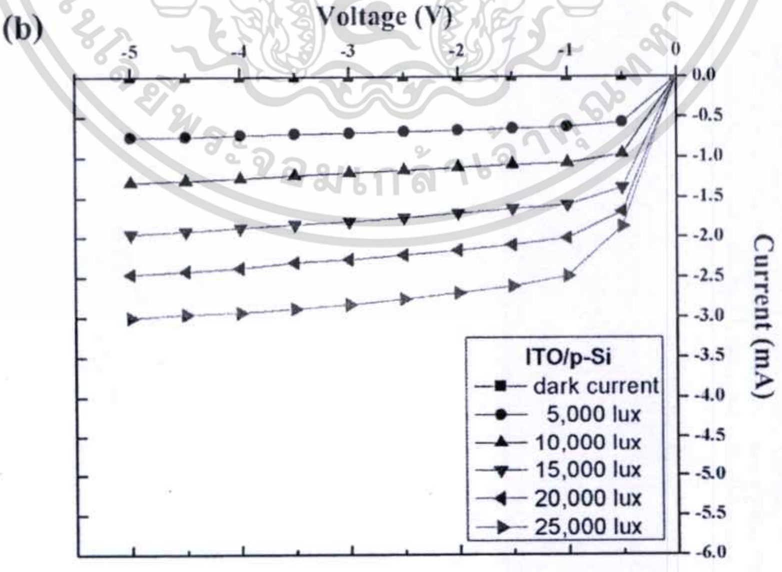
4.2.2.2 การทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

เมื่อการศึกษาลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสง สามารถคำนวณหาค่าแรงดันภายในและกำแพงศักย์ช็อตกีย์ ในการทดลองนี้จะทำการฉายแสงไปยังตัวตรวจวัดแสง โดยแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนของบริษัท Stocker & Yale รุ่น 20 series กำลัง 150 W ที่ความเข้มแสงต่างๆ ได้แก่ 5,000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux ฉายลงบนตัวตรวจวัดแสงทั้ง 2 โครงสร้าง ที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นกระแสแสงจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าทั้ง 2 โครงสร้าง แสดงดังรูปที่ 4.28 ในโครงสร้าง ITO/n-Si กระแสแสงมีค่ามากสุดประมาณ 1.5 mA ที่ความเข้มแสง 25,000 lux, แรงดัน 5V และ โครงสร้าง ITO/p-Si กระแสแสงมีค่ามากสุดประมาณ 3 mA ที่ความเข้มแสง 25,000 lux, แรงดัน 5V เช่นเดียวกัน ปริมาณกระแสแสงที่วัดได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/p-Si มีปริมาณมากกว่า ITO/n-Si เนื่องมาจาก กลไกการเกิดกระแสแสงในตัวตรวจวัดแสงที่ฐานรองเป็นชนิดพีกระแสแสงเกิดจากอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ไปยังขั้วโลหะที่มีชนิดของศักย์ไฟฟ้าเป็นบวก (Anode) ส่วนในตัวตรวจวัดแสงที่ชนิดฐานรองเป็นชนิดเอ็นกระแสที่เกิดขึ้นเกิดจากโฮลที่เป็นพาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ไปยังขั้วโลหะที่มีชนิดของศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ (Cathode) ซึ่งสภาพคล่องของอิเล็กตรอนมีค่ามากกว่าโฮลประมาณ 2 เท่า ทำให้การเกิดกระแสแสงในตัวตรวจวัดแสงที่ฐานรองเป็นชนิดพีสูงกว่าชนิดเอ็น ลักษณะการเพิ่มของกระแสแสงที่แรงดัน 5V แสดงดังรูปที่ 4.29



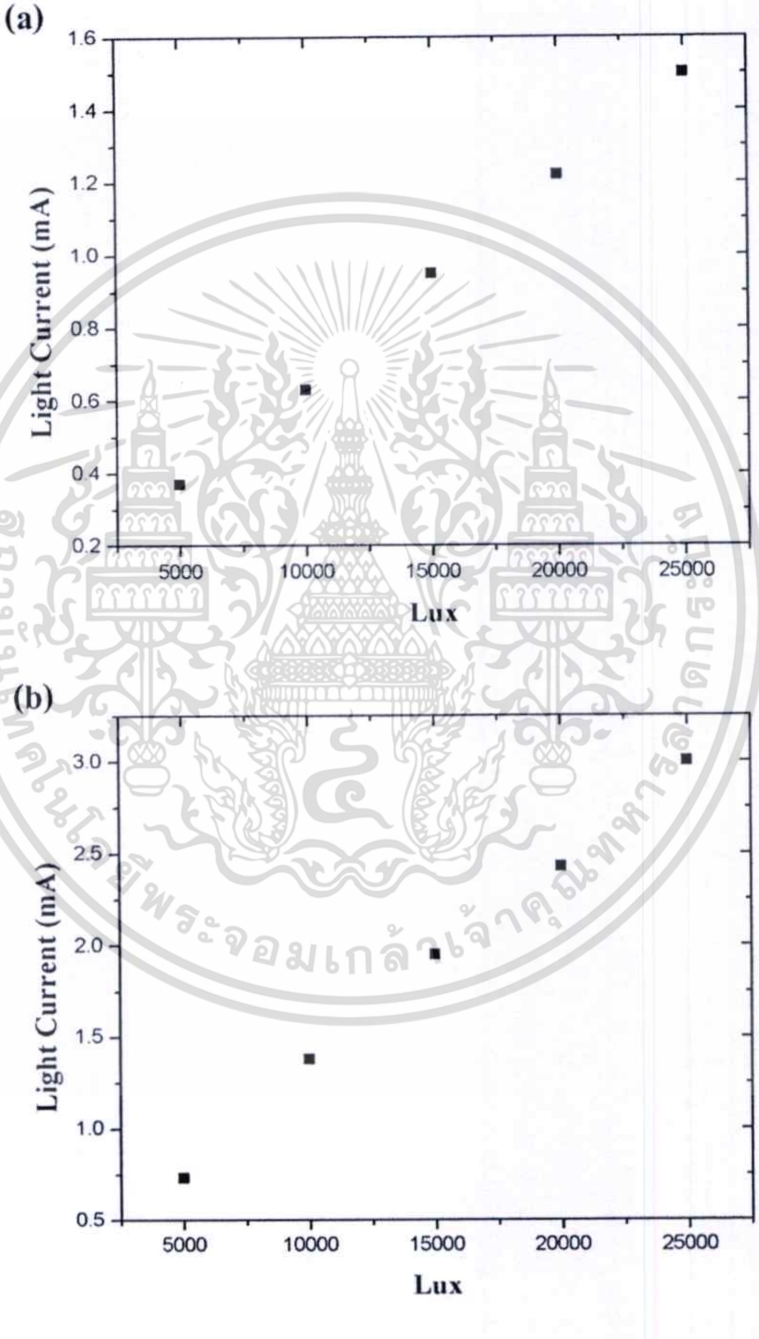


รูปที่ 4.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน โดยความเข้มแสงมีค่าต่างๆ

(a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มขึ้นของกระแสเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น สังเกตจากกราฟ 4.28(a) และ 4.28(b) มีลักษณะการเพิ่มขึ้นเป็นแนวเส้นตรง โดยที่ความเข้มแสงน้อยกระแสแสงที่เกิดขึ้นก็จะมีค่าน้อยและจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อความเข้มแสงสูงขึ้น จากกราฟความสัมพันธ์นี้สามารถที่จะนำไปวิเคราะห์การเกิดกระแสแสงที่ความเข้มต่ำกว่าหรือมากกว่านี้ได้

