



รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร
เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์
The Fabrication of Nano Structure Indium Tin Oxide Films
as Transparent Conductive Oxide for Solar Cells

นายรังสรรค์ เมืองเหลือ
นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2560

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) การสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร เพื่อนำไป
ประยุกต์ใช้เป็นขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์

แหล่งเงิน งบประมาณแผ่นดิน ประปีงบประมาณ 2560

ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 500,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2559 ถึง 30 กันยายน 2560

หัวหน้าโครงการวิจัย นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

ผู้ร่วมโครงการวิจัย นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอการสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์(ITO)ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสง ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 ตอน โดยเริ่มจากการฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีการสปัตเตอร์แบบอาร์เอฟและควบคุมความหนาด้วยเทคนิคการจับเวลา ต่อจากนำฟิล์มที่ได้มาทำการแอนนیلเพื่อปรับปรุงฟิล์ม ITO ได้ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า $8.8 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ และค่าการส่งผ่านของแสง 88% ที่แอนนิลในก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 300°C เป็นเวลา 15 นาที ที่ความหนาของฟิล์ม ITO 230 นาโนเมตร ขั้นสุดท้ายเป็นการใช้ขั้วไฟฟ้า ITO แทนขั้วโลหะอลูมิเนียม โดยการสร้างโครงสร้าง ITO/n-type silicon and ITO/p-type silicon และได้ค่าแรงภายในสัมผัสของซีดทีอีระหว่าง 0.2 ถึง 0.4 V ค่ากระแสรั่ว ITO/n-type silicon $5.03 \mu\text{A}$ และ ITO/p-type silicon $5.38 \mu\text{A}$ จากการทดลองพบว่า ITO/n-type silicon และ ITO/p-type silicon เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ที่คุณลักษณะที่ดีและ ITO สามารถใช้เป็นขั้วไฟฟ้าได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Research Title : The Fabrication of Nano Structure Indium Tin Oxide Films
as Transparent Conductive Oxide for Solar Cells

Researcher : Mr. Rangson Muanghlua

: Mr. Surasak Niemcharoen

Department : Electronics Engineering Faculty : Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Abstract

This research presents The Fabrication of Nano Structure Indium Tin Oxide(ITO) Films as Transparent Conductive Oxide. There are 3 steps for this research. The first step is grown film. The nano film is fabricated by RF sputtering. Thickness of film is controlled by time technique. The next step is anneal for improved ITO film. The films is good characteristics such as low resistivity $8.8 \times 10^{-3} \Omega\text{-cm}$ and high transparent 88 % with 230 nm thickness and anneal in nitrogen atmosphere for 15 mins at 300°C . Finally, Al electrode is replaced by electrode. The light can pass through ITO electrode. ITO films are fabricated on n-type silicon and p-type silicon and built in voltage of Schottky contact is V_{bi} from 0.2 to 0.4 V. ITO/n-type silicon has leakage current $5.03 \mu\text{A}$ and ITO/p-type silicon has leakage current $5.38 \mu\text{A}$ at bias 5 V. This experiment that ITO/n-type silicon and ITO/p-type silicon are good characteristics of electronic device and ITO film can use electrode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็น การสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วนำไฟฟ้าโปร่งแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์(A118-0260-052) นี้ประสบความสำเร็จได้ ต้องขอกราบขอบพระคุณ จากบุคคลดังต่อไปนี้

การวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ด้วยเงินงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้สถานที่และเครื่องมือในการทำวิจัย

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และตลอดจนนักวิจัยเกี่ยวกับการวิจัย ตอบข้อซักถาม และช่วยปรับปรุงข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นจนกระทั่งงานวิจัยนี้บรรลุไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ให้คำปรึกษาและคำแนะนำต่างๆ เกี่ยวกับงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่คณะวิศวกรรมศาสตร์ทุกท่าน ที่ให้ความอนุเคราะห์รวมทั้งอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่างๆ

คณะผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ที่มีความสนใจในงานที่เกี่ยวข้องทางด้านนี้หรือผู้ที่ต้องการศึกษาหาความรู้เกี่ยวกับงานวิจัย หากมีข้อผิดพลาดประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัยไว้ ณ ที่นี้ด้วย

นายรังสรรค์ เมืองเหลือ

นายสุรศักดิ์ เนียมเจริญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
สัญลักษณ์.....	XI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตของโครงการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการวิจัย.....	2
1.5 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการวิจัย.....	4
1.6 เนื้อหาของงานวิจัย.....	5
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สารประกอบอินทรีย์มหินออกไซด์.....	6
2.1.1 โครงสร้างของสารประกอบอินทรีย์มหินออกไซด์(ITO).....	8
2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบอินทรีย์มหินออกไซด์.....	10
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึก.....	11
2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	11
2.2.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด.....	14
2.2.3 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องผ่าน.....	15
2.2.4 การตรวจวัดสมบัติของฟิล์มทางแสง.....	16
2.3 โฟโตไดโอด	19
2.3.1 โฟโตคอนดักเตอร์.....	19
2.3.2 pn โฟโตไดโอด.....	20
2.3.3 ซีอตกี๊ไดโอด.....	21
2.3.4 กลไกการเกิดรอยสัมผัสแบบซีอตกี๊.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

2.3.5 รอยสัมผัสข้อตักยึกขณะได้รับไปอัส.....	24
บทที่ 3 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง.....	27
3.1 การออกแบบมาร์คต้นแบบ.....	27
3.2 การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง.....	29
3.4 ระบบการสร้างฟิล์มบาง.....	32
3.5 การสปีดเตอร์ริง.....	32
3.6 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง.....	37
3.7 ส่วนประกอบที่สำคัญของ SPF –RF Sputtering System.....	38
3.8 ขั้นตอนกระบวนการสร้างฟิล์มบาง.....	41
3.9 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศ.....	44
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	53
4.1 การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์.....	53
4.1.1 การหาความหนาของฟิล์ม.....	53
4.1.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด.....	54
4.1.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์ม ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์.....	55
4.1.4 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มที่ยังไม่ได้แอนนีส.....	56
4.1.5 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ยังไม่ได้แอนนีส.....	58
4.2 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทางความร้อน ในบรรยากาศ.....	59
4.2.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์ม ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ ผ่านแอนนีสแล้ว.....	59
4.2.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่อง กวาดที่ผ่านแอนนีส.....	60
4.2.3 สมบัติทางแสงของฟิล์มที่ผ่านการแอนนีส.....	61
4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ผ่านการแอนนีส.....	62
4.3 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทาง ความร้อนในก๊าซไนโตรเจน.....	63
4.3.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด ที่ผ่านแอนนีสด้วยก๊าซไนโตรเจน(N ₂).....	63
4.3.2 สมบัติทางแสงของฟิล์มที่ผ่านการแอนนีสด้วยก๊าซไนโตรเจน.....	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.3.3 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยก๊าซไนโตรเจน.....	65
4.4 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทางความร้อน ในก๊าซออกซิเจน.....	66
4.4.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่อง กวาดที่ผ่านแอนนัลด้วยก๊าซออกซิเจน(O ₂).....	66
4.4.2 สมบัติทางแสงของฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยก๊าซออกซิเจน.....	67
4.4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยก๊าซออกซิเจน.....	68
4.5 การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส.....	69
4.5.1 รูปทรงเรขาคณิตและขนาดพื้นที่รับแสง.....	70
4.5.2 การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า สำหรับเซนเซอร์แสง.....	71
4.5.3 การวัดสมบัติทางไฟฟ้ารอยต่อสัมผัสแบบซีดก็ยไโดด.....	71
4.5.4 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของการไบอัสแรงดันกับกระแสของเซนเซอร์แสง.....	74
4.5.5 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าการไบอัสย้อนกลับกับความประจุไฟฟ้าของรอย ITO/silicon ของตัวเซนเซอร์แสง.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	80
เอกสารอ้างอิง.....	82
ประวัติคณะผู้วิจัย.....	85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1.1	การดำเนินงานโครงการวิจัย.....	3
2.1	ประเภทของวัสดุ.....	6
2.2	คุณสมบัติของอะตอม อินเดียม(In) และ ดีบุก(Sn).....	7
4.1	ความหนาของฟิล์มบาง และ อัตราการเกิดฟิล์มบาง.....	53
4.2	การเปรียบเทียบบรรยากาศสำหรับการแอนนัล ที่อุณหภูมิ 300 °C.....	70
4.3	การเปรียบเทียบรูปทรงเรขาคณิต พื้นที่ และ ค่ากระแสมีด.....	70



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	โครงสร้างผลึกสารอินเดียมออกไซด์ แบบ cubic (bixbyite type).....	8
2.2	โครงสร้างผลึก Tin(II)oxide ; SnO แบบ tetragonal.....	9
2.3	โครงสร้างผลึกสาร Tin(IV)oxide ; SnO ₂ แบบ Rutile tetragonal.....	9
2.4	แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	10
2.5	แบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกตามกฎของแบรกก์.....	11
2.6	การตรวจสอบโครงสร้างของผลึกธาตุของทั้งสแตน.....	13
2.7	การทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	14
2.8	การทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน.....	15
2.9	คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า.....	17
2.10	การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์ม.....	18
2.11	แถบพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่มีการดูดโฟตอนและคลายโฟตอน.....	20
2.12	โครงสร้างของไดโอดแบบพีเอ็น.....	21
2.13	ภาพโครงสร้างตัดขวางซีดกีย์ไดโอด.....	21
2.14	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสซีดกีย์.....	22
2.15	โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อสัมผัสระหว่างโลหะ กับ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น.....	23
2.16	แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง +V _A	24
2.17	แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ -V _A	25
2.18	การเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง ซีดกีย์ไดโอด กับ ไดโอดรอยพีเอ็น.....	26
3.1	ขนาดและรูปร่างสี่เหลี่ยม.....	27
3.2	ขนาดและรูปร่างสี่เหลี่ยมขอบมน.....	27
3.3	ขนาดและรูปร่างกลม.....	27
3.4	ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดทางแสง.....	28
3.5	กระบวนการสร้างฟิล์มบาง ด้วยเทคนิคต่างๆ.....	32
3.6	กลไกเกิดขึ้นฟิล์มบางเมื่อไอออนบวกพุ่งชนผิวเป้า(target).....	33
3.7	การสปีเตอร์เปรียบเทียบเหมือนกันชนด้วยลูกบิลเลียด.....	34
3.8	การถ่ายเทโมเมนตัมของกระบวนการสปีเตอร์ริง.....	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.9	โครงสร้างของระบบไดโอดไฟตรง..... 36
3.10	ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง..... 36
3.11	SPF – RF Sputtering System..... 38
3.12	องค์ประกอบรวม SPF – RF Sputtering System..... 39
3.13	ภาพแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A..... 39
3.14	ภาพแผงควบคุม ปุ่ม, B-A Gauge and Heater..... 40
3.15	โครงสร้าง Chamber..... 44
4.1	สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดพื้นผิวของฟิล์มบาง ที่ความหนาต่างๆ..... 54
4.2	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบฟิล์มบางที่ได้จากสปัตเตอร์ด้วยเป้าอินเดียมทินออกไซด์ด้วย(ITO)..... 55
4.3	การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มบางที่ได้จากสปัตเตอร์ด้วยเป้าอินเดียมทินออกไซด์ด้วย(ITO) ที่ความหนาของฟิล์มต่างๆ กัน..... 57
4.4	ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับการส่องผ่านของแสงที่มีความคลื่น 670 nm.. 58
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของฟิล์ม กับ ค่าสภาพความต้านทาน..... 58
4.6	รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบฟิล์มบางที่ได้จากสปัตเตอร์ด้วยเป้าอินเดียมทินออกไซด์ด้วย(ITO) ทั้งก่อนและหลังการแอนนีส..... 59
4.7	การเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเกรนระหว่าง (ก) กับ (ข)..... 60
4.8	การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาฟิล์มบาง ที่ความหนาหนา 229 nm ที่ผ่านการแอนนีสในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆกัน..... 61
4.9	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ การส่องผ่านของแสงสีขาว่า ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 62
4.10	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ.. 63
4.11	การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาฟิล์มบาง ที่ความหนาหนา 229 nm ที่ผ่านการแอนนีสในสภาวะก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิต่างๆกัน..... 64
4.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ การส่องผ่านของแสงสีขาว่า ที่อุณหภูมิต่างๆ..... 65
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ.. 66
4.14	ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm แอนนีสใน บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิ..... 67

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ การส่องผ่านของแสงสีขาวย ที่อุณหภูมิ ต่างๆ..... 68
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์มกับสภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ... 69
4.17	ภาพตัดขวางของเซนเซอร์แสง ที่ใช้รอยต่อระหว่าง ITO/n-type silicon ที่สภาพความ ต้านทานของซิลิคอน 10 Ω cm..... 71
4.18	ภาพตัดขวางของเซนเซอร์แสง ที่ใช้รอยต่อระหว่าง ITO/n-type silicon ที่สภาพความ ต้านทานของซิลิคอน 01-10 Ω cm..... 71
4.19	ระบบการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของซีดทียกี้ไดโอด ที่ไม่ได้ฉายแสง..... 72
4.20	ลักษณะของแรงดันที่ไบอัส-กระแสของรอยสัมผัสแบบซีดทียกี้..... 72
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัส-กระแสของรอยสัมผัส ITO/n-type-Silicon..... 73
4.22	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัส-กระแสของรอยสัมผัส ITO/p-type Silicon..... 73
4.23	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไบอัสกับกระแสแสงโดยความเข้มแสงมีค่าต่างๆ ของรอยต่อสัมผัส ITO/n-type Silicon..... 74
4.24	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไบอัสกับกระแสแสง โดยความเข้มแสงมีค่าต่างๆ ของรอยต่อสัมผัส ITO/p-type Silicon..... 75
4.25	กราฟค่ากระแสแสงที่ฉายแสงด้วยความเข้มแสงต่างๆ ของ ITO/n-type Silicon..... 76
4.26	กราฟค่ากระแสแสงที่ฉายแสงด้วยความเข้มแสงต่างๆ ของ ITO/p-type Silicon..... 76
4.27	ระบบการวัดความจุทางไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อ ITO/silicon..... 77
4.28	เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงทั้ง 2 โครงสร้าง..... 78
4.29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะ กับ การไบอัสแรงดัน ย้อนกลับ..... 79

สัญลักษณ์

สัญลักษณ์

c	ความเร็วแสงในสุญญากาศ
h	ค่าคงที่ของพลังค์
k	ค่าคงที่โบสตันน์
q	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
n_i	ความหนาแน่นอินทรีนซิค (Si)
μ_n	สภาพคล่องของอิเล็กตรอน (Si)
μ_p	สภาพคล่องของโฮล (Si)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ หรือ Indium tin oxide , ITO เป็นสารประกอบออกไซด์แบบ โปร่งแสงสีขาวยที่เรียกว่า “Transparent conductive oxides , TCO” และนอกจากยังมีสมบัติทางไฟฟ้า ที่เด่นคือ เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าแบบโปร่งแสง โดยถูกนำไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ได้แก่ จอคอมพิวเตอร์, จอโทรทัศน์, อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง(Optoelectronics), เซลล์ แสงอาทิตย์(solar cell) เป็นต้น สำหรับกระบวนการสร้างฟิล์มบางอาจทำได้หลายเทคนิค เช่น กระบวนการโซลเจล (sol-gel technology), การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในระบบสุญญากาศ (electron-beam evaporator system) และ สปีตเตอร์ริง (Sputtering)

งานวิจัยเกี่ยวกับการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เริ่มขึ้นตั้งแต่ พ.ศ. 2547 จนถึงปัจจุบัน เรื่อง

1. การเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปีตเตอร์ริงเพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์[1]
2. การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับพลาสติกโดยอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีตเตอร์ริงแบบ ควบคุมเวลาก๊าซ[2]
3. ฟิล์มดีบุกออกไซด์เจือสารฟลูออรีนที่เคลือบด้วยวิธีการจุ่ม[[3]

สำหรับงานวิจัยนี้ได้สร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีการสปีตเตอร์ริง แบบอาร์ เอฟ (Radio frequency(RF) sputtering) ซึ่งวิธีการนี้สามารถควบคุมความหนาแน่นนาโนเมตร แล้วนำฟิล์มไป ตรวจสอบสมบัติทางกายภาพ การส่องผ่านของแสง และ สมบัติทางไฟฟ้า เมื่อผ่านการตรวจเบื้องต้นแล้วก็จะ ทำการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มด้วยกระบวนการทางความร้อน เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะนำฟิล์มบาง อินเดียมทินออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งาน

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. พัฒนากระบวนการสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตร
2. นำฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่มีโครงสร้างระดับนาโนเมตรไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นนำไฟฟ้าโปร่ง แสงในงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3. ขอบเขตของโครงการวิจัย

1. การสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ด้วยวิธีการสเปคเตอร์แบบอาร์เอฟ บนฐานรองกระจกสไลด์ได้
2. การสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ที่เปลี่ยนแปลงความหนาของฟิล์ม
3. การวัดสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ โดยตรวจวัดสมบัติทางกายภาพ ทางไฟฟ้าและทางแสง
4. ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ด้วยกระบวนการทางความร้อน ที่แอนนีสอุณหภูมิต่างๆ คือ 200 - 500 °C
5. การแอนนีสฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่สภาวะบรรยากาศที่แตกต่างกัน ในอากาศ ก๊าซไนโตรเจน และ ก๊าซออกซิเจน
6. วิเคราะห์ผลจากการเตรียมฟิล์มและหาเงื่อนไขที่เหมาะสม ที่จะประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของตัวตรวจวัดแสง
8. สร้างอุปกรณ์ตรวจวัดแสงและทดสอบสมบัติต่างๆ เช่น ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส肖ตกี, ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน, แรงดันภายใน (V_{bi}),

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติ ข้อมูล การสร้างและวิเคราะห์ฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์และแผ่นฐานรอง
2. จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่
3. เตรียมวิธีการและดำเนินการสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ที่กำหนดช่วงเวลาในการสเปคเตอร์ต่างกัน 5, 15, 30 และ 60 นาที
4. วัดและรวบรวมข้อมูลการสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ได้แก่ ความหนา, การส่องผ่านแสง และสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า
5. ปรับปรุงสมบัติของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ด้วยการแอนนีส ที่สภาวะบรรยากาศที่ต่างกัน ในช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C
6. วิเคราะห์และสรุปผลการสร้างฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ได้แก่ ความหนา, การส่องผ่านแสง และสภาพความต้านทานทางไฟฟ้า
7. เตรียมวิธีการและดำเนินการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง
8. วัดและรวบรวมข้อมูลการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง
9. วิเคราะห์และสรุปผลการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

10. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย และเขียนรายงานฉบับสมบูรณ์

ตารางที่ 1.1 การดำเนินงานโครงการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ปี 2560												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1. ศึกษาคุณสมบัติ ข้อมูล การสร้างและวิเคราะห์ฟิล์ม อินเดียมทินออกไซด์และ แผ่นฐานรอง		←→											
2. จัดเตรียมวัสดุ อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่		←→											
3. เตรียมวิธีการและ ดำเนินการสร้างฟิล์ม อินเดียมทินออกไซด์ ที่ กำหนดช่วงเวลาในการ สเปคเตอร์ต่างกัน			←→										
4. วัดและรวบรวมข้อมูล การสร้างฟิล์มอินเดียมทิน ออกไซด์ ได้แก่ ความหนา, การส่องผ่านแสง และ สภาพความต้านทานทาง ไฟฟ้า				←→									
5. ปรับปรุงสมบัติของฟิล์ม อินเดียมทินออกไซด์ ด้วย การแอนนیل ที่สภาพ บรรยากาศที่ต่างกัน ในช่วง อุณหภูมิ 200-500 °C					←→								
6. วิเคราะห์และสรุปผลการ สร้างฟิล์มอินเดียมทิน						←→							

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ ได้แก่ ความหนา, การส่องผ่านแสง และ สภาพความต้านทานทาง ไฟฟ้า													
7. เตรียมวิธีการและ ดำเนินการสร้างอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง							←	→					
8. วัดและรวบรวมข้อมูล การสร้างอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง							←	→					
9. วิเคราะห์และสรุปผลการ สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ทางแสง											←	→	
10. สรุปผลการดำเนินงาน วิจัย และเขียนรายงานฉบับ สมบูรณ์											←	→	

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. องค์ความรู้ในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฟิล์มบางโปร่งใสระดับนาโน รวมถึงการถ่ายทอดความรู้ความเชี่ยวชาญและประสบการณ์ให้กับหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง
2. ช่วยกระตุ้นให้มีการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฟิล์มบางโปร่งใสระดับนาโน เพื่อต่อยอดองค์ความรู้ให้มีศักยภาพเกิดขึ้นภายในประเทศ
3. เป็นพื้นฐานในการวิจัยและพัฒนาเทคโนโลยีฟิล์มบางโปร่งใสระดับนาโน
4. ตีพิมพ์ผลงานวิจัยเผยแพร่ในการประชุมวิชาการระดับประเทศและระดับนานาชาติ
5. มีความร่วมมือกับพันธมิตรและพร้อมที่ปรึกษางานวิจัยและด้านเทคนิคในกลุ่มอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 เนื้อหาการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาถึงการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ระนาโน ตลอดจนการประยุกต์ใช้งานฟิล์มบางเพื่อประยุกต์งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เกี่ยวกับแสง ซึ่งงานวิจัยแบ่งออกเป็น 5 บท ด้วยดังนี้

บทที่ 1 บทนำ ประกอบด้วย ความสำคัญและที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย, วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย, ขอบเขตของโครงการวิจัย, ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย, ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ และเนื้อหาการวิจัย

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง สมบัติอินเดียมทินออกไซด์ การศึกษาโครงสร้างผลึก การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา สมบัติของฟิล์มทางแสง

บทที่ 3 กล่าวถึง การออกแบบรูปทรงเรขาคณิต, กระบวนการสร้างฟิล์มบาง และ กระบวนการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

บทที่ 4 กล่าวถึงการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ การวัดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า ตลอดจนหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเพื่อนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะที่ได้ทดลอง เริ่มตั้งแต่กระบวนการฟิล์มบาง วัดสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางแสง และการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

วัสดุของแข็งแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ตามคุณสมบัติความสามารถในการนำไฟฟ้า โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า(σ) เป็นเกณฑ์ คือ วัสดุตัวนำ วัสดุกึ่งตัวนำ และ วัสดุฉนวน

ตารางที่ 2.1 ประเภทของวัสดุ

ประเภทของวัสดุ	ค่าสัมประสิทธิ์การนำไฟฟ้า(σ)
1. วัสดุตัวนำ(conductor)	10^7 ($\Omega\text{-cm}$) ⁻¹
2. วัสดุกึ่งตัวนำ(semiconductor)	10^{-10} ถึง 10^{-20} ($\Omega\text{-cm}$) ⁻¹
3. วัสดุฉนวน(insulator)	10^{-6} ถึง 10^{-4} ($\Omega\text{-cm}$) ⁻¹

ธาตุในกลุ่มโลหะ เป็นตัวนำไฟฟ้าและความร้อนที่ดี สร้างฟิล์มบางได้ง่าย ที่ผิวโลหะเป็นมันวาว และมีข้อเสียคือลักษณะทึบแสง(ไม่ให้แสงผ่าน) ซึ่งไม่เหมาะงานที่จะในงานเซลล์แสงอาทิตย์

1. วัสดุตัวนำ ได้แก่ ทองแดง(Cu) เงิน(Ag) อลูมิเนียม(AL)
2. วัสดุสารกึ่งนำ ได้แก่ ซิลิคอน(Si) เจอมาเนียม(Ge) คาร์บอน(C)
3. วัสดุฉนวน ได้แก่ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ซิลิกอนไนไตรด์(Si₃N₄)

วัสดุตัวนำไฟฟ้าส่วนใหญ่จะเป็นโลหะ แต่ก็ยังมีสารประกอบบางชนิดที่นำไฟฟ้าได้ดีและนอกจากนั้นยังโปร่งแสงได้แก่ อินเดียมทินออกไซด์ อินเดียมออกไซด์ ซิงออกไซด์

2.1 สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide, ITO)

วัสดุตัวนำประเภทโปร่งใสได้มีการศึกษาและพัฒนาอย่างต่อเนื่อง [4-5] และมีนำไปใช้ในทางปฏิบัติจริง ได้แก่ ITO, In₂O₃, SnO₂ และ ZnO โดยเฉพาะคุณสมบัติการนำไฟฟ้า และคุณสมบัติทางด้านแสง สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเด่นที่สุด ทำให้ได้รับความสนใจนำไปใช้งานด้าน เซลล์แสงอาทิตย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ หรือ ITO ประกอบด้วยสาร 2 ตัว คือ สารอินเดียมออกไซด์ (Indium(III)oxide ; In_2O_3) ร้อยละ 90 โดยน้ำหนัก และ สารในกลุ่มทินออกไซด์(Tin oxide ; SnO หรือ SnO_2) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและแสงเด่นที่สุด

สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ เตรียมจากการเติมอะตอมดีบุก(Sn) ผสมกับสารประกอบอินเดียมออกไซด์ (Indium (III) oxide หรือ In_2O_3) และอะตอมของดีบุก(Sn) จะเข้าไปแทนที่อะตอมของอินเดียม(In) แสดงดังตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของอะตอม อินเดียม(In) และ ตะกั่ว(Sn)

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของอะตอม อินเดียม(In) และ ดีบุก(Sn)

ธาตุ	In	Sn
โครงสร้างผลึก	เตตระโกนอล	เตตระโกนอล
รัศมีอะตอม	155 pm	145 pm
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	1.78 (พอลิงสเกล)	1.96 (พอลิงสเกล)
วาเลนซ์อิเล็กตรอน	3	2,4

เมื่ออะตอมของดีบุก(Sn) แทนที่ อินเดียม(In) แล้วจะไปทำปฏิกิริยากับ อะตอมออกซิเจน(O) ได้สารตัวใหม่ คือ กลุ่มสารประกอบทินออกไซด์ ดัง สมการ (2) ได้สารประกอบทินออกไซด์(Tin(IV)oxide; SnO) และ สมการ (3) ได้สารประกอบทินออกไซด์(Tin(II)oxide; SnO_2) ทั้งเนื่องจากอะตอมของดีบุก(Sn) มีเวเลนซ์อิเล็กตรอนได้สองค่า คือ 2 และ 4 ตามลำดับ [6]



การที่อะตอมของดีบุก(Sn) มีค่าวาเลนซ์อิเล็กตรอนได้หลายค่าจะส่งผลต่อสภาพความนำไฟฟ้าของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์(ITO) แบ่งได้ 2 กรณี คือ