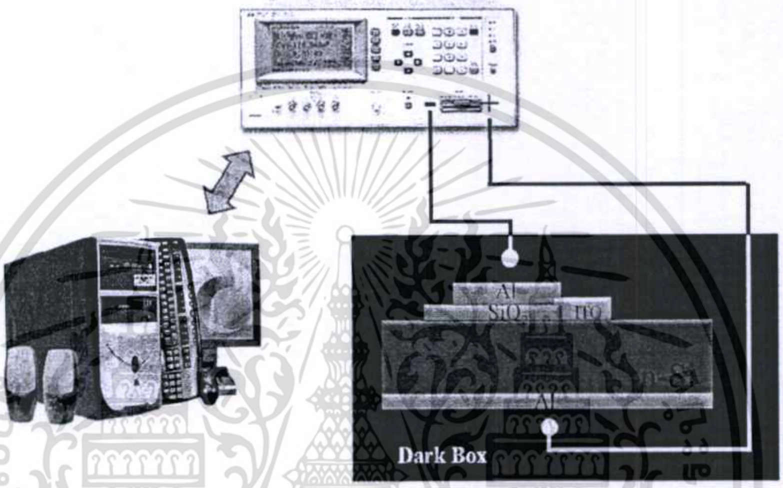


รูปที่ 4.29 กระแสแสงที่ความเข้มแสงต่างๆ (a) ITO/n-Si และ (b) ITO/p-Si

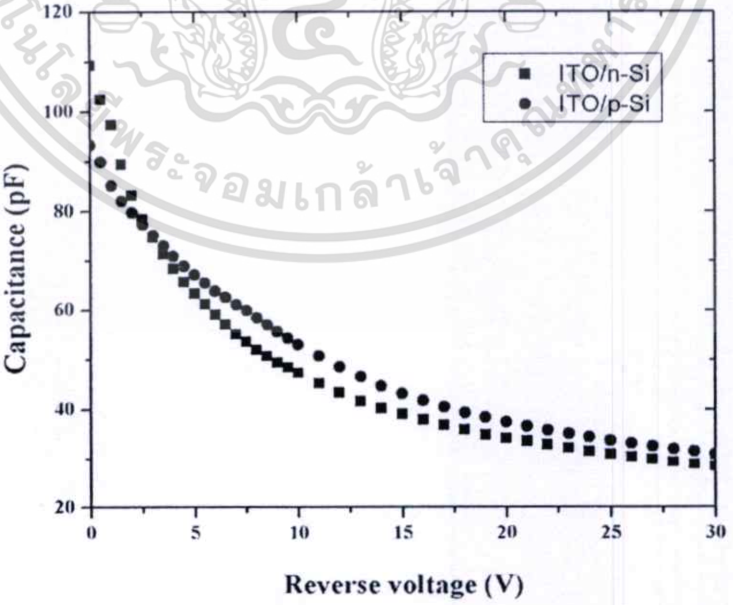
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2.3 การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

การทดสอบลักษณะความจุไฟฟ้าและแรงดัน เพื่อหาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าของไดโอดซึ่งถือว่าเป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่สามารถบ่งบอกถึงความเร็วในการตอบสนองความถี่ของไดโอด โดยระบบการวัดแสดงดังรูปที่ 4.30 เมื่อนำตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si และ ITO/p-Si มาทดสอบลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน ซึ่งลักษณะความจุไฟฟ้าของไดโอดขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ความสมบูรณ์ของรอยสัมผัส, การมีออกไซด์บางแทรกระหว่างชั้นของ ITO และ ซิลิคอน เป็นต้น



รูปที่ 4.30 ระบบเครื่องวัดความจุไฟฟ้า-แรงดัน รุ่น HP4284



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงทั้ง 2 โครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.31 จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัส ITO/n-Si มีค่ามากกว่า ITO/p-Si ความจุไฟฟ้ามีค่า 110 pF และ 95 pF ตามลำดับ ที่แรงดัน 0V เมื่อเพิ่มแรงดันจะทำให้ความจุทางไฟฟ้าลดลง จากสมการ 4.2 ค่าความจุไฟฟ้าแปรผกผันกับความกว้างของบริเวณปลอดภาหะ เมื่อมีการไบอัสย้อนกลับทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดภาหะกว้างขึ้น แสดงดังรูปที่ 4.32

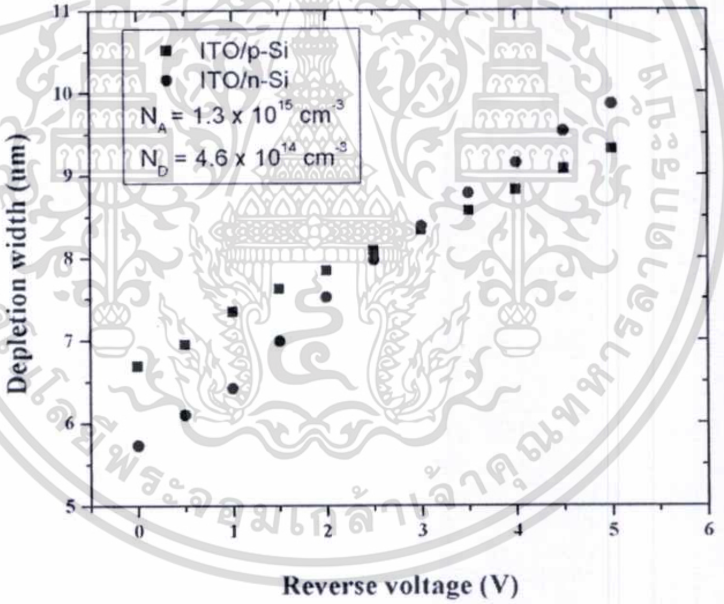
$$C = \frac{A\varepsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_D}{2(V_{bi}+V_A)}} \tag{4.2}$$

ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ

W คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ



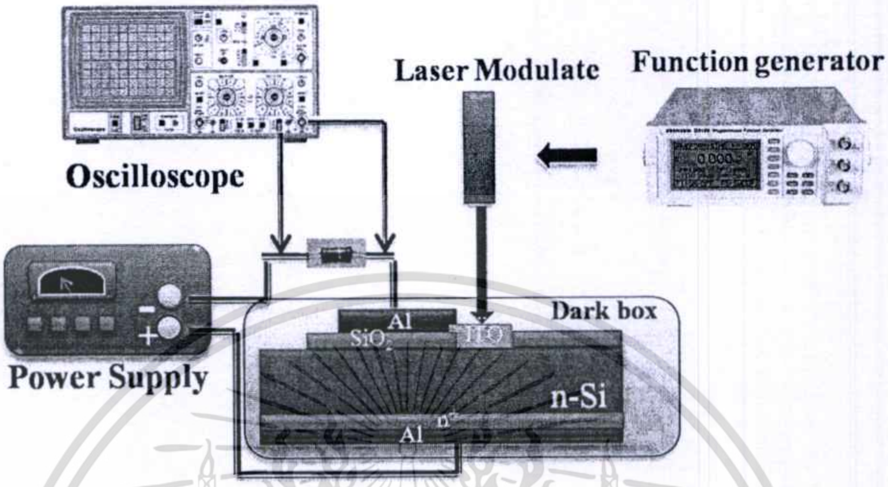
รูปที่ 4.32 ความกว้างของบริเวณปลอดภาหะที่แรงดันต่างๆ

4.2.2.4 การทดลองการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสง

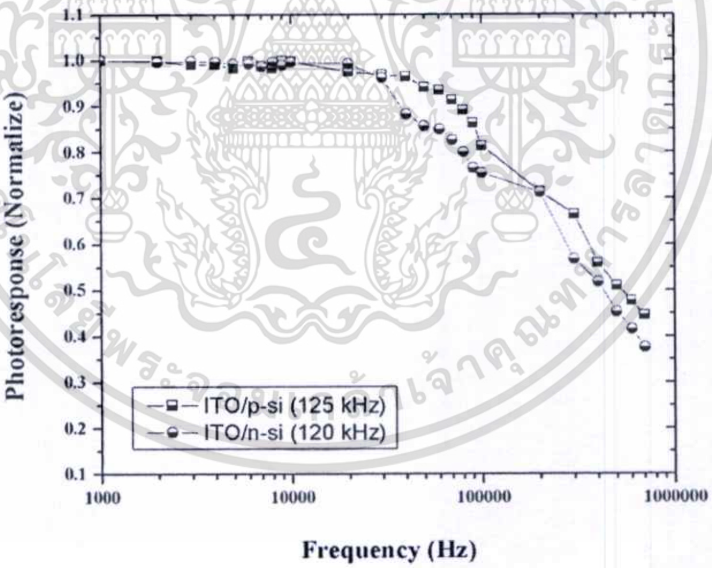
การทดสอบผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงทั้ง 2 โครงสร้าง ชุดเครื่องมือวัดแสงดังรูปที่ 4.33 ซึ่งค่าการตอบสนองทางความถี่เมื่อดูจากสมการพบว่าแปรผกผันกับค่าความจุไฟฟ้า ในการทดลองใช้ช่วงความถี่ 1kHz – 1 MHz ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ITO/p-Si มีค่าการตอบสนองทางความถี่ประมาณ 120 kHz และ 125 kHz จากผลการทดลองนี้ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/p-Si มีการตอบสนองทางความถี่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si เนื่องจากมีค่าความจุไฟฟ้าที่ต่ำกว่า แสดงดังรูปที่ 4.34



รูปที่ 4.33 ชุดเครื่องมือวัดผลการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตดีเทคเตอร์