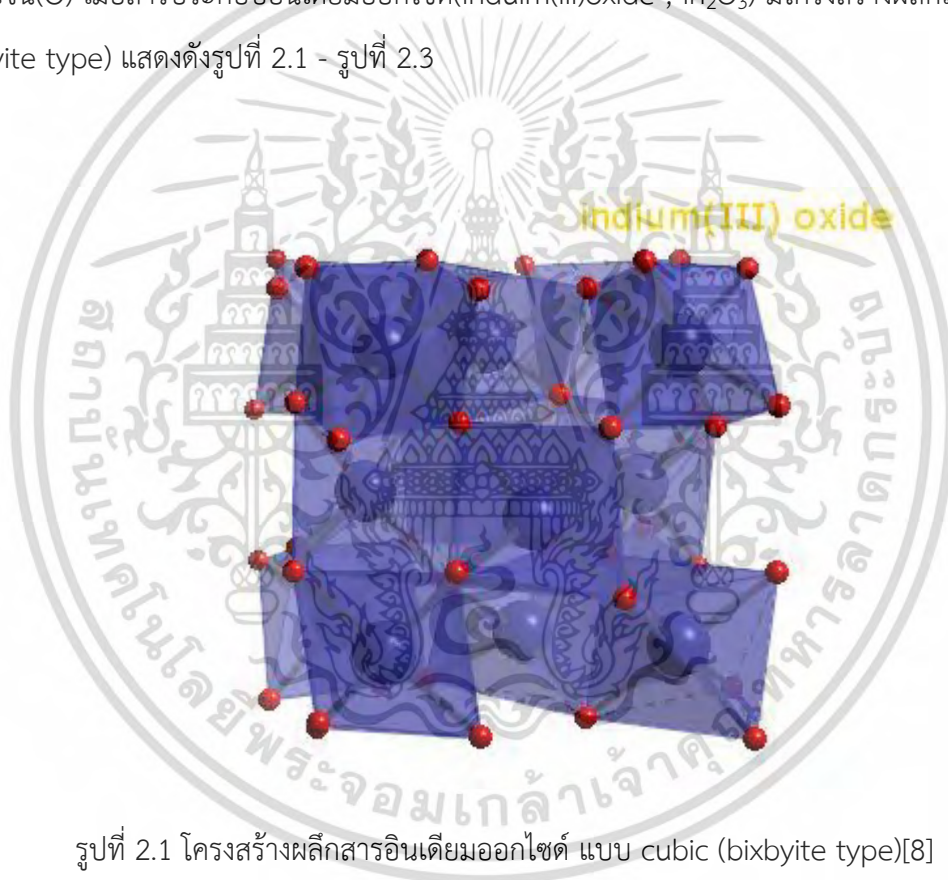
กรณีที่หนึ่ง มีค่าวาเลนซ์อิเล็กตรอน เท่ากับ 2 ได้สารประกอบ Tin(II)oxide; SnO จะทำให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้าลดลงเพราะว่าประจุพาหะของโฮลเพิ่มขึ้น

กรณีที่สอง มีค่าวาเลนซ์อิเล็กตรอน เท่ากับ 4 ได้สารประกอบ Tin(IV)oxide; SnO_2 จะทำให้ค่าสภาพความนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(n-type semiconductor) มีความกว้างแถบพลังงาน (band gap) ในช่วง 3.5-4.2 eV [7] มีคุณสมบัติทางไฟฟ้าและแสงที่ดี ได้แก่ ในช่วงเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่นที่ตามองเห็น หรือแสงสีขาวย่านได้ และ คลื่นช่วงอินฟราเรดสามารถสะท้อนได้ดี นอกจากนั้น มีสภาพนำไฟฟ้าสูง ดังนั้นลักษณะของการใช้งานสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ ได้แก่ งานทางด้านโซลาร์เซลล์(Solar cell), หน้าต่างแบบการปลดปล่อยต่ำ (Low emissivity windows), แผงแสดงผล (Flat panel display), แผงแสดงผล (Flat panel display), การประยุกต์ใช้เป็นชั้นกันสะท้อนของอุปกรณ์ เป็นต้น

2.1.1 โครงสร้างของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์(ITO)

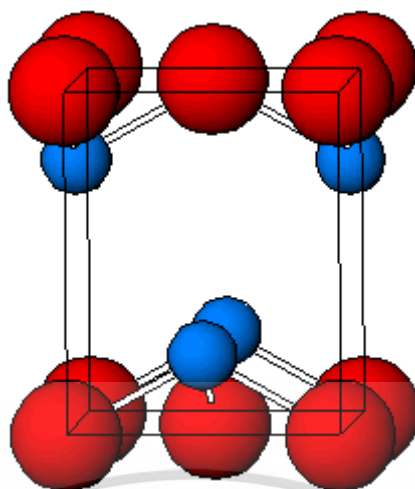
สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ ประกอบด้วยธาตุ 3 ตัว คือ อินเดียม(In), ดีบุก(Sn) และ ออกซิเจน(O) เมื่อสารประกอบอินเดียมออกไซด์(Indium(III)oxide ; In_2O_3) มีโครงสร้างผลึกแบบ cubic (bixbyite type) แสดงดังรูปที่ 2.1 - รูปที่ 2.3



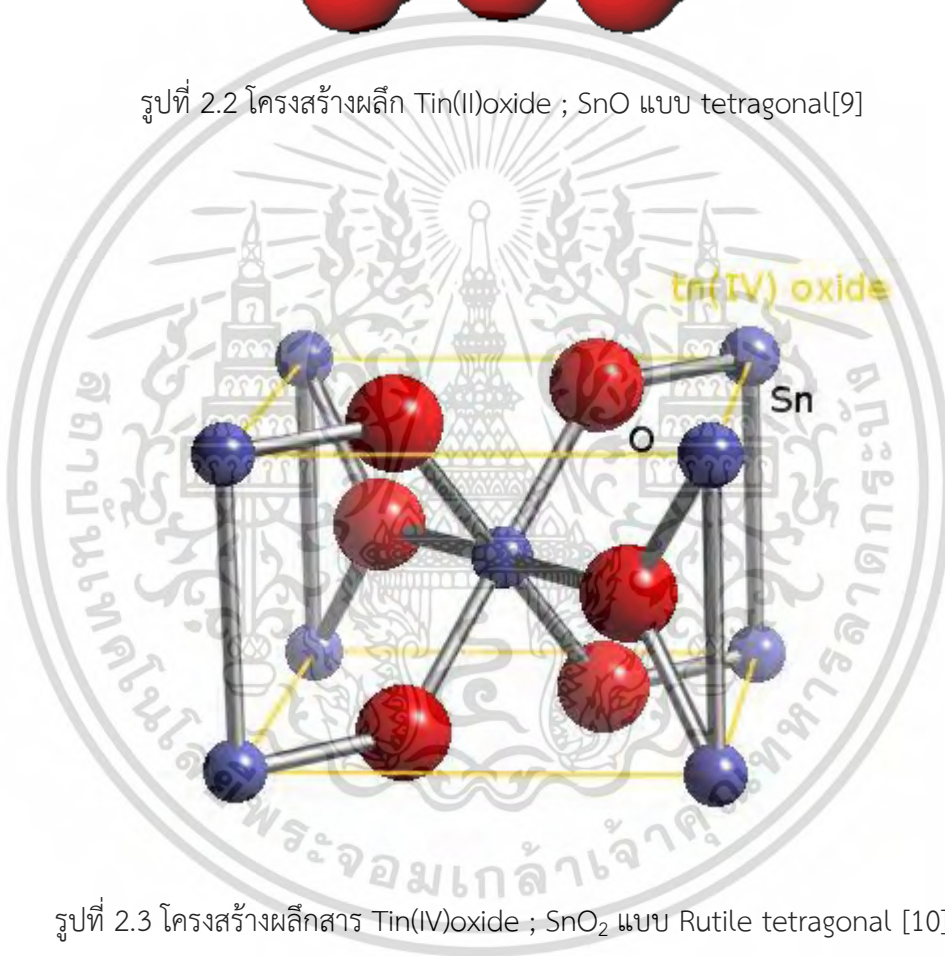
รูปที่ 2.1 โครงสร้างผลึกสารอินเดียมออกไซด์ แบบ cubic (bixbyite type)[8]

เมื่อเติมอะตอมสารเจือ ธาตุดีบุก(Sn) เข้าไปแทนที่ อินเดียม(In) แล้วดีบุกจะไปทำปฏิกิริยาไปทำกับออกซิเจน(O) ได้สารประกอบกลุ่มทินออกไซด์คือ Tin(II)oxide ; SnO และ Tin(IV)oxide ; SnO_2 ตามสมการที่ (2) และ (3)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึก Tin(II)oxide ; SnO แบบ tetragonal[9]



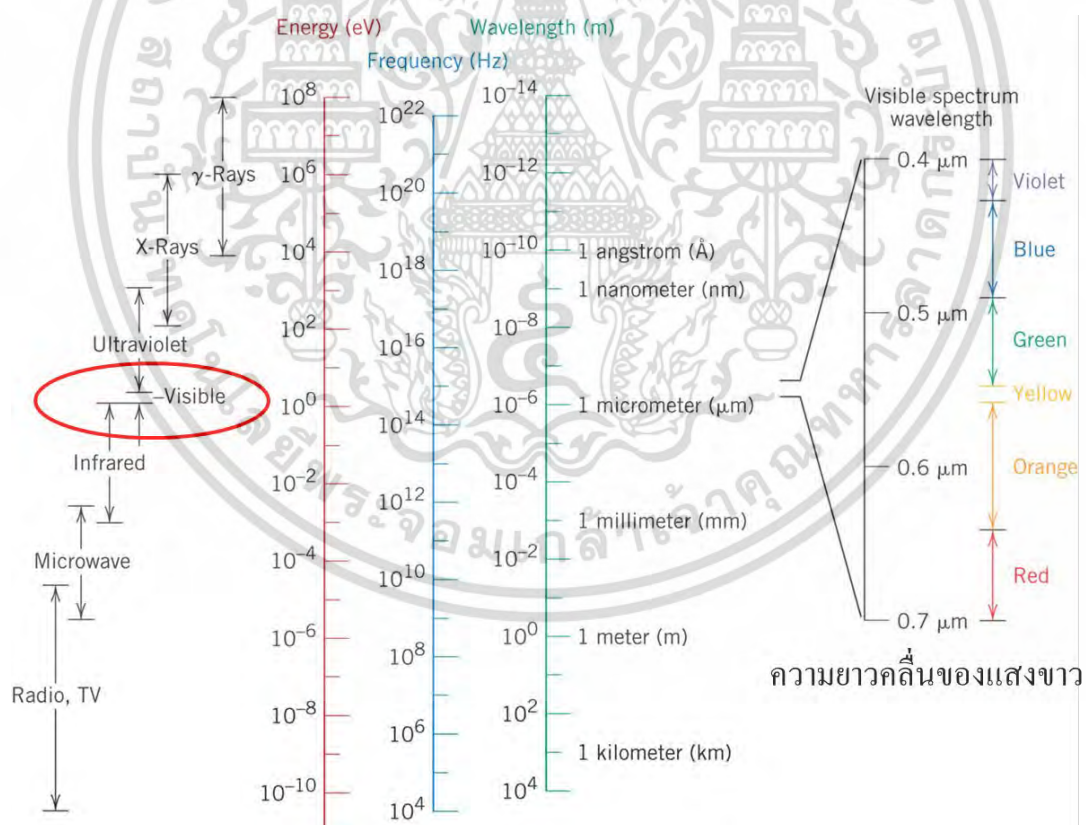
รูปที่ 2.3 โครงสร้างผลึกสาร Tin(IV)oxide ; SnO₂ แบบ Rutile tetragonal [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 สมบัติทางไฟฟ้าของสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์

สารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ เป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าและแสงส่องผ่านได้ดี สำหรับการประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะอยู่ในรูปของฟิล์มบางซึ่งเตรียมจากกระบวนการสเป็คเตอร์ริง ลักษณะของฟิล์มบางที่เตรียมได้ เป็นฟิล์มบางตัวนำไฟฟ้าโปร่งใส (transparent conducting film) มีทั้งสภาพการนำไฟฟ้าที่ดี และ แสงส่องผ่าน(transmission) ได้ในช่วงความถี่ที่ตามองเห็นได้ ซึ่งมีปัจจัยหลายอย่างของการเตรียม เช่น ความหนา อุณหภูมิ ความสมบูรณ์ของผลึก ความหนา อุณหภูมิ เป็นต้น ค่าความต้านทานในการใช้งาน $\approx 100 \text{ } \Omega\text{-cm}$ [11]

คุณสมบัติทางแสงฟิล์มบางฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์นั้นเป็นนำไฟฟ้าที่แล้ว ยังให้แสงบางช่วงความยาวคลื่นสามารถผ่านไปได้โดยเฉพาะช่วงที่ตามองเห็น(visible light) หรือ แสงสีขาว ที่มีขนาดช่วงความยาวคลื่น ระหว่าง $0.4 \text{ } \mu\text{m}$ ถึง $0.7 \text{ } \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 2.4 แต่ถ้าขนาดความยาวคลื่นมาก $1 \text{ } \mu\text{m}$ ฟิล์มจะมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงสูง และสะท้อนคลื่นความร้อนได้ การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์มีค่าสูงกว่าร้อยละ 80 และมีค่าดัชนีหักเห(index of refraction; n) 1.95



รูปที่ 2.4 แถบสเปกตรัมของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[12]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