รูปที่ 4.34 ผลการตอบสนองทางความถี่ของตัวตรวจวัดแสงในช่วง 1kHz – 1 MHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงที่สร้างในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ตัวตรวจวัดแสงส่วนใหญ่ที่สร้างมีทั้งโครงสร้าง MS, MSM และ PIN แม้โครงสร้างจะแตกต่างกันแต่มีสิ่งหนึ่งที่ส่วนใหญ่จะใช้เหมือนกันคือ อลูมิเนียม (Al) นำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้า ด้วยที่อลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีสภาพต้านทานต่ำ หาซื้อง่ายและมีจุดหลอมเหลวต่ำ แต่สิ่งหนึ่งที่เป็นข้อเสียคือ เป็นสารทึบแสง ในการนำมาใช้งานด้านแสง บริเวณด้านใต้ของขั้วไฟฟ้าที่ใช้อลูมิเนียม แสงไม่สามารถทะลุผ่านได้ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นเฉพาะรอบๆขั้วไฟฟ้าเท่านั้น งานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงปัญหาที่เกิดขึ้น จึงนำเสนอการใช้สารโปร่งใสมาใช้แทนอลูมิเนียม โดยสมบัติเด่นของสารโปร่งใส คือ สภาพต้านทานค่อนข้างต่ำประมาณ (10^{-4} Ω-cm) มีความโปร่งใสสูง แสงในย่าน UV-Vis สามารถทะลุผ่านได้ประมาณ 85 % เริ่มต้นของงานวิจัยนี้จะนำสารประกอบโปร่งใส คือ อินเดียมทินออกไซด์(ITO) ถือว่าเป็นสารประกอบโปร่งใสที่นิยมใช้กันมาก ดังนั้นจึงเป็นการง่ายที่จะหาข้อมูลเปรียบเทียบผลการทดลองของเราที่สร้างขึ้นว่ามีผลดีหรือไม่การนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์มาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสแทนที่อลูมิเนียม ดังนั้นจุดประสงค์หลักของงานวิจัยนี้คือ ศึกษาลักษณะสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่เหมาะสมสำหรับสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง โดยใช้เครื่องมือของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และศึกษาว่าสามารถนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์มาใช้งานกับตัวตรวจวัดแสงและศึกษาคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสง ผลการทดลองทั้งหมดสรุปได้ดังนี้

ขั้นตอนแรกศึกษาลักษณะของฟิล์มบางที่เหมาะสมโดยเตรียมฟิล์มที่ความหนาต่างกันคือ 75, 229, 521 และ 1,166 nm ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ คือ คุณสมบัติทางโครงสร้าง คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง เมื่อศึกษาคุณสมบัติทางโครงสร้าง ฟิล์มบางมีความสมบูรณ์ของผลึกค่อนข้างดีโดยที่ความหนา 75 nm ความสมบูรณ์ของผลึกมีค่าค่อนข้างน้อยและเมื่อความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น พบว่าผลึกมีการจับตัวได้ดีขึ้นส่งผลให้คุณภาพของฟิล์มดีขึ้นตามลำดับ เมื่อความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้น ความราบเรียบของฟิล์มบางค่อนข้างดี ส่วนโครงสร้างภายในของฟิล์มบางซึ่งวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ XRD เพื่อหาความสมบูรณ์ของผลึกในโครงสร้าง ระนาบที่มีความเด่นชัดคือ (222), (411),

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(440) และ (622) ระนาบเหล่านี้สามารถบอกว่าเป็นสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ คุณสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มมีสภาพต้านทานประมาณ 10^{-3} Ω-cm และการส่องผ่านแสงมีค่าอยู่ในช่วง 82-89 % โดยฟิล์มที่มีความหนาน้อยที่สุดจะมีค่าการส่องผ่านที่ต่ำไปด้วย เป็นผลเนื่องจากการจัดเรียงตัวของผลึกยังไม่สมบูรณ์ ทำให้แสงที่ตกกระทบเกิดการกระเจิงที่ระยะขอบเกรน แสงบางส่วนถูกดูดกลืน ส่วนฟิล์มบางที่มีความหนามากขึ้นการจัดเรียงตัวของผลึกก็ดีขึ้น เมื่อแสงตกกระทบเกิดการกระเจิงน้อยแสงส่วนใหญ่จึงทะลุผ่าน

เมื่อทำการศึกษาฟิล์มบางในขั้นต้นแล้ว จากนั้นจะนำฟิล์มบางมาปรับปรุงคุณภาพด้วยการแอนนีล การแอนนีลจะทำในบรรยากาศของ อากาศ, ก๊าซออกเจน และ ก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 200, 300, 400 และ 500 °C ผลที่ได้นี้พบว่าคุณสมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางหลังการแอนนีล ลักษณะเกรนมีความแตกต่างจากก่อนแอนนีล โดยเมื่อแอนนีลในอากาศเกรนจัดเรียงอย่างหนาแน่น รูปร่างเกรนมีลักษณะกลมมนสลับกับตัวหนอนกระจายทั่วบนผิวฟิล์ม ซึ่งผลจากรูปร่างเกรนที่มีความแตกต่างกัน เป็นผลจากส่วนผสมของอากาศ ที่มีก๊าซไนโตรเจนและออกซิเจนส่วนใหญ่ทำให้รูปร่างของเกรนที่แอนนีลในอากาศมี 2 ลักษณะ และเมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนเกรนมีลักษณะกลมมนส่วนแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ลักษณะเกรนมีรูปร่างคล้ายกับตัวหนอน เมื่อพิจารณาอุณหภูมิในการแอนนีลพบว่า เมื่อแอนนีลในอุณหภูมิสูงขึ้นการจัดเรียงตัวของเกรนดีขึ้น แต่เมื่อดูพื้นผิวของฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 400 และ 500 °C ฟิล์มบางมีรอยแตกและร่อนหลุดออกจากฐานรองทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาแอนนีลต่อไป และเมื่อวัดคุณสมบัติโดยใช้เครื่อง XRD ความสมบูรณ์ของเกรนเมื่อแอนนีลในก๊าซทั้ง 3 มีแนวโน้มดีขึ้นเหมือนกันและเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นการจัดเรียงตัวของเกรนจะมีความสมบูรณ์ขึ้น เมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางไฟฟ้าฟิล์มบางมีสภาพต้านทานลดลงเมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเนื่องจากเกรนมีความสมบูรณ์มากขึ้น ทำให้สภาพคล่องของพาหะมีค่าสูง ส่วนแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนพบว่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงค่อนข้างน้อยเป็นผลจากปริมาณของอิเล็กตรอนอิสระมีจำนวนน้อยลงเนื่องจากมีออกซิเจนเข้าไปแทนที่ และเมื่อแอนนีลในอากาศพบว่าค่าสภาพต้านทานมีค่าลดลงเช่นกัน และคุณสมบัติทางด้านแสง การแอนนีลฟิล์มในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนและอากาศ การส่องผ่านแสงมีค่าสูงขึ้นจากเดิมเนื่องจากเมื่อเกรนมีความสมบูรณ์ สามารถลดการสะท้อนของแสงเมื่อตกกระทบที่ขอบเกรนได้ส่งผลให้แสงส่วนใหญ่สามารถทะลุผ่านไปได้ แต่เมื่อแอนนีลในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนการส่องผ่านแสงมีค่าลดลงเนื่องจาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกซิเจนเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของอิเล็กตรอนอิสระโดยจะเข้าไปจับพันธะกับ Sn-O ทำให้แถบพลังงานต้องห้ามมีค่าลดลงส่งผลให้การส่งผ่านแสงมีค่าลดลง

ขั้นตอนต่อไปจะนำฟิล์มบางที่ทำการศึกษาว่ามีความเหมาะสมที่จะนำไปใช้งานเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสมาสร้างบนฐานรองซิลิคอน ทั้งชนิด n-Si และ p-Si โดยออกแบบการทดลองเพื่อหาขนาดและรูปร่างพื้นที่รับแสง รูปร่างที่ใช้คือ วงกลม สี่เหลี่ยม และสี่เหลี่ยมขอบมน ส่วนพื้นที่จะทำการศึกษาด้วยกัน 4 พื้นที่คือ 0.0625 mm^2, 0.25 mm^2,1 mm^2 และ 4 mm^2 หลังจากทำการสร้างและวัดคุณสมบัติไฟฟ้า-แรงดัน พื้นที่วงกลมที่ขนาด 0.0625 mm^2 มีค่ากระแสรั่วไหลต่ำสุด จึงเลือกรูปร่างวงกลมและขนาดพื้นที่ 0.0625 mm^2 มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงต่อไป