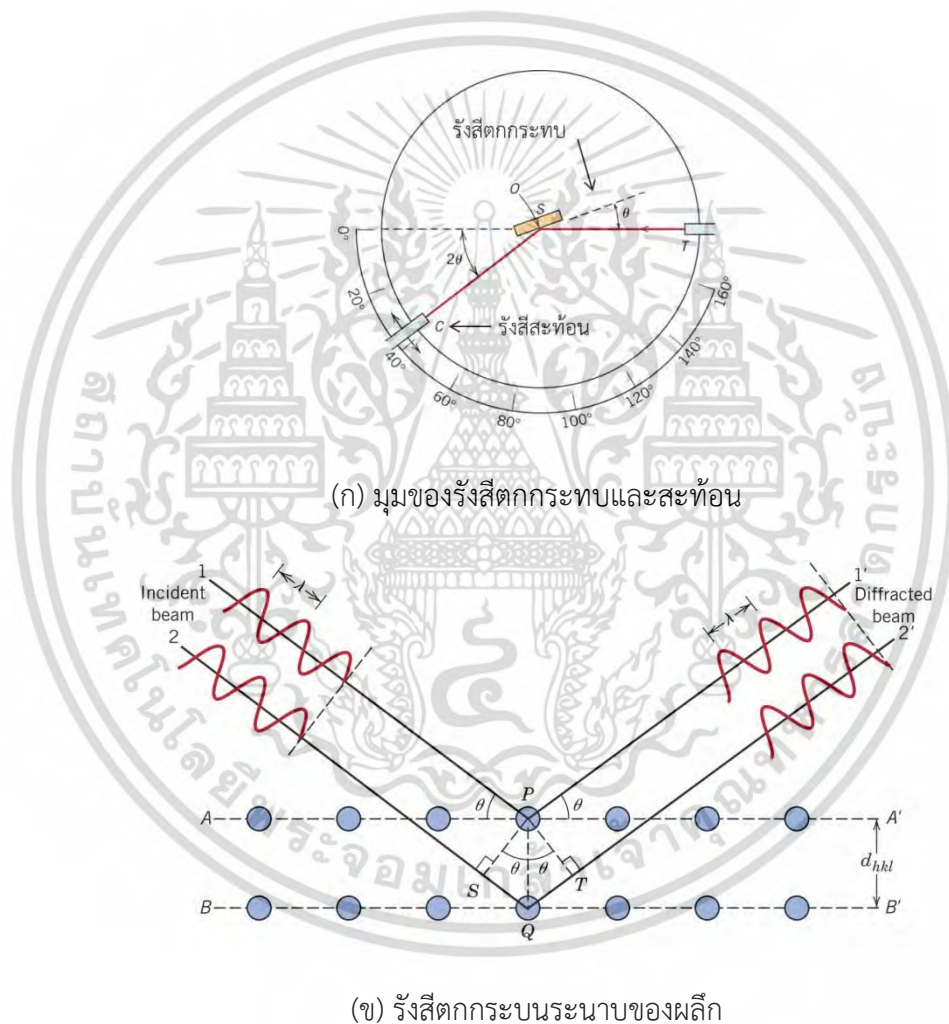
2.2 การตรวจสอบโครงสร้างผลึก

2.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray diffraction ; XRD)

[13]

รังสีเอกซ์(X-Ray) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นระหว่าง 0.05 - 0.25 nm ซึ่งขนาดความยาวของรังสีเอกซ์มีค่าใกล้เคียงกับระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกของแข็ง

การตรวจสอบเอกลักษณ์ของวัสดุด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction ; XRD) เป็นเทคนิคที่มุมรังสีเอกซ์ตกกระทบ(θ)เท่ากับมุมสะท้อน(θ) แสดงดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แบบจำลองการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์บนระนาบของผลึกตามกฎของแบรกก์[12]

ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1900 แบรกก์(Bragg) ได้นำเสนอคิดว่าวัสดุผลึกจะประกอบด้วย ชั้น (Layer) ของอะตอม หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอม ที่คลื่นที่ตกกระทบและคลื่นสะท้อน โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อนนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมสะท้อน ลักษณะของคลื่นที่สะท้อนออกมาจากระนาบต่าง ๆ จะมีความเข้มไม่เท่ากันขึ้นมุม และความแตกต่างของระยะเดินทาง (Path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ข้างเคียงมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ดังรูปที่ 2.5 และรูปที่ 2.6 ซึ่งได้ความสัมพันธ์ดังสมการ (2.4)

การตรวจสอบเอกลักษณ์ของโครงสร้างผลึกต้องความรู้พื้นฐานด้านผลึกวิทยา(Crystallography) ซึ่งการตรวจสอบด้วยรังสีเอกซ์เป็นตรรกะวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแบบไม่ทำลาย ที่สามารถบ่งชี้โครงสร้างผลึก ส่วนประกอบของวัสดุ ลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมของวัสดุ ทั้งเชิงปริมาณ และ เชิงคุณภาพ เครื่องที่ใช้เรียกว่า “เครื่องเอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชัน (X-ray diffraction ; XRD)” ซึ่งมีความสำคัญมากในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกและเอกลักษณ์ของวัสดุ

ในช่วงต้นปี ค.ศ. 1900 แบริก(Bragg) ได้นำเสนอคิดว่าวัสดุมีผลึกจะประกอบด้วย ชั้น (Layer) ของอะตอม หรือ ระนาบ (Plane) ของอะตอม ที่คลื่นที่ตกกระทบและคลื่นสะท้อน โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ลักษณะของคลื่นที่สะท้อนออกมาจากระนาบต่าง ๆ จะมีความเข้มไม่เท่ากันขึ้นมุมและแทรกสอดแบบเสริมกัน และความแตกต่างของระยะเดินทาง (Path difference) ของคลื่นที่สะท้อนจากระนาบที่อยู่ลำดับถัดไปจะมีค่าเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นที่ตกกระทบ ตามสมการที่ (2.4) แสดงดังรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6

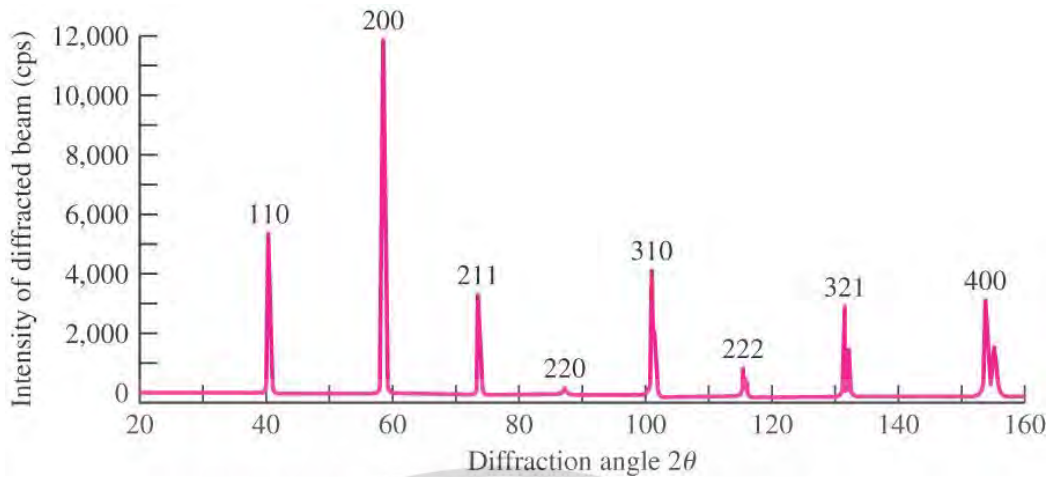
$$2d_{hkl}\sin\theta = n\lambda \quad (2.4)$$

d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมตกกระทบ และมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นเลขจำนวนเต็ม ($n = 1, 2, 3, \dots$)

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



รูปที่ 2.6 การตรวจสอบโครงสร้างของผลึกธาตุของทังสเตน[12]

ค่าคงที่ของโครงผลึก(lattice constant ; a) มีความสัมพันธ์กับ ระยะห่างระหว่างระนาบ (d_{hkl}) ดังสมการที่ (2.5) แล้วสมการไปแทนที่ สมการ(2.4) ได้ความสัมพันธ์ตามสมการ (2.6) และสมการ (2.7) ตามลำดับ

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (2.5)$$

$$\frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} 2\sin\theta = n\lambda \quad (2.6)$$

กำหนดให้ $n = 1$

$$\frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} 2\sin\theta = \lambda \quad (2.7)$$

จากกฎของแบร็ก (Bragg's law) จะสามารถคำนวณหาระยะห่างระหว่างระนาบได้ โดยปกติแล้วของแข็งที่เป็นผลึกจะมีโครงสร้างที่แน่นอน โดยผลึกจะประกอบด้วยอะตอม ไอออน หรือโมเลกุล ที่เรียงตัวกับอย่างเป็นระเบียบมีการซ้ำกันเกิดขึ้นในพิภคระยะไกลในทุกทิศทาง มีมุมและระยะห่างระหว่างอะตอมที่แน่นอน โดยจะศึกษาในรูปแบบโครงข่าย (Lattice) ที่มีรูปร่างที่แน่นอน

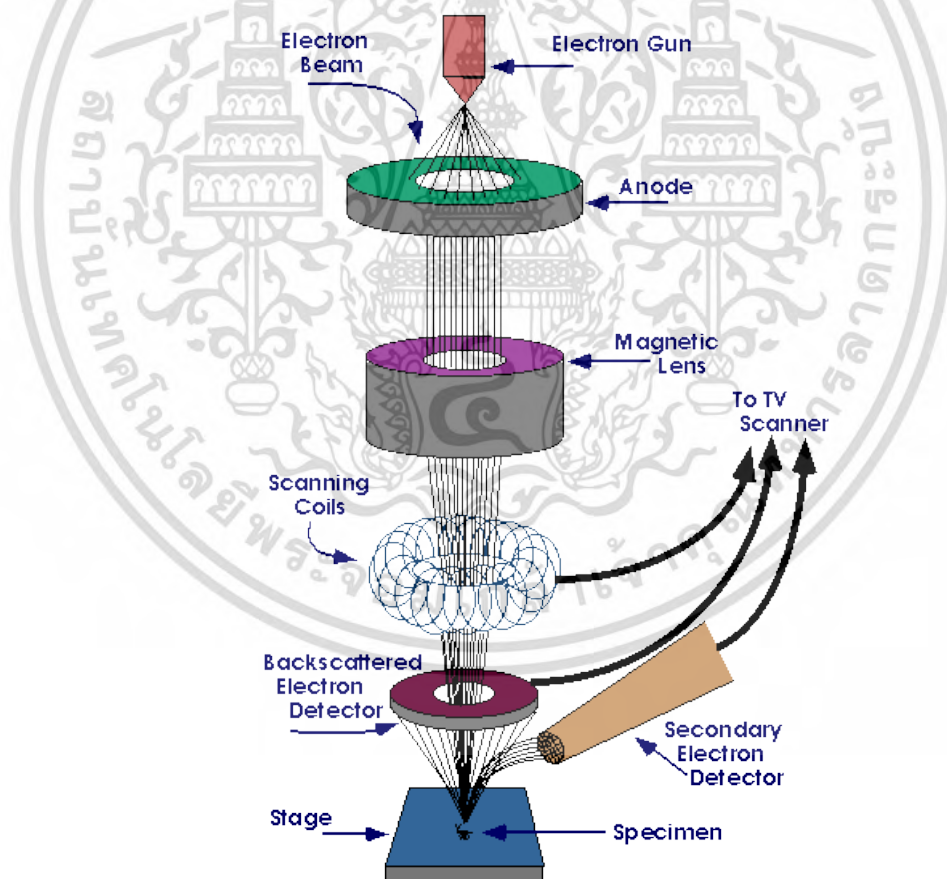
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

Scanning electron microscope (SEM) หรือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เป็นกล้องสำหรับตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของวัสดุ ที่ระดับโครงสร้างระดับไมครอน โดยใช้ลำอิเล็กตรอนแบบส่องกวาดไปผิวของวัสดุ ที่มีความละเอียดและกำลังขยายสูงมากระดับ 50,000X เท่า หรือ มากกว่า

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดประกอบด้วย แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน เลนส์แม่เหล็ก ส่วนแสดงผล และ ระบบสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.7

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เริ่มจากลำอิเล็กตรอนที่ได้จากผลิตจากไส้หลอด ผ่านไปยังขั้วแอโนดและอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและต่อจากนั้นถูกโฟกัสด้วยสนามแม่เหล็ก(Magnetic Lens) เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนตกลงบนผิวของวัสดุ(Specimen) พอดีตามแนวระนาบ(แกน xy) และสุดท้ายเป็นส่วนการแสดงผลได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattering electrons) ซึ่งวัดด้วยเซนเซอร์(Sensor) ส่งออกไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและสัญญาณภาพตามลำดับ



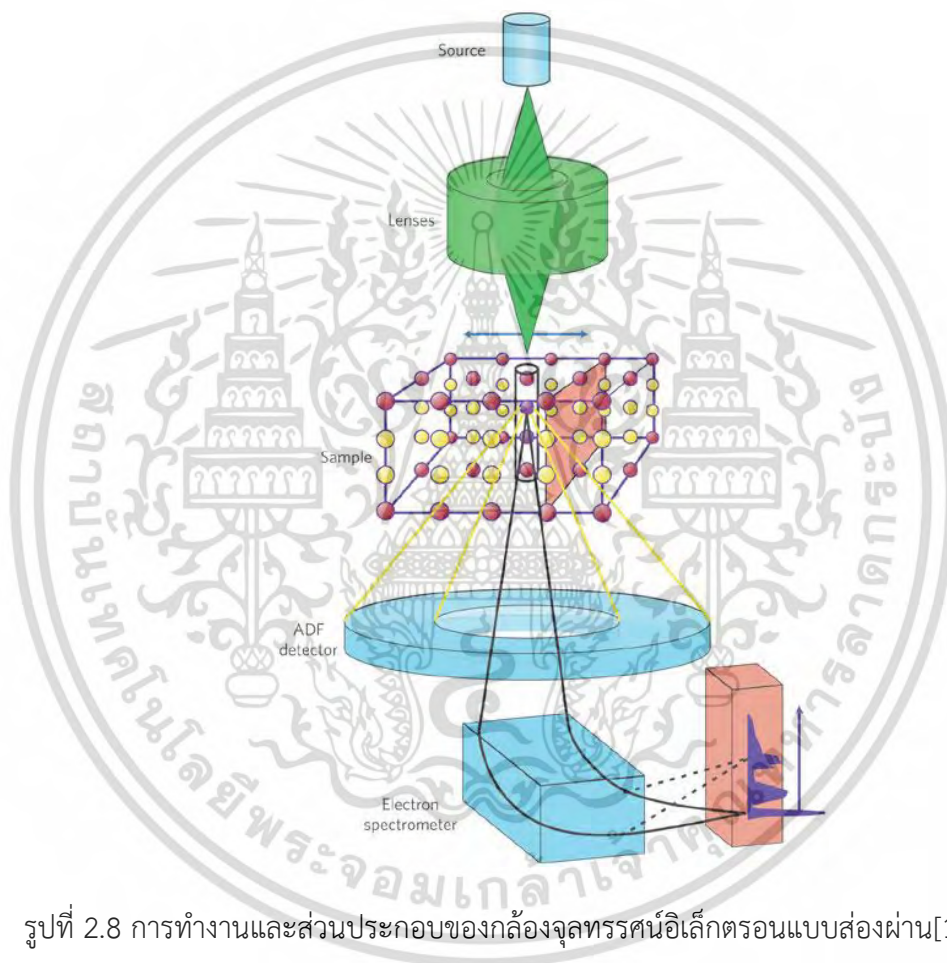
รูปที่ 2.7 การทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด[14]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.3 การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างภายในด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน

Transmission Electron microscope(TEM) หรือ กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เป็นกล้องที่ใช้ศึกษาลักษณะภายในของวัสดุ ซึ่งตัวชิ้นวัสดุต้องมีขนาดบางมากพอที่จะทำให้ลำอิเล็กตรอนนั้นสามารถทะลุผ่านชิ้นงานได้ มีความหนา ประมาณ 60 – 90 ไมครอน ซึ่ง TEM นี้จะให้กำลังขยายและความละเอียดสูงมาก ราว 500,000X - 1,000,000X เท่า

ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านประกอบด้วย แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน เลนส์แม่เหล็ก ส่วนแสดงผล และ ระบบสุญญากาศ ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การทำงานและส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน[15]

หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน เริ่มจากลำอิเล็กตรอนที่ได้จากผลิตจากไส้หลอด ผ่านไปยังขั้วแอโนดและอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าและต่อจากนั้นถูกโฟกัสด้วยสนามแม่เหล็ก(Magnetic Lens) เพื่อให้ลำอิเล็กตรอนตกลงบนผิวของวัตถุ(Specimen) พอดีตามแนวระนาบ(แกน xy) และสุดท้ายเป็นส่วนการแสดงผลได้จากอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Backscattering electrons) ซึ่งวัดด้วยเซนเซอร์(Sensor) ส่งออกไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและสัญญาณภาพตามลำดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แหล่งกำเนิดลำอิเล็กตรอน นั้นสร้างจากปืนอิเล็กตรอน(Electron Gun) .และเคลื่อนตามสนามไฟฟ้าในระบบสุญญากาศ และ ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมด้วยด้วยเลนส์

แม่เหล็กไฟฟ้า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นเลนส์ที่ก่อนอยู่วัตถุที่ต้องตรวจสอบ หรือ เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรก เป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่ควบคุมลำอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากแหล่งปืนอิเล็กตรอนให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดตามต้องการ

เลนส์วัตถุ (Objective lens) หรือเลนส์หลังวัตถุ เป็นเลนส์ชุดที่สอง ใช้สำหรับโฟกัสลำอิเล็กตรอนไปตกบริเวณพื้นผิวที่กำหนดหรือ ต้องการ อาจจะสะท้อนหรือผ่านวัตถุออกมา

กรณีที่เป็น SEM ลำอิเล็กตรอนจะสะท้อน

กรณีที่เป็น TEM ลำอิเล็กตรอนจะส่องผ่าน

ที่บริเวณพื้นที่ผิวของวัตถุที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนนี้ จะมีสัญญาณทางไฟฟ้า (Signal) หลากหลาย ซึ่งสัญญาณเหล่านี้จะถูกตรวจจับเซนเซอร์ แล้วทำการประมวลผลเป็นภาพแสดง ตัวอย่างสัญญาณที่เกิดขึ้น ได้แก่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ อิเล็กตรอนทะลุผ่าน รังสีเอ็กซ์ (X-rays)

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ หรือ Secondary electrons คืออิเล็กตรอนที่หลุดออกจากวงโคจรของอะตอมของวัตถุ อันผลมาจากการชนของ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ หรือ Primary electrons ซึ่งเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำ และ อิเล็กตรอนของทุติยภูมิมีค่าพลังงานน้อย

อิเล็กตรอนกระเจิงกลับ หรือ Backscattering electrons คืออิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electrons) เอง ที่ไม่ชนกับอิเล็กตรอนของในวงโคจร แต่อิเล็กตรอนปฐมภูมิ ก็ต้องสูญเสียพลังงานบางส่วนให้กับอะตอมแล้วกระเจิงกลับออกมา ซึ่งจะเกิดได้ดีกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง

อิเล็กตรอนทะลุผ่าน หรือ Transmitted electrons คือ อิเล็กตรอนปฐมภูมิ ที่ไม่มีอันตรกิริยาใดๆกับอะตอมและอิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอม ทำให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านออกมาได้

รังสีเอ็กซ์ หรือ X-rays คือ อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในของวงโคจรถูกชนจนหลุดออกวงโคจรของอะตอม โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิ แล้วเกิดการแทนที่ของอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรที่สูงกว่า ทำให้เกิดการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ออกมามีค่าหนึ่ง ซึ่งเป็นค่าจำเพาะขึ้นกับชนิดวัตถุ

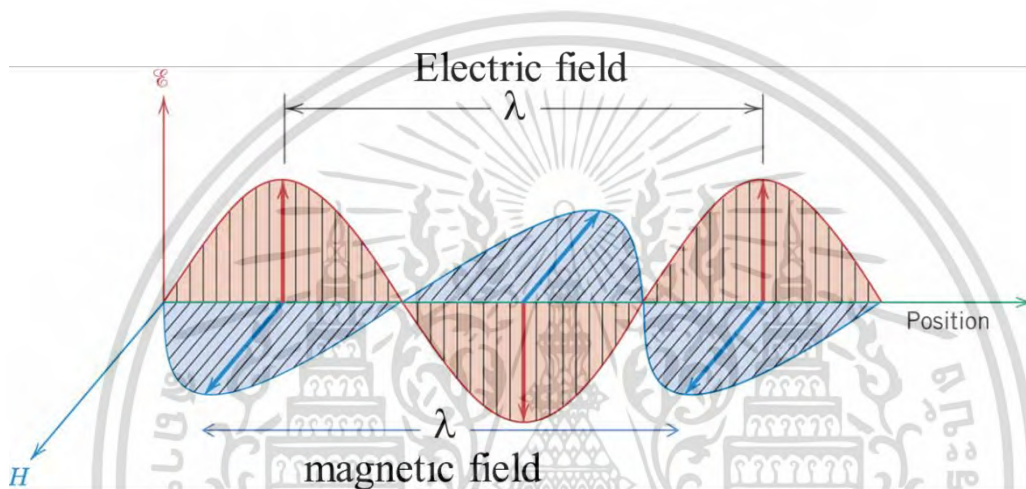
อิเล็กตรอนที่ถูกดูดกลืน หรือ Absorbed electrons ในวัตถุตัวอย่างที่ทดสอบ เป็นอิเล็กตรอนที่สูญเสียพลังงานให้กับอะตอมในวัตถุตัวอย่างทั้งหมด

2.2.4 การตรวจวัดสมบัติของฟิล์มทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง หรือ แสงขาว เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 0.4 – 0.7 μm ที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นสีแสงได้(สี แดง ส้ม เหลือง เขียว น้ำเงิน และ ม่วง)

เมื่อแสงไปตกกระทบวัสดุ วัสดุจะตอบสนองต่อคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่นแสงสีขาว ในทางสาขาวิชาฟิสิกส์ยุคเก่า(classical physics) แสงมีพฤติกรรมเป็นคลื่น ที่ประกอบด้วย คลื่นสนามไฟฟ้า และ คลื่นสนามแม่เหล็ก ที่มีทิศทางตั้งฉากต่อกันและกัน ดังรูปที่ 2.9 ได้แก่ คลื่นความร้อน คลื่นวิทยุ รังสีเอกซ์ รังสีแกมมา เป็นต้น



รูปที่ 2.9 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า[12]

แต่แนวความคิดทางฟิสิกส์ยุคใหม่(modern physics) หรือ กลศาสตร์ควอนตัม(quantum mechanics) มองว่าการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ไม่ได้มีลักษณะเป็นคลื่น แต่เป็นก้อนพลังงาน ที่เรียกว่า โฟตอน(photon) โดยที่โฟตอนนั้น มีค่าพลังงานที่แน่นอนและมีค่าตัวเลขได้เพียงบางค่าเท่านั้น หาได้จากความสัมพันธ์ของสมการ

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (2.8)$$

โดยที่ E ค่าพลังงานโฟตอน

h ค่าคงที่ของพลังค์ (6.63×10^{-34} J-s)

ν ค่าความถี่

c ความเร็วแสง

λ ค่าความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อคลื่นแสงเดินทางผ่านตัวกลางที่เป็นอากาศไปยังอีกตัวกลางเป็นของแข็ง จะเกิดปรากฏการณ์ ดังสมการ (2.9) และรูปที่ 2.10 ผลของแสงที่เกิดขึ้นได้แก่ แสงส่งผ่าน แสงถูกดูดกลืน แสงสะท้อน แสง กระจิง

$$I_0 = I_T + I_A + I_R + I_S \quad (2.9)$$

วัสดุของแข็งที่ยอมให้แสงส่งผ่านได้ปริมาณมาก จัดเป็นวัสดุโปร่งใส(transparent) แต่วัสดุที่ให้ แสงส่งผ่านได้แต่มีการกระจายตัวของแสงในเนื้อวัสดุ จัดเป็นวัสดุโปร่งแสง(translucent) ส่วนวัสดุที่ไม่ ยอมให้แสงส่งผ่านเลย จัดเป็นวัสดุทึบแสง(opaque)

พารามิเตอร์ของแสงที่ส่องผ่านฟิล์ม ได้แก่ แสงที่ส่องผ่าน ดัชนีหักเห การดูดกลืนของ ซึ่งจะ สัมพันธ์กับกับความยาวคลื่น



รูปที่ 2.10 การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์ม

I_0 = ความเข้มของแสงที่ตกกระทบ

I_T = ความเข้มของแสงที่ส่งผ่าน

I_A = ความเข้มของแสงที่ดูดซับ

I_R = ความเข้มของแสงที่สะท้อน

I_S = ความเข้มของแสงที่กระจิง

สภาพส่องผ่านแสง(transmittivity) ดังสมการ (2.10)

$$T = \frac{I_T}{I_0} = \frac{(1 - R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (2.10)$$

สภาพสะท้อน(reflectivity) ดังสมการ (2.10)

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n - 1)^2 + k^2}{(n + 1)^2 + k^2} \quad (2.11)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

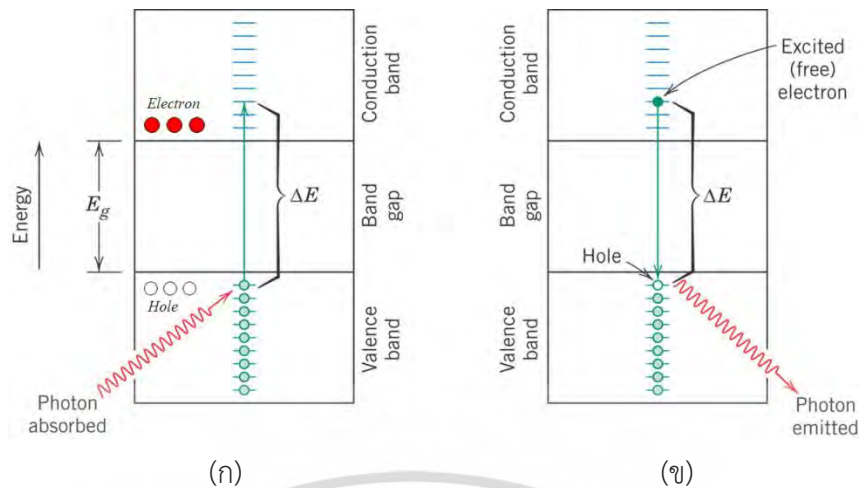
T	คือ	สัมประสิทธิ์การส่องผ่าน
R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อน
α	คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
n	คือ	ดัชนีหักเห

2.3 โฟโตไดโอด (photo diode)[16-18]

โฟโตไดโอด หรือ เซนเซอร์แสง(photo sensor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่แปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าประเภทหนึ่งของ อุปกรณ์ตรวจจับแสง ได้แก่ มักใช้ตรวจจับความเข้มแสงในงานทางด้านวิทยาศาสตร์และในอุตสาหกรรมที่ต้องการ ความแม่นยำสูง สารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาทำเป็นโฟโตไดโอด ได้แก่ ซิลิคอน อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์เจอร์มาเนียม, แกลเลียมไนไตรด์ และซิลิคอนคาร์ไบด์ เป็นต้น สำหรับตัวเซนเซอร์แสงที่จะกล่าวในที่นี้ได้แก่ โฟโตคอนดักเตอร์ โฟโตไดโอดแบบรอยต่อ pn โฟโตไดโอดแบบ p-i-n โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์

2.3.1 โฟโตคอนดักเตอร์(photoconductor)

โฟโตคอนดักเตอร์ เป็นเซนเซอร์แสงชนิดหนึ่งที่มีอาศัยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานของสารกึ่งตัวนำเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ดังรูปที่ 2.11 แสดงแถบพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่มีการดูดโฟตอนและคลายโฟตอน การดูดซับพลังงานจากโฟตอนแสงทำให้เกิดการกระตุ้นคู่อิเล็กตรอน-โฮล-อิเล็กตรอนและอิเล็กตรอนอยู่ในชั้นวาเลนซ์แบนด์ กระโดดข้าม แถบพลังงานต้องห้าม(band gap) มายังชั้น คอนดักชันแบนด์ ส่งผลให้ค่าความต้านทานลดลง และทำให้โฟโตเซนเซอร์นำกระแสไฟฟ้าได้มากขึ้น



รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของซิลิคอนบริสุทธิ์ ที่มีการดูดโฟตอนและคลายโฟตอน[12]

(ก) กลไกการดูดซับพลังงานโฟตอนของซิลิคอนเมื่อมีแสงมาตกกระทบทำให้เกิดคู่ โฮล-อิเล็กตรอน

(ข) กลไกการคลายพลังงานในรูปขอโฟตอนที่ตกลงมาชั้นวาเลนซ์แบน

2.3.2 pn โฟโตไดโอด

pn โฟโตไดโอด เป็นไดโอดชนิดหนึ่ง ของสารกึ่งตัวนำที่รอยต่อประกอบด้วย ซิลิคอนชนิดพี (p-type silicon) และ ซิลิคอนชนิดเอ็น(n-type silicon)

ซิลิคอนชนิดพี เกิดจากการเจือธาตุในหมู่ V ลงในหมู่ IV จะได้อิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนใหญ่ และ ซิลิคอนชนิดพีเกิดจากการเจือธาตุในหมู่ III ลงในหมู่ IV จะได้โฮลเป็นพาหะส่วนใหญ่

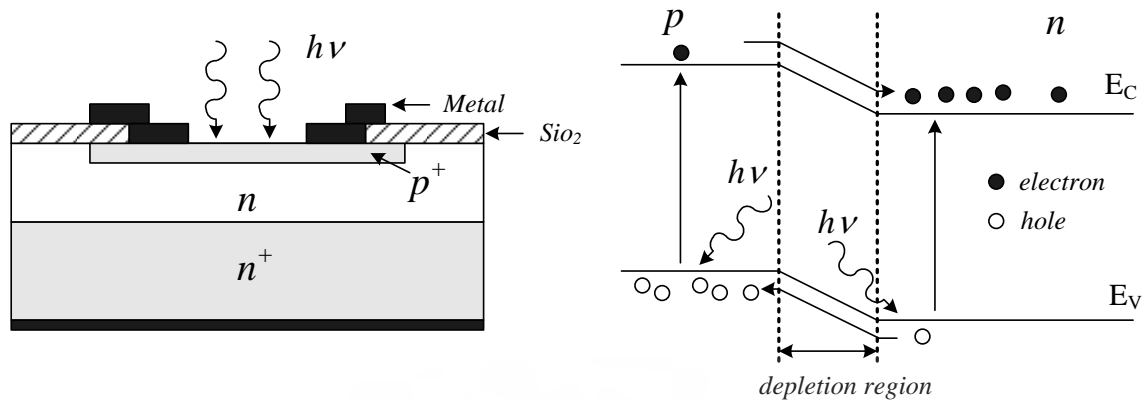
ที่บริเวณรอยต่อ pn ของไดโอด ดังรูปที่ 2.12 พบว่าโฮลเป็นพาหะหลักในซิลิคอนชนิดพีและพบว่าอิเล็กตรอนเป็นพาหะหลักในซิลิคอนชนิดเอ็น โดยที่โฮลและอิเล็กตรอนจะแพร่เข้าหากันและเกิดการรวมตัวตรงบริเวณรอยต่อ ส่งผลให้ไม่ประจุไฟฟ้า(มีความเป็นกลางทางไฟฟ้า) เรียกว่า “เขตปลอดพาหะ” (depletion region)

เมื่อมีการตัวของ โฮล-อิเล็กตรอน จะทำให้ซิลิคอนชนิดพีมีจำนวนโฮลลดลงและเกิดไอออนลบ ในส่วนของซิลิคอนชนิดเอ็นจะเกิดไอออนบวก ที่บริเวณรอยต่อ pn จะเกิดสนามไฟฟ้าอันเนื่องมีไอออนลบและไอออนบวก

ที่รอยต่อของ pn มีแสงมาตกกระทบแล้วส่งผลให้มีการกระตุ้นให้เกิดคู่ โฮล-อิเล็กตรอน โดยที่คู่โฮล-อิเล็กตรอน จะเคลื่อนที่ไปตามทิศทางของสนามไฟฟ้าที่ข้ามบริเวณรอยต่อ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลได้

การไหลของกระแสที่รอยต่อ pn สามารถนำไปประยุกต์ใช้เช่น เซอร์ทรูวาวด์แสงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



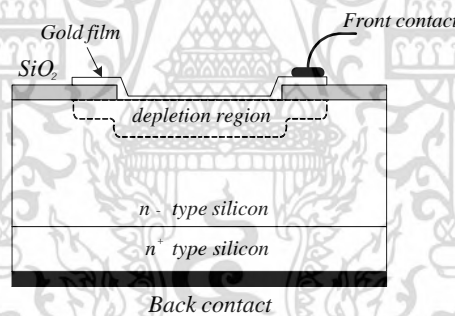
ก. ภาพตัดขวาง

ข. แถบพลังงาน

รูปที่ 2.12 โครงสร้างของไดโอดแบบพีเอ็น

2.3.3 ซ็อตทีย์ไดโอด (schottky diode)

ซ็อตทีย์ไดโอด เป็นไดโอดชนิดหนึ่งที่ประกอบด้วย โลหะและสารกึ่งตัวนำ ที่ทำให้กระแสไหลได้ทิศทางเดียว ลักษณะโครงสร้างของซ็อตทีย์ไดโอด ดังรูปที่ 2.13 โดยชั้นฟิล์มของโลหะจะอยู่บนสุด(เสมือนเป็น ซิลิคอนชนิดพี) ที่ต่อกับเนื้อซิลิคอนชนิดเอ็น



รูปที่ 2.13 ภาพโครงสร้างตัดขวางซ็อตทีย์ไดโอด

ชั้นฟิล์มโลหะที่ใช้ต้องเป็นฟิล์มบางมาก ๆ (ที่ระดับนาโน) ที่แสงสามารถส่องผ่านได้ไปยังสารกึ่งตัวนำได้ ในสภาวะที่ ซ็อตทีย์ไดโอด ได้รับแรงดันย้อนกลับ (reverse bias) ทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะได้ฟิล์มโลหะ เมื่อโฟตอนของแสงทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะบางมาได้จะไปกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ทำให้กระแสไหลผ่านรอยต่อได้ แต่อย่างไรก็ตามลักษณะการดูดกลืนของแสงได้ช่วงแคบ ขึ้นกับความหนาของฟิล์มโลหะ

ดังนั้นรอยต่อที่สัมผัสระหว่างฟิล์มโลหะและสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้ตามสมบัติทางไฟฟ้า คือ รอยสัมผัสแบบซ็อตทีย์ (schottky contact) และ รอยสัมผัสแบบโอห์มมิก (ohmic contact)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

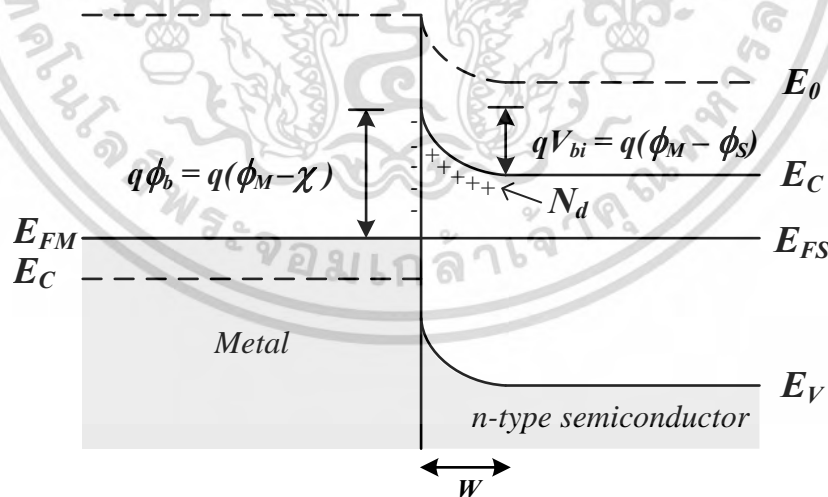
ในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังรูปที่ 2.14(ข) ะเฟอร์มิ(E_{FS}) จะอยู่ในช่องแถบพลังงาน ต้องห้าม(band gap) ซึ่งสูงกว่า E_i และต่ำกว่า E_C ดังนั้นฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ($q\phi_S$) คือผลต่างของ ระดับพลังงานสุญญากาศ(E_0) กับระดับเฟอร์มิ (E_{FS}) ได้ดังสมการ

$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2.13)$$

ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity : χ) คือ ผลต่างของพลังงานระดับสุญญากาศ กับ ระดับพลังงานแถบนำไฟฟ้า(E_C)

$q\chi$ เป็นค่าพลังงานที่อิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า(E_C) เพื่อที่จะเคลื่อนที่ ไปผิวแล้วเกิดการหยุดนิ่งที่ผิวสารกึ่งตัวนำ

การพิจารณาจากแถบพลังงานของโลหะ และแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิด รอยต่อสัมผัสในทางทฤษฎี ที่ค่าฟังก์ชันงานของโลหะ ($q\phi_M$) มีค่าสูงกว่าค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิด เอ็น ($q\phi_S$) ดังรูป 2.15 ลักษณะของแถบพลังงานเป็นเส้นตรงปกติ แต่ต่อมาเกิดรอยต่อสัมผัส และค่ามีค่า ฟังก์ชันงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำไม่เท่ากัน ก่อให้เกิดการถ่ายเทประจุของสารทั้งตรงบริเวณรอยต่อ สัมผัส โดยที่อิเล็กตรอนฝั่งสารกึ่งตัวนำแพร่เข้าไปฝั่งของโลหะ เนื่องระดับพลังงานระดับเฟอร์มิของสารกึ่ง (E_{FS}) ต่ำกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิโลหะ(E_{FM}) ก่อให้เกิดไอออนบวก(N_d) อยู่ตรงอยู่บริเวณรอยสัมผัส ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และมีเขตปลอดพาหะความกว้าง W ดังรูป 2.16



รูปที่ 2.15 โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อสัมผัสระหว่างโลหะ กับ สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

ที่สภาวะสมดุลทางความร้อน ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำจะอยู่ใน ระดับเดียวกันตลอดแนว และเกิดการโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น คือ กำแพง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศักย์ภายใน (potential barrier, V_{bi}) เพื่อป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะ กับ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังสมการที่ 2.14

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

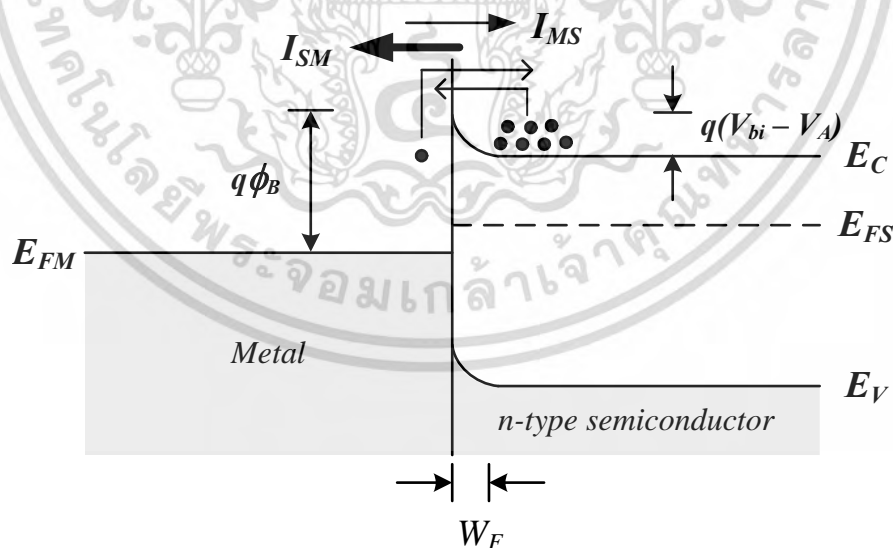
นอกจากนั้นพบว่า กำแพงพลังงานศักย์ที่ผิว หรือ กำแพงชอตต์กี หรือ (schottky barrier, ϕ_B) เท่ากับความสูงของกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนฝั่งโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังฝั่งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ดังสมการ 2.14

$$q\phi_B = q(\phi_M - \chi) \quad (2.15)$$

2.3.5 รอยสัมผัสชอตต์กีขณะได้รับไบอัส

2.3.5.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง

เมื่อทำการไบอัสตรง (V_A) ที่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะต่อกับขั้วเป็นบวก และด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นต่อกับขั้วลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.16 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $V_{bi} - V_A$ และ บริเวณเขตปลอดพาหะจะลดลง