ผลการทดลองเมื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโดยใช้ลักษณะรูปร่างและขนาดตามที่ได้ทำการศึกษามาแล้วพบว่ามีค่ากระแสรั่วไหลต่ำมีค่าประมาณ 5.03 μA ที่แรงดัน 5V (n-Si) และ 5.38 μA ที่แรงดัน 5V (p-Si) รอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si และ ITO/p-Si มีค่าแรงดันภายใน 0.3 V และ 0.35 V กำแพงศักย์ช็อตกีย์มีค่า 0.74 V (ITO/n-Si) และ0.73 V (ITO/p-Si) ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรอง n-Si มีค่าประมาณ 110 pF และ 95 pF ที่ฐานรอง p-Si ส่วนการตอบสนองทางความถี่มีค่าประมาณ 120 kHz และ 125 kHz บนฐานรอง n-Si และ p-Si ตามลำดับ จากการทดลองทั้งหมดนี้เมื่อนำสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์มาสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสงบนฐานรองซิลิคอน สรุปได้ว่าคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองชนิดพี มีความเหมาะสมและคุณสมบัติที่ดีกว่าการสร้างบนฐานรองชนิดเอ็น เนื่องตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดพีอิเล็กตรอนเป็นพาหะที่ทำให้เกิดกลไกการเกิดกระแส ส่วนในฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น โฮลเป็นพาหะที่ทำให้เกิดกลไกการเกิดกระแส ซึ่งสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าโฮลเกือบ 3 เท่า และมีรอยสัมผัสระหว่าง ITO/p-Si เป็นรอยสัมผัสช็อตกีย์แล้ว ยังมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำกว่า ส่งผลให้การตอบสนองทางความถี่มีค่าสูงกว่า อีกทั้งกระแสแสงที่ได้มีค่าสูงกว่าการสร้างบนฐานรองชนิดเอ็นถึง 2 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

[1] สมเกียรติ ศุภเดช, **เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์**, พิมพ์ครั้งที่ 2, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547

[2] S. M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2nd Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981

[3] วรเทพ น้อยปรีชา, **การออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, พ.ศ. 2552

[4] สุรชาติ เมืองอ่ำ, **การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง, พ.ศ. 2552

[5] Necmi Biyikli, "ITO-Schottky Photodiodes for High-Performance Detection in the UV–IR Spectrum", IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, Vol. 10, JULY/AUGUST 2004, pp. 759-765

[6] H. Yumoto, T. Inoue, S.J. Li, T. Sako and K. Nishiyama, "Application of ITO fillms to photocatalysis", Thin Solid Films, 1999, pp. 38-41

[7] ชานุ โพธิพิทักษ์, การเตรียมฟิล์มสะท้อนความร้อนชนิดอินเดียมทินออกไซด์บนแผ่น**ฟิล์มโพลีเมอร์โดยวิธีระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน**, บัณฑิตวิทยาลัย **มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี** พ.ศ.2545

[8] Donghwan Kim, Younggun Han, Jun-Sik Cho and Seok-Keun Koh, "Low temperature deposition of ITO thin films by ion beam Sputtering", Thin Solid Films, Vol. 377-378, 2000, pp. 81-86

[9] V. Craciun, D. Craciun, Z. Chen, J. Hwang and R.K. Singh, "Room temperature growth of indium tin oxide thin films by ultraviolet-assisted pulsed laser deposition", Applied Surface Science, Vol. 168, 2000, pp. 118-122

[10] Ji-Seon Kim and Richard Friend, "Surface conditioning of indium tin oxide anodes for organic light-emitting diodes", Thin Solid Films, Vol. 445, 2003, pp. 358–366

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[11] Necmi Biyikli, "High-Speed Solar-Blind AlGaN Schottky Photodiodes", Material Research Society , Vol. 5, Oct 2007, pp. 53-62

[12] Y.S. Kim, J.H. Park, D.H. Choi, H.S. Jang, J.H. Lee, H.J. Park, J.I. Choi, D.H. Ju, J.Y. Lee, Daeil Kim, "ITO/Au/ITO multilayer thin films for transparent conducting electrode applications", Vol. 254, 30 Dec 2007, pp. 1524-1527

[13] พิรินธร พลายเวช, การเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอริง เพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กโตรโคมิกส์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ.2547

[14] อรรณพ คล้ำชื่น, การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับพลาสติกโดยอาร์เอฟแมกนิตรอนสปัตเตอริงแบบควบคุมเวลาก๊าซ, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2548

[15] เรืองศักดิ์ ภัทรกิจโสภณ, ฟิล์มดีบุกออกไซด์เจือสารฟลูออรีนที่เคลือบด้วย วิธีการจุ่ม, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2550

[16] A.V. Mudryi, A.V. Ivaniukovich, "Deposition by magnetron sputtering and Characterization of indium tin oxide thin films", Thin Solid Films, Vol. x, 2007, pp. 4-7

[17] I. Srithanachai, K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen and S. Supadech, "**Preparation and Properties Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photodetectors**", Advanced Materials Research, Vols. 55-57 (2008), pp 769-772

[18] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech and N. Atiwongsanghong, " **Analysis the Suitable Indium Tin Oxide Thin Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication**", EECON'31

[19] A. Salehi, "Radiation damage in air annealed indium tin oxide layers", Thin Solid Films, Vol. 338, 1999, pp. 197-200

[20] D.K. Maurya, "Effects of post-thermal treatment on the properties of rf reactive sputtered ITO films", Microelectronics Journal, Vol.38, 2007, pp. 76–79

[21] I. Srithanachai, S. Niemcharoen, S. Ueamanapong, K. Nutaman and A. Pankiew' "**Effect of Sintering Treatment of Indium Tin Oxide Thin Films Prepared by R.F. sputtering**", MP^3 Singapore, 2008, pp. 62

[22] Shabbir A. Bashar, Study ofIndium Tin Oxide (ITO) for Novel Optoelectronic Devices, KING'S COLLEGE LONDON University of London Department of Electronic Engineering

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[23] A. Kloppel, W. Driegseis, B.K. Mayer, A. Scharmann, C. Daube, J. Stollenwerk and J. Trube, "Dependence of The Electrical and Optical Behaviour of ITO-Silver-ITO Multilayers on The Silver Ptoperties, Thin Solid Films, Vol. 365, pp. 139-146

[24] จุฑามาศ วัฒนานุรักษ์, สมบัติของสารประกอบคอปเปอร์อะลูมิเนียมออกไซด์ที่เจือด้วยธาตุหลายชนิด, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2551

[25] ปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์, การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางคอปเปอร์อินเดียมไดซีลีไนด์ที่เตรียมได้จากกระบวนการซีลีไนเซชัน, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2549

[26] นางสาวฤดีพร เลิศวศินกุ, นายฤทธิชัย ครุฌเนตร และนางสาวสุรดา เอื้อมานะพงษ์, **การศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดช็อตกีย์โดยมีอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใส**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552

[27] การุณ แซ่จอก, **การศึกษาความต้านทานของฟิล์มโพลีซิลิคอน และอมอร์ฟัสซิลิคอน หลังกระบวนการยิงฝังประจุเพื่อใช้ในอุปกรณ์ตรวจจับความดัน**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2550

[28] นายธเนศ โซะเหม, **การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ 2547

[29] นางสาวกุลวรางค์ นุตมาน, **การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิเตท**, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552

[30] G.D. Sharma, Vijay Singh Choudhary and M.S. Roy, "Effect of annealing on the optical, electrical, and photovoltaic properties of bulk hetero-junction device based on PPAT:TY blend" , Solar Energy Materials & Solar Cells, Vol. 91, 2007, pp. 275–284

[31] A. Bougrine, M. Addoua, A. Kachouane , J.C. Bernede and M. Morsli, "Effect of tin incorporation on physicochemical properties of ZnO films prepared by spray pyrolysis", Materials Chemistry and Physics, Vol. 91, 2005, pp. 247–252

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[32] A. Beaurain, D. Luxembourg, C. Dufour, B. Capoen and M. Bouazaoui, "Effects of annealing temperature and heat-treatment duration on electrical properties of sol–gel derived indium-tin-oxide thin films", Thin Solid Films, Vol. 516, 2008, pp. 4102–4106

[33] Chih-hao Yang , Shih-chin Lee, Tien-chai Lin and Suz-cheng Chen, "Electrical and optical properties of indium tin oxide films prepared on plastic substrates by radio frequency magnetron sputtering", Thin Solid Films, Vol. 516, 2008, pp. 1984–1991

[34] Carlos Pinheiro, A.J. Parola, F. Pina, J. Fonseca and C. Freire, "Electrocolorimetry of electrochromic materials on flexible ITO electrodes", Solar Energy Materials & Solar Cells, 2008.

[35] Davood Raoufi, Ahmad Kiasatpour, Hamid Reza Fallah, Amir Sayid and Hassan ozatian, "Surface characterization and microstructure of ITO thin films at different annealing temperatures, Applied Surface Science, Vol. 253, 2007, pp. 9085–9090

[36] A. De, P.K. Biswas and J. Manara, "Study of annealing time on sol–gel indium tin oxide films on glass", Materials Characterization, Vol. 58, 2007, pp. 629–636

[37] Annop Klamchuen, Nisaporn Pornteeraphat and Jiti Nukeaw, "Characterization of ITO thin films on PET substrates prepared by gas-timing RF magnetron sputtering", e-Journal of Surface Science and Nanotechnology, Vol. 3 ,2005, pp. 272-275

[38] G. Kave, "The effects of surface roughness and nanostructure on the properties of indium tin oxide (ITO) designated for novel optoelectronic devices fabrication", Material & Energy Research Center (MERC),2008, pp. 514–519

[39] D.K. Maurya, "Effects of post-thermal treatment on the properties of rf reactive sputtered ITO films", Microelectronics Journal, Vol. 38 ,2007, pp. 76–79

[40] Y. Iwama, D. C. Cho, T. Mori and T. Mizutani, "Electroluminescence Properties of Organic Light-Emitting Diodes Using IT0 with Different !Surface Treatments", Proceedings of the 7th Intemational Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003, pp. 4-6

[41] C. Cali and M. Mosca, "INDIUM TIN OXIDE FILMS FOR OPTICAL SENSORS", Istituto Nazionale di Fisica della Materia and Dipartimento di Ingegneria Elettrica dellqAniversi~ degli Studi di Palermo Viale delle Scienze Italy, pp. 79-85

[42] T.S. Sathiaraj, "Effect of annealing on the structural, optical and electrical properties of ITO films by RF sputtering under low vacuum level", Microelectronics Journal, 2008.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[43] C. Guillen and J. Herrero, "Influence of oxygen in the deposition and annealing atmosphere on the characteristics of ITO thin films prepared by sputtering at room temperature", Science direct, Vol. 80, 2006, pp. 615–620

[44] A. Mohammadi Gheidari, F. Behafarid, G. Kavei and M. Kazemzad, "Effect of sputtering pressure and annealing temperature on the properties of indium tin oxide thin films", Materials Science and Engineering B, Vol. 136, 2007, pp. 37–40

[45] K. Aiempanakit , S. Phutwat , S. Dumrongrattana and P.Rakkwamsuk, "EFFECT OF ANNEALING TEMPERATURE ON THE PROPERTIES OF ITO FILMS PREPARED BY DC MAGNETRON SPUTTERING", การประชุมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, 2003, pp. xx-xx

[46] K. Aiempanakit, P.Rakkwamsuk and S. Dumrongrattana, "INFLUENCE OF ANNEALING TREATMENT ON PROPERTIES OF ITO FILMS DEPOSITED AT ROOM TEMPERATURE BY DC MAGNETRON SPUTTERING", การประชุมวิทยาศาสตร์แห่งประเทศไทย, 2005.

[47] Li-Jian Meng, Jinsong Gao, R.A. Silva and Shigeng Song, "Effect of the oxygen flow on the properties of ITO thin films deposited by ion beam assisted deposition (IBAD)", Thin Solid Films, Vol. 516, 2008, pp. 5454–5459

[48] Shitao Li, Xueliang Qiao and Jianguo Chen, "Effects of oxygen flow on the properties of indium tin oxide films", Materials Chemistry and Physics, Vol. 98, 2006, pp. 144–147

[49] A. Mohammadi Gheidari, F. Behafarid, G. Kavei and M. Kazemzad, "Effect of sputtering pressure and annealing temperature on the properties of indium tin oxide thin films", Materials Science and Engineering B, Vol. 136, 2007, pp. 37–40

[50] A. K. sytchkovam, M.L. grilli, S. boycheva and a. piegari, "Optical, electrical, structural and microstructural characteristics of rf sputtered ITO films developed for art protection coatings", Appl. Phys. A, Vol. 89, 2007, pp. 63–72

[51] C.J. HUANG and W.C. SHIH, "Influence of H2- and N2-Ambient Annealing of Indium-Tin Oxide Film on Plastic Substrate for Organic Light-Emitting Diode", Journal of ELECTRONIC MATERIALS, Vol. 32, 2003, pp. 9-13

[52] Hamid Reza Fallah, Mohsen Ghasemi and Hadi Steki, "The effect of annealing on structural, electrical and optical properties of nanostructured ITO films prepared by e-beam evaporation", Materials Research Bulletin, Vol. 42, 2007, pp. 487–496

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[53] มานิตา ด้วงแสง, การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2559

[54] G. Hodes, L. Thompson, J. DuBow and K. Rajeshwar, "Heterojunction Silicon/Indium Tin Oxide Photoelectrodes : Development of Stable Systems in Aqueous Electrolytes and Their Applicability to Solar Energy Conversion and Storage", Chemical Society, 105, 1983, pp. 324-330

[55] Chino K, "Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment" , Solid- State Electronics, Vol. 16, 1973, pp. 119-121

[56] Jianming Zhou, "Indium Tin Oide (ITO) Deposition, Patterning and Schottky Contact Fabrication" Department of Microelectronic Engineering College of Engineering Rochester Institute of Technology, December 2005

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ค่าคงที่ทางฟิสิกส์

ตารางที่ 1 ค่าคงที่ทางฟิสิกส์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่า	หน่วย
ค่าคงที่ของแพลงค์	h	6.626×10^{-34}	J-sec
ความเร็วแสงในสุญญากาศ	c	3×10^{8}	m/sec
ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน	q	1.602×10^{-19}	C
ค่าคงที่โบลต์ซมันน์	k	1.38×10^{-23}	J/K
สภาพคล่องของอิเล็กตรอน (Si)	μ_n	1350	cm^2/ V-sec
สภาพคล่องของ โฮล (Si)	μ_p	480	cm^2/ V-sec
ความหนาแน่นอินทรินซิค (Si)	n_i	1.5×10^{10}	cm^{-3}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์

Technical Programme and Abstract Book for

The 7th International Conference on Materails Processiong for Properties and Performance

05 November – 07 November 2008

and

The 3rd Asian Thermal Spray Conference

06 November – 07 November 2008

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Effect of Sintering Treatment of Indium Tin Oxide Thin Films Prepared by R.F. Sputtering

I. Srithanachai[a], S. Niemcharoen[a], S. Ueamanapong[a], K. Nutaman[a] and A. Pankiew[b]
[a]*Electronics Research Center and Department of Electronics Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Charongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand*
[b]*Thai Microelectronics Center (TMEC), Chachoengsao 24000, Thailand*
E-mail: srithanachai@yahoo.com

1. INTRODUCTION

The important transparent conductive oxide (TCO) semiconductors are impurity-doped ZnO, In_2O_3 and SnO_2 as well as multicomponent oxides consisting of combinations of ZnO, In_2O_3 and SnO_2, including some ternary compounds existing in their systems. The work on TCO semiconductors such as tin oxide (SnO_2), cadmium oxide (CdO), and indium tin oxide (ITO) has been the great technological interest due to their high-quality of electrical and optical properties. The applications of using TCOs are organic optoelectronic devices, transparent electrode in photovoltaic cells and transparent electrode in photodetector.

In this report, we studied indium tin oxide (SnO_2 doped In_2O_3) which is an n-type semiconductor and this is one of the most frequently used material because of its unique characteristics such as good conductivity, high optical transmittance over the visible wavelength region and excellent adhesion to substrate [1]. The thin film consists of In_2O_3 and SnO_2. Indium (III) oxide (In_2O_3) is a chemical compound, an amphoteric oxide of indium. It forms bixbyte-type cubic crystals and has high melting point. Tin oxide (SnO_2) is the inorganic compound. The crystal structure of SnO_2 is tetragonal. The mineral form of SnO_2 is called cassiterite, and this is the main ore of tin.

2. EXPERIMENTAL

Glass slides were ultrasonically cleaned in DI water for 5 mins, and were immersed in Piranha (H_2SO_4 + H_2O_2) for 10 mins, afterward they were ultrasonically cleaned in DI water for 5 mins again [2]. Finally, they were blow-dried in a high-purity nitrogen gas stream. The ITO ceramic target with 99.99% purity was made by sintering a mixture of 90 wt% indium oxide (In_2O_3) and 10 wt% of tin oxide (SnO_2) [3]. Films were sputtered on non-heated substrate in the pure argon pressured of 1.5×10^{-2} torr at 100 W. The target was pre-sputtered for 60 mins and the sputtering time were 5, 15, 30 and 60 mins. The distance between target and substrate was 15 cm. Annealing treatment is carried out in oxygen atmosphere for 15 mins at each temperature in the temperature range of 200-500°C [4].

The phase composition of ITO film was characterized using XRD technique with a D8 Advance Brunker X-ray diffractometer, with monochromated CuKα in the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

scan range of 2θ between 20° and 80° with a step size of 0.025 (2θ/s). Measurements were taken under beam-acceleration conditions of 40kV/35mA. Surface morphology as well as the crystal grain size was directly observed by a LEO model 1445VP type scanning electronic microscopy (SEM). The UV-visible optical transmission spectra of ITO thin films were recorded by a single beam spectrophotometer (Thermo electron corporation model Helios α). Electrical properties were surveyed with a Prometrix model Omni Map ® RS35 type four-point probe [5].

3. RESULTS AND DISCUSSION

Structure properties

Fig. 1 shows the XRD analysis of the some selected samples prepared at sputtering time (a) 5, (b) 15, (c) 30 and (d) 60 mins, respectively. The films were annealed in oxygen flowed for 15 mins. It can be seen that the main growth directions are (222), (400), (440), (411), (440) and (622), which cubic structure of the ITO [6]. The obvious difference between the two patterns (before and after) is that the film annealed at higher temperature crystallized better. No impure phased corresponding to other tin compounds such as Sn and SnO_2 were detected, indicated that solution of ITO was formed.

The surface morphology of the ITO thin films annealed at difference temperature. It can be seen from Fig. 3 that as the annealing temperature is increased, the films are dense and the grain size along sample surface increase. After annealing, the grain size was bigger because the temperature influences the form of grain size. Furthermore, the grain size was polycrystalline because sputtering time was increased.

Electrical properties

Fig. 2 shows the influence of annealing treatment resistivity of thin films. With the increase of the annealing temperature in the range of 200-500°C, the resistivity of the film increase significantly. This upper resistivity effect is due to decreasing free electron in structure during vacuum annealing process. The ITO film has a smallest resistivity of 4.55×10^{-4} Ω-cm after annealing at 300°C.

Optical properties

The optical properties of thin film shown in Fig. 4. It is clearly seen that the transmittance of the film annealed at 300°C is much higher than those of the films annealed at 200, 400 and 500°C. The optical properties were improved by increasing heat treatment temperature because of enhanced formation and crystallization of thin films. The higher temperature treatment influence better crystallization and lower level of defect near grain boundary. Therefore, the structure of ITO thin film is homogeneity and the light reflection decrease.

References

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. H.R. Fallah, M. Ghasemi, A. Hassanzadeh, H. Steki. Materials Research Bulletin. 42, 487-496 (2007).
2. H.R. Fallan, M. Ghasemi, A. Hassanzadeh. Physica. 39, 69-74 (2007).
3. C.H. Yang, S.H. Lee, T.C. Lin, W.Z. Zhuang. Materials Science and Engineering. (2007).
4. C.H. Yang, S.C. Lee, S.C. Chen, T.C. Lin. Materials Science and Engineering. 129, 154-160 (2006).
5. A.M. Gheidari, F. Behafarid, G. Kavei, M. Kazemazad. Meterials Science and Engineering. 136, 37-40 (2007).
6. L.Z. Hua, K.Y. peng, R.D. yan. Nonferrous Met. Soc.China. 18, 366-371 (2007).

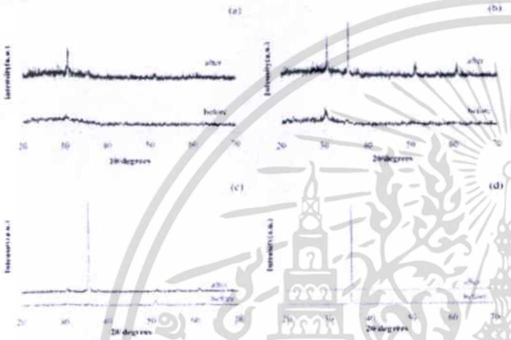


Fig. 1. Example of XRD diffraction pattern Of ITO thin films heat treatment at various time

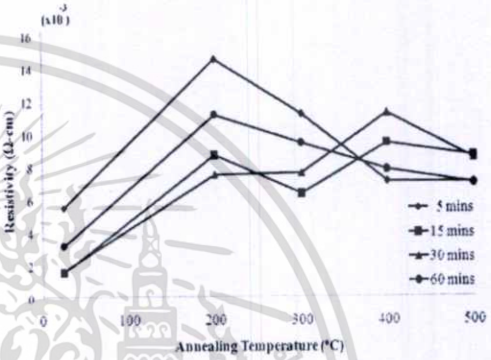


Fig. 2. Resistivity of the ITO thin films annealed at various sputter times and temperature of annealing

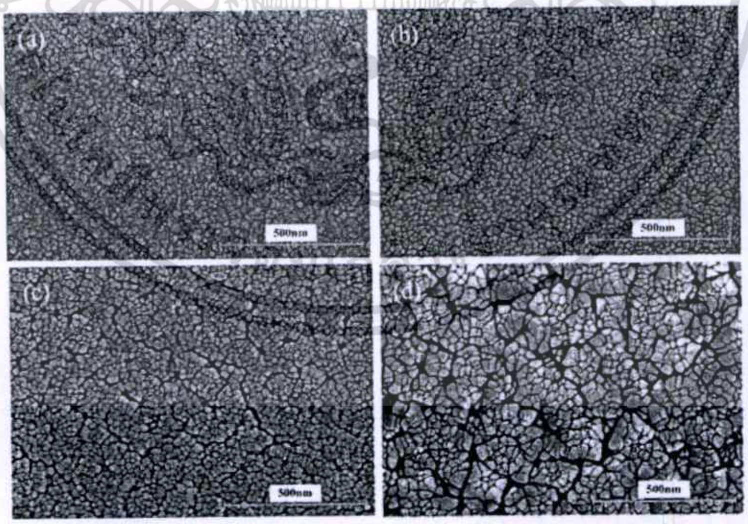


Fig. 3. SEM image of the sample ITO films annealing at 500°C and at various time of sputter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

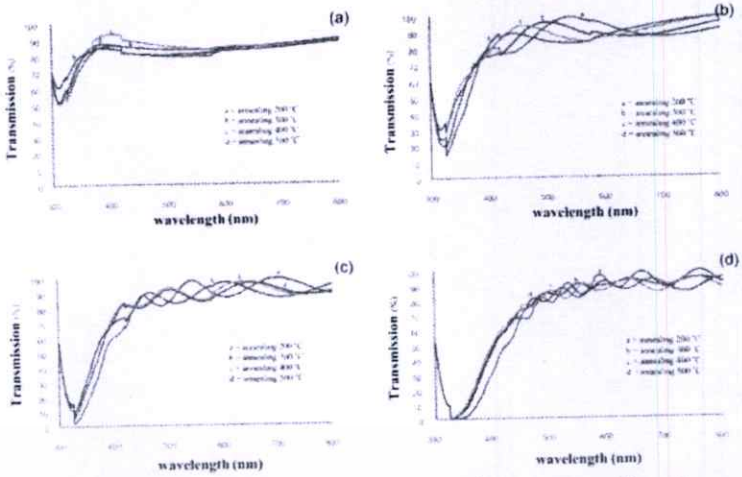
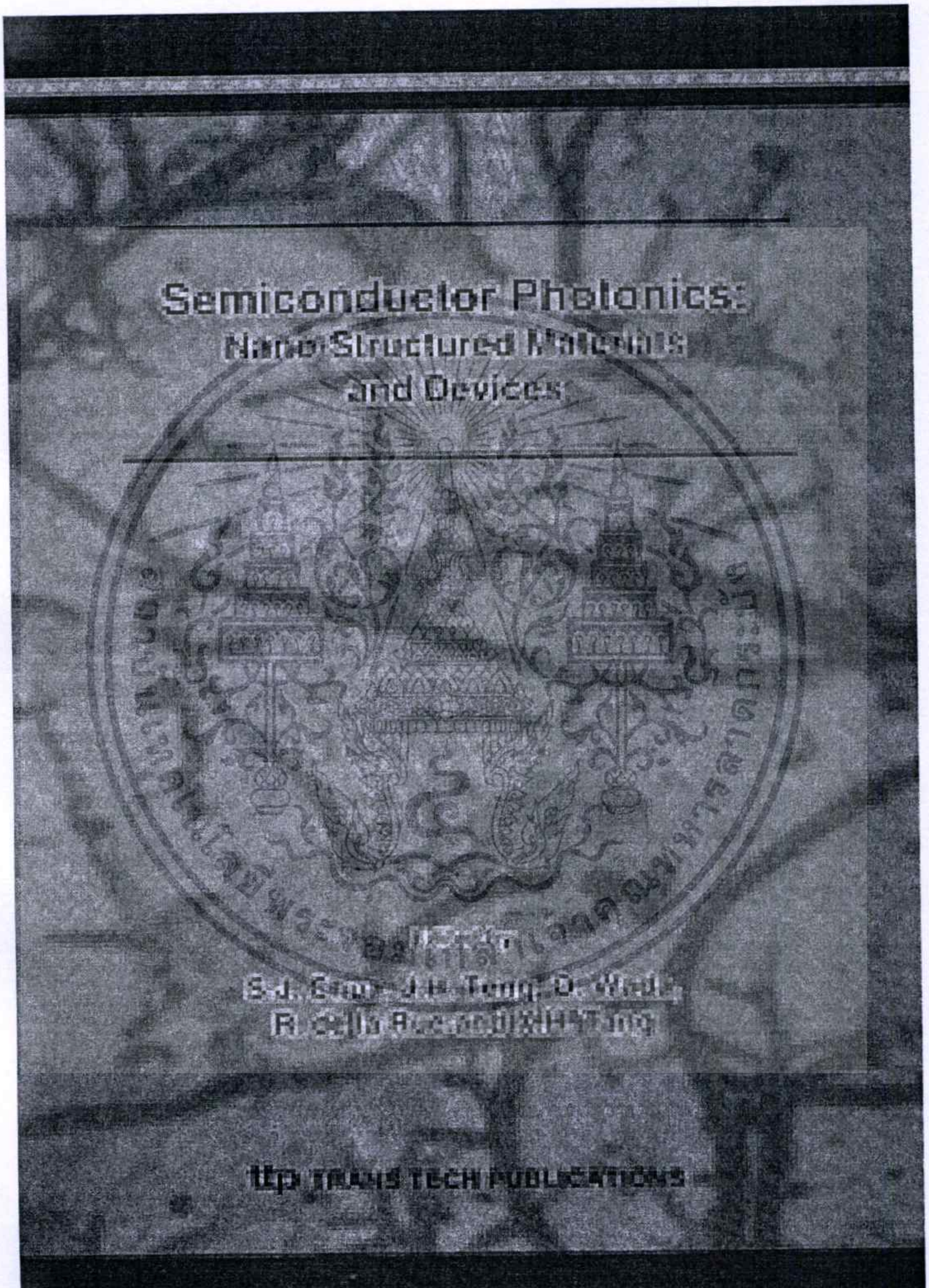


Fig. 4. Optical transmittance spectra at various annealing temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Advanced Materials Research Vols. 55-57 (2008) pp 769-772
online at http://www.scientific.net
© (2008) Trans Tech Publications, Switzerland

click for feedback

Preparation and Properties Indium Tin-Oxide Thin Films by RF Sputtered for Photodetectors

I. Srithanachai[a], K. Nutaman, A. Rerkratn, S. Niemcharoen and S. Supadech
Electronics Research Center and Department of Electronics Faculty of Engineering,
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Charongkrung Road, Ladkrabang,
Bangkok 10520, Thailand
[a] Srithanachai@hotmail.com

Keywords: Photodiode, Indium Tin Oxide, RF Sputtering

Abstract. This paper descript studying and preparation indium-tin oxide (ITO) thin film from method 90 wt.% In_2O_3 and 10 wt.% SnO_2 formula target with 99.99% purity on glass slide by RF reactive sputtering method at room temperature. This paper, sputtering time 5, 15, 30 and 60 mins. Thin films ITO were measured crystallization, optical and electrical characteristic by an X-ray diffractometer (XRD), scan electron microscopy (SEM) , Four Point Probe and UV-VIS spectrophotometry. The results found that thin films which made from RF sputtering method had a high crystallization, order arrangement grain. Strong peak of XRD (400) and (441), low resistivity are 2.2 x 10^{-3}, 4.4 x 10^{-3}, 1 x 10^{-3} and 7 x 10^{-4} Ω-cm, transmittance are 82%, 84%, 87% and 89%, respectively. The overall experimental results identify that fabricated thin films ITO have good properties and is suitable for transparent electrode application. The ultimate goal is developing schottky photodetector.

Introduction

Metal-Semiconductor Photodiode is device that converts optical energy to electrical energy photocurrent occur at depletion region and neutral region under window layer. Nowadays, many photodiodes have two contract electrode ,show in Fig. 1. Photocurrent is generated at window layer only but photon can't get through electrode. So that, photocurrent isn't generated right here. However, photodiode still used as a optoelectronic component. By the way, photodiode is not used by maximum efficiency, so, it is developed to a transparent electrode. ITO is a material has developed and researched for a long time. Because of its high transmittance efficiency and high responsibility. Moreover, ITO has a wide band gap, low resistivity and high transmittance in the visible spectrum. ITO has n-type conductivity as a result of the oxygen vacancy and tin doping of In_2O_3 in which Sn^{4+} substitutes for the In^{3+} action. There are many methods to prepare ITO thin films such as chemical vapor deposition (CVD) [5], thermal oxidation [6] pulsed laser deposition [7] and sol-gel deposition [8]. However, sputtering is the most popular method to prepare thin films by the RF reactive sputter method. Because this method has a low growth rate and as easy way to

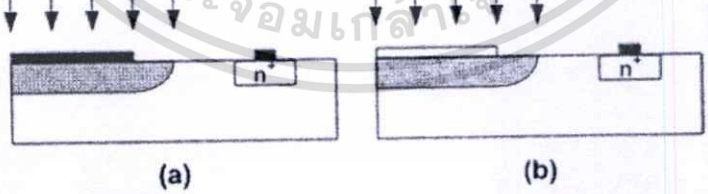


Figure 1. Difference of electrode (a) Metal electrode, (b) ITO transparent electrode.

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of the publisher: Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, www.ttp.net. (ID: 161.246.1.37-20/08/08,06:31:21)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

click for feedback
consult - comment - contact

control growth rate sputter give a uniform thin films and able to control parameters. ITO thin films can be coat on substrate. For example, silicon, glass slide and polyimide. Fabricated ITO has many good properties and appropriate to use as a transparent electrode in electronic devices or solar cells.

Experimental

ITO thin films were prepared by r.f. sputter with a target composite of the mixture 90 wt.% indium oxide (In_2O_3) and 10 wt% tin oxide (SnO_2). The size of ITO disk (99.99%) was 3 inch diameters. It was used as a target. The distance between target and substrate was 15 cm [9]. Films were sputted on unheated substrate in the pure argon pressured at 1 x 10^{-6} torr ambient. The target was pre-sputtered for 60 mins and sputtered time 5, 15, 30 and 60 min. Every deposition steps. structural properties were studies by the means of the X-ray diffraction (XRD, Bruker model D8) and the scanning electron microscopy (SEM, LEO model 1445VP) technique. The optical transmission and sheet resistance of films were measured by UV-VIS spectrophotometer (Thermo electron corporation model Helios α) and four point probe (Prometrix model Omni Map ® RS35) technique, respectively.

Results and Discussion

Surface morphology

Comparing with data structure, (222), (400) and (441) are the indium tin oxide orientation .show in Fig. 2. The peaks of (222), (441) orientation was decreasing when sputtering time increased.

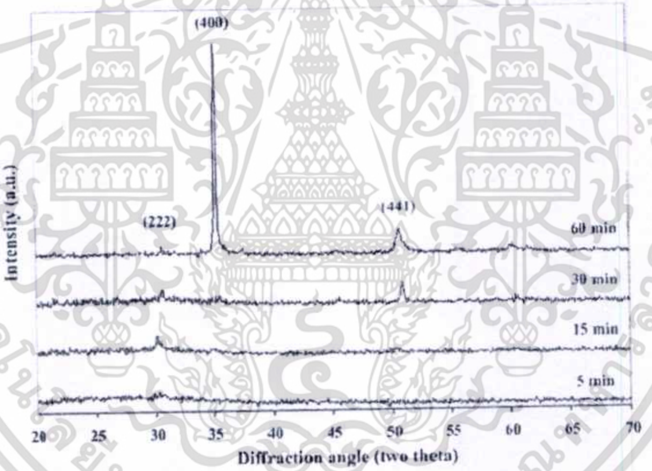


Figure 2. The XRD pattern of RF sputtered ITO thin films.

By the way, the peak of (400) orientation increased while sputtering was increasing. Because grain size or structure were changed by sputtering time, peak characteristics was changed.

SEM image of indium tin oxide at sputtering time 5, 15, 30 and 60 mins with 100000x magnification were .show in Fig. 3. It was found that the grain size are 23, 29, 43 and 75 on 5 at 5, 15, 30 and 60 mins, respectively. Sputtering time 60 min. grain size and order arrangement.

The form of grains were polycrystalline. Since the sputtering time that increasing cause more crystal combination, so that, the grain size increase.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

click for feedback
consult - comment - contact

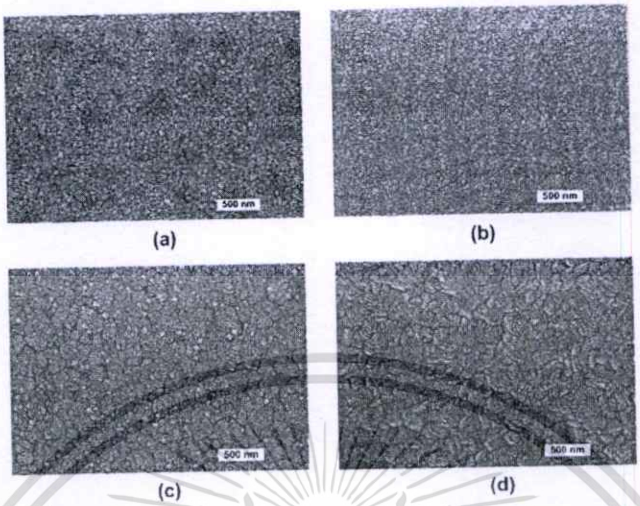


Figure 3. SEM surface image of ITO, (a), (b), (c) and (d) at sputter time 5, 15, 30 and 60 mins, respectively.

Optical properties

The optical transmittance of ITO films deposited on unheated glass slide. The transmission spectrum of ITO at sputter time 5, 15, 30 and 60 mins show in Fig. 4. The most of transmission is 89%[1,2] in range from 630 nm to 700 nm at sputter time 5 min because the film have low thickness. At sputter time 60 min ITO thin film have low transmittance, as, the transmittance of the films was decreasing when the sputter time increased. A small grain size which grown on 5 minutes sputter time has high transparency. On the other hand, the large grain size that grown on 60 minutes sputter time has low transparency.

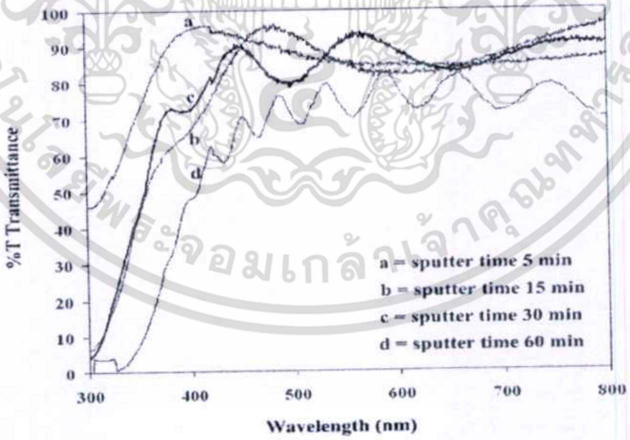


Figure 4. The UV-VIS Transmittance of RF sputtered ITO thin film.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

click for feedback

Electrical properties

The various ITO films resistivity that mode in various sputter time are show in Fig. 5. Normally, resistivity decreased by increasing time. However, the maximum time of decrease resistivity is on 60 minutes with minimum resistivity of 7 x 10^{-4} Ω-cm. Conductivity was increasing while sputtering time increased.

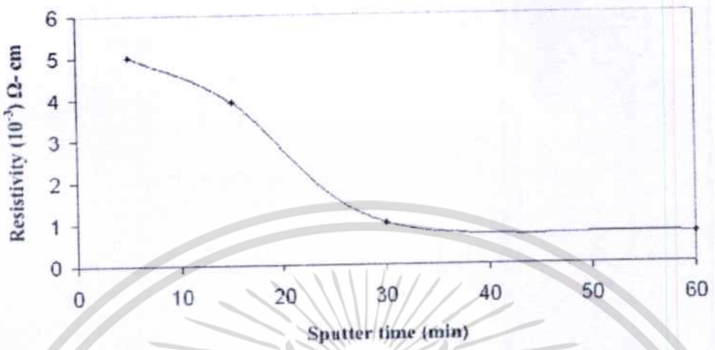


Figure 5. Resistivity of the ITO films at various sputter times.

Summary

Uniform of ITO thin films deposited by r.f. sputtering. Strong peak (222), (400) and (441) were ITO with XRD pattern. The ITO have transparent percentage on 5 min higher than 60 min about 89%. The resistivity 60 min higher than 5 min about 7 x 10^{-4} Ω-cm. The effects of the sputter time of the ITO films on structural, electrical and optical properties were investigated [4]. ITO thin films suitable with transparence electrode for photodiode.

References

[1] S. Calnan, H.M. Upadhyaya, M.J. Thwaites and A.N. Tiwari: Thin solid films (2005).
[2] Chin-Hao Yang, Shin-Chin Lee, Tien-Chai Lin and Wen Yan-Zhuang: Mater Sci Eng B. Vol. 138 (2007), p. 271.
[3] Dongsun Yoo, Ilgon Kim, Sangsoo Kim, Chang Hie Hahn, Changyu Lee and Seongjin Cho: Appl. Surf. Sci. Vol. 253 (2007), p. 3888.
[4] Chin-Hao Yang, Shin-Chin Lee, Suz-Cheng Chen and Tien-Chai Lin: Mater Sci Eng B. Vol. 129 (2006), p. 154.
[5] S.A. Campbell, H.S. Kim, D.C. Gilmer, B. He, T. Ma and W.L. Gladfelter: IBM J. Res. Dev. Vol. 43 (1999), p. 383.
[6] I. Saeki, Okushi, H. Konno and R. Furuichi: J. Electrochem: Soc. Vol. 143 (1996).
[7] J.H. Kim, S. Lee and H.S. Im: Appl. Surf. Sci. Vol. 151 (1996), p. 6.
[8] Z. Wang, U. Helmersson and P.O. Kall: Thin Solid Films. Vol. 405 (2002), p. 50.
[9] S. Rodthong: *Metallization for 5 μm integrated circuit technology at KMITL* (Master Thesis, Thailand 2005).

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายอิสระ ศรีธนชัย
วันเดือนปีเกิด	22 กันยายน 2526
ที่อยู่	568/34 ลุมพินีเซ็นเตอร์ C2 ถ.แฮปปี้แลนด์ แขวงบึงกุ่ม เขตบางกะปิ กรุงเทพมหานคร 10240
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2548 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ โซลิดสเตทอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2545 มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนจุฬาภรณราชวิทยาลัย เชียงราย
ความสามารถเฉพาะด้าน	สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำซิลิคอน สารประกอบโปร่งแสง
ประสบการณ์ทำงาน	
2549-2550	เจ้าหน้าที่วิจัย ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารต่างประเทศ

[1] **Itsara Srithanachai**, Surada Ueamanapong, Narin Atiwongsangthong and Surasak Niemcharoen, "Analysis Structural Properties of ITO Thin Films after Annealing Treatment in Nitrogen Atmosphere", Advance in materials and Processing Technologies Malaysia, October 2009, pp. 87.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารในประเทศ

[1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, **อิสระ ศรีธนชัย** และ สัญญา คุณขาว, "การตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทด้วยระยะห่างของอิเล็กโทรดมีขนาดกว้าง", วิศวสาร ลาดกระบัง, กันยายน 2550.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

[2] S. Niemcharoen, **I. Srithanachai**, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech and N. Atiwongsangthong, "Analysis the Suitable Indium Tin Oxide Thin Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า, ครั้งที่ 31, ตุลาคม 2551, หน้า 1213-1216

[2] กุลวรางค์ นุตมาน, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และ **อิสระ ศรีธนชัย**, "ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เพื่อใช้สร้างเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ", EECON'31, October 2008, pp. 1201-1204.

[3] **Itsara Srithanachai**, Surasak Niemcharoen, Surada Ueamanapong, Kulwarang Nuttaman, Narin Atiwongsangthong, Rangson Maunghlua and Apirak Pankiew, "Surface morphology of ITO thin films in difference atmosphere", MST'27 Chiang Mai, January 2009, pp. xx-xx.

[4] **I. Srithanachai**, S. Niemcharoen, S. Ueamanapong, K. Nutaman and N. Atiwongsangthong, "Effect of Annealing Varied Temperature on Electrical and Optical Properties of Indium Tin Oxide Films at Oxygen Atmosphere", ECTI-CON 2009, April 2009, pp. 486-489.

[5] Kritsana Aungkaset, **Itsara Srithanachai**, Narin Ariwongsangthond and Surasak Niemcharoen, "Study the Influence of temperature to Indium Tin Oxide (ITO) Thin Film For Apply to Electrode in Photodetector", GSTNN 2009 Chiang Mai, September 2009, pp. 18.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้