รูปที่ 2.16 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง $+V_A$

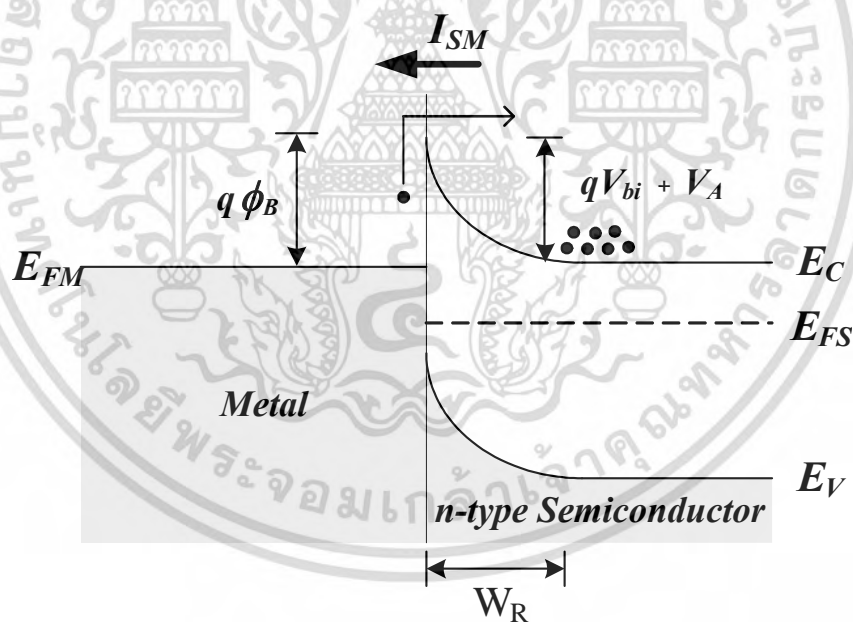
$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bi}}{KT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{KT}\right) - 1\right] \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่	A	คือ	พื้นที่ของรอยสัมผัส (cm^2)
	R	คือ	ค่าคงตัวริชาร์ดสัน ($110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$, n-type Silicon)
	ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกี
	q	คือ	ค่าประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน ($1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$)
	k	คือ	ค่าคงที่โบสต์ของมันน์ ($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

2.3.5.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (V_A) ที่รอยสัมผัสโดยให้ด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นต่อกับขั้วบวก และด้านโลหะต่อกับขั้วเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าเพิ่มเป็น $V_{bi} + V_A$ และ บริเวณเขตปลอดพาหะจะขยายเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.17 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bi}}{KT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{KT}\right) - 1\right] \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้สารกึ่งตัวนำซิลิคอน

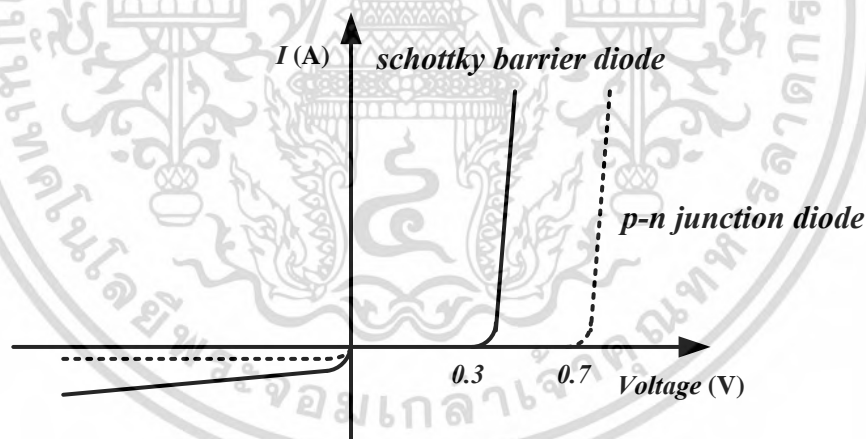
q คือ ค่าประจุไฟฟ้า 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น

2.3.5.3 สมบัติด้านกระแส – แรงดัน(I-V) ที่รอยสัมผัส肖ตกี

ที่บริเวณรอยสัมผัสระหว่าง โลหะกับ สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น เป็นลักษณะของรอยสัมผัสที่เป็น เรคตีไฟร์ มีลักษณะคล้ายกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดไดโอดรอยต่อแบบพีเอ็น (p-n junction diode) ที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทิศทางเดียวเท่านั้น เมื่อให้แรงดันไบอัสตรง แต่ถ้าให้แรงดันไบอัสกลับขั้วหรือ แรงดันย้อนกลับ จะไม่มีกระแสไหลตรงรอยต่อ หรือ ไหลน้อยมาก(กระแสรั่ว) ดังรูปที่ 2.18 พบว่าแรงดันไบอัสตรง ที่รอยต่อ肖ตกีไดโอด จะเริ่มนำกระแสที่ ค่าแรงดันประมาณ 0.3 V ในขณะที่ไดโอดรอยต่อแบบพีเอ็น ที่ค่าประมาณ 0.7 V จึงจะเริ่มมีกระแสไหลได้ และค่ากระแสที่ไหลเป็นกระแสประจุพาหะส่วนมาก



รูปที่ 2.18 การเปรียบเทียบสมบัติทางไฟฟ้าระหว่าง肖ตกีไดโอด กับ ไดโอดรอยพีเอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

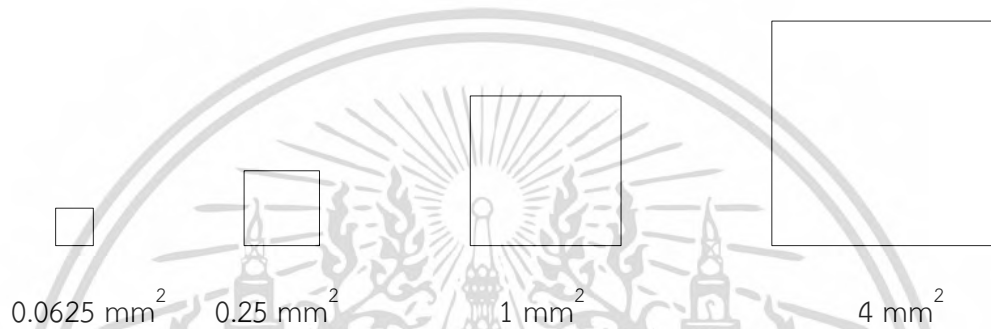
บทที่ 3

กระบวนการสร้างฟิล์มบาง

3.1 การออกแบบมาร์คต้นแบบ

การออกแบบคือทำลวดหลายลงบนกระจกต้นแบบ อาจแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนคือ

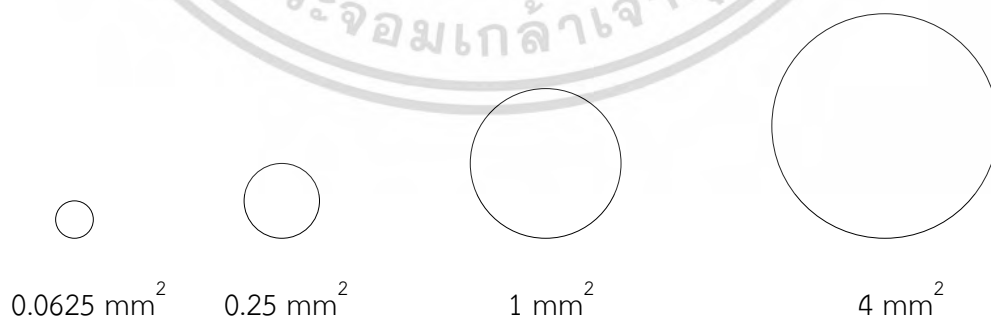
1. การศึกษาขนาดและรูปร่าง สีเหลี่ยม สีเหลี่ยมมน กลม ดังรูปที่ 3.1 ถึง รูปที่ 3.3 เพื่อศึกษาค่ากระแสรั่ว



รูปที่ 3.1 ขนาดและรูปร่างสี่เหลี่ยม



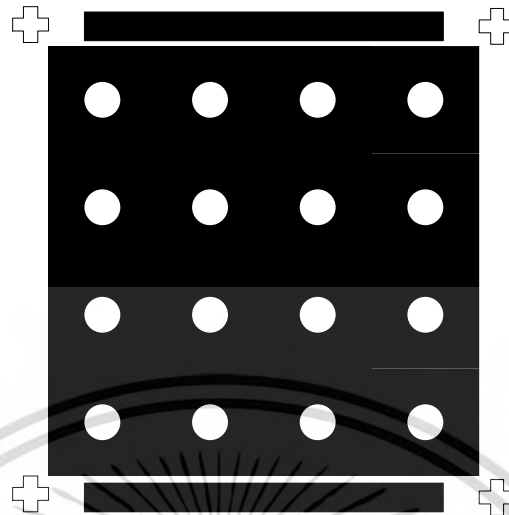
รูปที่ 3.2 ขนาดและรูปร่างสี่เหลี่ยมขอบมน



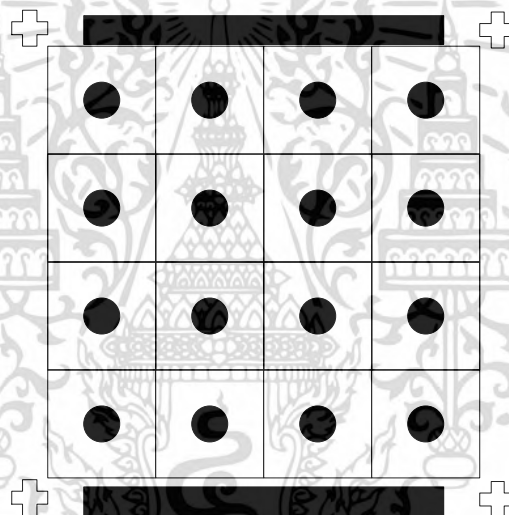
รูปที่ 3.3 ขนาดและรูปร่างกลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

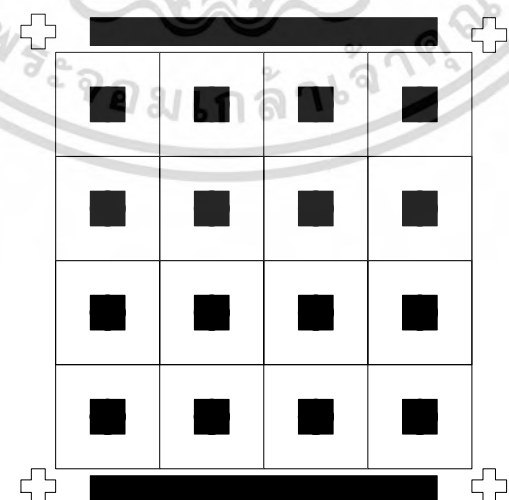
2. การออกแบบกระจกต้นแบบตัวตรวจวัดทางแสง



(ก) ลวดลายต้นแบบ ซิลิคอนออกไซด์



(ข) ลวดลายต้นแบบชั้น ITO



(ค) ลวดลายต้นแบบชั้น Al

รูปที่ 3.4 ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดทางแสง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การกำหนดขั้นตอนของกระบวนการสร้าง

สำหรับการสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจชนิดนี้ ได้ใช้กระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำซิลิคอนในแนวระนาบซึ่งเป็นกระบวนการสร้างสารกึ่งตัวนำวิธีหนึ่งที่ยืดหยุ่นมาก โดยอาศัยเทคนิคที่ใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยมีกระบวนการสร้างพื้นฐานดังนี้ คือ

1. กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation)
2. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
3. กระบวนการแพร่สารเจือ
3. กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ
4. กระบวนการสปัตเตอร์ริง

กระบวนการออกซิเดชัน

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งใสใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดี ชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้โดยกระบวนการออกซิเดชัน โดยทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในอุณหภูมิ $1000-1200^\circ\text{C}$ โดยมีปฏิกิริยาเคมีของการเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการต่อไป

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. กระบวนการออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



สำหรับหน้าที่สำคัญของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในกระบวนการสร้างอุปกรณ์ ประเภทแรกคือ ใช้เป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิคอน และป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้เกิดปฏิกิริยากับผิวซิลิคอน (passivation layer) ประการที่สองก็คือ เป็นหน้ากักป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ ประการที่สามใช้เป็นส่วนกึ่งที่เรียกว่าเกตออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนียวทำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ประการสุดท้ายใช้เป็นฉนวนบนผิวซิลิคอน เพื่อป้องกันการลัดวงจรของลวดลายอลูมิเนียมกับผิวของซิลิคอนใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนอื่น ๆ และจากวัตถุประสงค์ในการใช้งานชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กล่าวมา ทำให้ต้องการที่จะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาที่แตกต่างกันเช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่จะใช้เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่อะตอมสารเจือ จำเป็นที่จะต้องมีความหนาประมาณ 4000-5000 Å ขึ้นไปและชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ใช้เป็นหน้ากากป้องกันสารเคมีที่ใช้กัดซิลิคอนให้เป็นไดอะแฟรมต้องมีความหนาไม่ต่ำกว่า 10000 Å ซึ่งความหนาขนาดนี้ การสร้างโดยใช้วิธีการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์แบบแห้งอย่างเดียวจะทำให้ต้องใช้เวลานานและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ดังนั้นในกรณีของออกไซด์ที่ใช้เป็นหน้ากากจะทำการสร้าง โดยใช้วิธีการสร้างแบบแห้งสลับกับแบบชื้นและแบบแห้งอีกครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากการสร้าง ซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้นสามารถสร้างความหนาได้เร็ว แต่มีคุณภาพต่ำหรือมีรูพรุนมาก จึงจำเป็นต้องสร้างสลับกับการสร้างแบบแห้ง

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นขบวนการที่ใช้สำหรับการถ่ายภาพต้นแบบจากกระจกต้นแบบลงบนผิวของแผ่นผลึกโดยการใช้ลำแสง เพื่อเปิดช่องซิลิคอนสำหรับการแพร่อะตอมสารเจือในขอบเขตที่กำหนดจากกระจกต้นแบบ โดยที่ความสามารถในการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากและมีความถูกต้องแม่นยำจะขึ้นอยู่กับ การปรับตำแหน่ง (alignment) และความคมชัดของกระจกต้นแบบ ซึ่งขั้นตอนต่าง ๆ ของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีจะกล่าวถึงในหัวข้อลำดับขั้นตอนกระบวนการสร้าง

กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นการเติมและควบคุมปริมาณของอะตอมสารเจือให้เข้าไปในผลึกสารกึ่งตัวนำในบริเวณที่ต้องการทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็น โดยที่แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือสามารถแบ่งได้ตามประเภทของอะตอมสารเจือ 2 ประเภท คือ แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็น เช่น ฟอสฟอรัส , สารหนู , โพสฟอรัสและแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เช่น โบรอน โดยในแต่ละประเภทก็จะสามารถแบ่งได้ตามสถานะของแหล่งจ่ายสารเจือ 3 ประเภท คือ 1) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็งอย่างเช่น Sb_2O_3 As_2O_3 และ SiP_2O_7 เป็นต้น 2) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของเหลวอย่างเช่น $POCl_3$ หรือ BBr_3 เป็นต้น 3) แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดก๊าซอย่างเช่น AsH_3 PH_3 และ B_2H_2 เป็นต้น สำหรับในห้องปฏิบัติการสารกึ่งตัวนำของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง เลือกที่จะใช้แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเป็น SiP_2O_7 และแหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดพี เป็น BN ซึ่งทั้งสองชนิดมีสถานะเป็น ของแข็ง ทั้งนี้เนื่องจาก แหล่งจ่ายอะตอมสารเจือชนิดของแข็ง ทำให้เกิดมลภาวะที่เป็นพิษเนื่องจากก๊าซพิษที่แพร่ออกมาจาก ปฏิกริยาน้อยที่สุด และยังคงสะดวกอย่างยิ่งในการใช้งาน

สำหรับขั้นตอนในการปฏิบัติของกระบวนการแพร่สารเจือสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การ Predeposition เป็นการแพร่ชั้นต้นเพื่อกำหนดและควบคุมปริมาณของสารเจือที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ
2. การ Drive-in เป็นการควบคุมความลึกของรอยต่อและกำหนดการกระจายของสารเจือ ที่เข้าไปในแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะ

กระบวนการสร้างลวดลายโลหะเป็นการนำโลหะมาเคลือบที่ผิวแผ่นผลึกเพื่อทำหน้าที่เป็น รอยสัมผัสโอห์มมิคหรือเป็นแกนความนำต่อเชื่อมภายในระหว่างสิ่งประดิษฐ์ต่าง ๆ ในวงจรรวมหรือ เป็นขั้วสำหรับต่อกับอุปกรณ์ภายนอก โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่องซิลิคอน ไดออกไซด์ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยบริเวณที่ต้องการสร้างรอยสัมผัสจะต้องถูกเปิดช่อง ซิลิคอนไดออกไซด์ ก่อนที่จะทำการเคลือบโลหะ โดยลักษณะของโลหะที่จะเคลือบจะมีลักษณะเป็น ฟิล์มบาง (Thin-Film) โดยมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้คือ

1. ทำให้เกิดรอยผิวสัมผัสกับซิลิคอนที่มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำ
2. โลหะที่ใช้ต้องมีความนำไฟฟ้าสูง
3. ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์หรือสารไดอิเล็กทริกอื่น ๆ ได้ดี
4. สามารถต่อเข้ากับสายลวดความนำภายนอกได้ดี

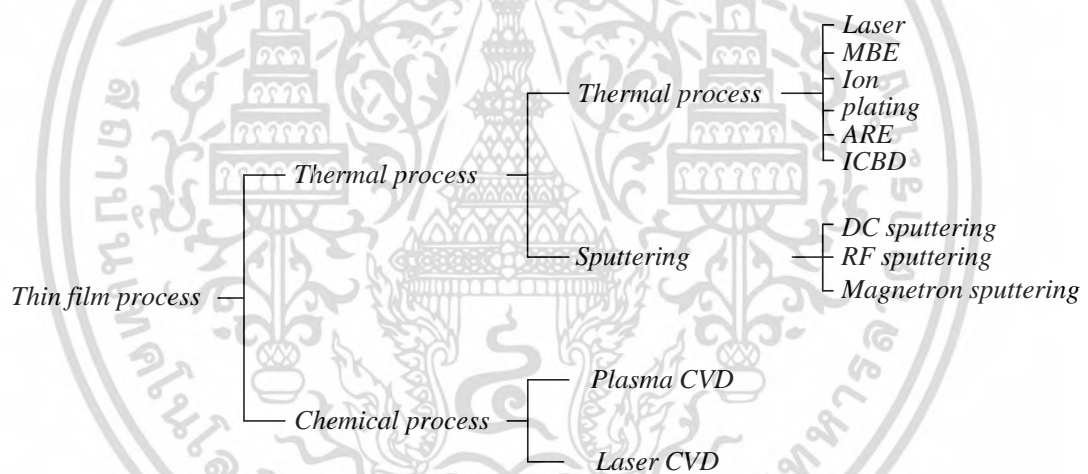
สำหรับกระบวนการสร้างลวดลายโลหะที่ทำการสร้างที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ สถาบัน เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จะเลือกใช้โลหะ (Al) โดยใช้เครื่องเคลือบโลหะใน

สุญญากาศ ทำการเคลือบโลหะลงบนผิวของแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำความหนาประมาณ 1 μm แล้ว
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่โดยคณะกรรมการ
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงนำไปถ่ายฟิล์มโดยขบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกัดเป็นลวดลายตามที่ต้องการออกแบบไว้ จากนั้นจึงนำไปผ่านขบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ประมาณ 12 นาที เพื่อให้ รอยสัมผัสระหว่างอนุภาคนีเยมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

3.4 ระบบการสร้างฟิล์มบาง

กระบวนการสร้างฟิล์มบางมีอยู่หลายเทคนิคที่นิยมนำมาใช้กัน อาจแบ่งตามกลไกการก่อตัวของชั้นฟิล์มบางแล้ว สามารถแบ่งออกได้ 2 วิธี ใหญ่ๆ คือ 1. การระเหยทางกายภาพ (Physical Vapor Deposition : PVD) 2. การระเหยทางเคมี (Chemical Vapor Deposition : CVD) และในแต่ละวิธีก็ยังมีกระบวนการหรือวิธีการอื่นๆ จะมีเทคนิคเฉพาะ ดังรูปที่ 3.5 โดยงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่การสร้างฟิล์มบางจากกระบวนการสปัตเตอร์



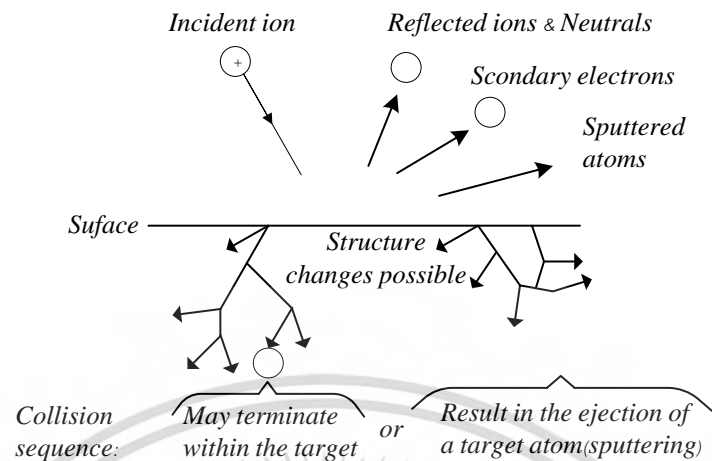
รูปที่ 3.5 กระบวนการสร้างฟิล์มบาง ด้วยเทคนิคต่างๆ

3.5 การสปัตเตอร์ริง

ความหมายของสปัตเตอร์ริง

สปัตเตอร์ริง (Sputtering) เป็นกลไกที่ทำให้อะตอม (Atom) หลุดออกผิงเป้า(target) หรือขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งอาจเป็นวัสดุใด ๆ ก็ได้ ที่เกิดจากการถูกชนด้วยอนุภาคประจุบวกที่มีพลังงานสูงและอะตอมที่หลุดออกไปนั้นจะเกิดชั้นฟิล์มขึ้นที่ผิวบนฐานผลึก (Substrate) ในลักษณะของฟิล์ม การสปัตเตอร์นั้นสามารถทำได้กับวัสดุที่มีสถานะเป็นของแข็ง ได้แก่ (Metal) ฉนวน (Insulator) สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) และโลหะผสม (Alloy) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 กลไกเกิดชั้นฟิล์มบางเมื่อไอออนบวกพุ่งชนผิวเป้า(target)

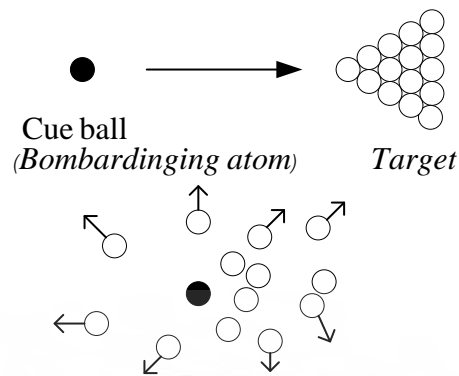
เมื่อไอออนบวกพลังงานสูงวิ่งชนผิวเป้าจะเกิดปรากฏการณ์กลไกเปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 3.6

- ไอออนบวกพลังงานสูงที่เข้าชนและสะท้อนกลับ หรือ ถูกทำให้เป็นกลางทางไฟฟ้า
- มีการปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron emission)
- ไอออนบวกที่เข้าชนมีการฝังตัวในเป้า (ion implantation)
- มีการจัดโครงสร้างใหม่ภายในเป้า
- มีการชนกันอย่างต่อเนื่อง (collision cascade) ระหว่างอะตอมของเป้าแล้ว จะทำให้อะตอมบริเวณผิวหน้าของเป้าถูกกระแทกหลุดออกที่เป็นปรากฏการณ์สปัตเตอร์

การเกิดปรากฏการณ์ในแต่ละแบบนั้นจะขึ้นอยู่กับชนิดและพลังงานของไอออนบวกที่เข้าชน สำหรับในกรณีการเกิดสปัตเตอร์จะเกิดได้ดีในช่วงพลังงานของไอออนบวกประมาณ 100 eV - 10 keV

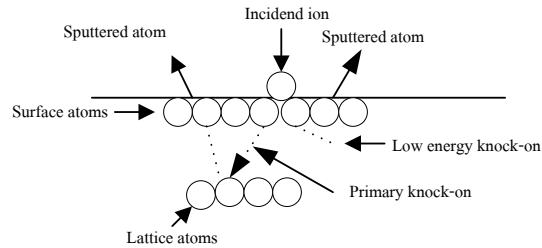
กลไกของการสปัตเตอร์ริงอาจเปรียบเทียบกับการเล่นลูกบิลเลียด ดังรูปที่ 3.7 พิจารณาให้อนุภาคทั้งหมดเป็นทรงกลมแข็งโดยให้ไอออนบวกเป็นลูกขาว (cue ball) และให้อะตอมที่ผิวของเป้าเป็นลูกสีส้ม (colored ball) ที่เรียงกันเป็นระเบียบ การชนของลูกขาวจะทำให้ลูกสีกระทบกันเป็นทอดๆ แล้วกระเจิงออกทุกทิศทางรวมทั้งในทิศย้อนกลับสู่ผู้เล่นด้วย ซึ่งเทียบได้กับอะตอมถูกสปัตเตอร์ออกจากเป้าในความเป็นจริงจะมีแรงระหว่างอะตอมซึ่งจะแตกต่างจากกรณีของลูกบิลเลียด แต่แบบการจำลองการชนนี้ก็สามารอธิบายได้ใกล้เคียงความเป็นจริงมากที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 การสปีดเตอร์เปรียบเทียบเหมือนกันชนด้วยลูกบิลเลียด

การที่ไอออนบวกชนเป้าแล้วมีการถ่ายเทโมเมนตัมให้กับอะตอมที่ผิวของเป้าซึ่งอยู่หนึ่งเป็นกลไกที่นำไปสู่การสปีดเตอร์อะตอมออกจากผิวของเป้า ดังรูปที่ 3.7 โดยการชนไอออนบวกจะชนที่ผิวของเป้า 2 หรือ 3 อะตอมเกือบพร้อม ๆ กัน อะตอมที่ถูกชนตอนแรกยังไม่ถูกสปีดเตอร์แต่เป็นอะตอมข้างเคียงอะตอมที่ถูกชนการชนจะมีสองลักษณะคือ แบบแรก อะตอมถูกชนในลักษณะพลังงานต่ำ (low energy knock-on) องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวที่ขนานกับผิวของเป้า มีการเคลื่อนตัวในแนวเฉียงด้านข้างกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าซึ่งมีอยู่ให้หลุดออก เป็นการชนเพียงครั้งเดียว แบบที่สอง อะตอมถูกชนในลักษณะ primary knock-on องค์ประกอบของโมเมนตัมส่วนใหญ่จะอยู่ในแนวพุ่งเข้าสู่เป้า อะตอมจะเคลื่อนตัวลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป ทำให้ตัวมันเองสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออก หรือมีการชนต่อไปอย่างต่อเนื่องจนทำให้อะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศทางเปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกที่เข้าชน อะตอมเหล่านี้ก็จะกระแทกอะตอมที่ผิวของเป้าให้หลุดออกในที่สุด



รูปที่ 3.8 การถ่ายเทโมเมนตัมของกระบวนการสputtering

พารามิเตอร์ที่ใช้สำหรับอธิบายการสputteringเชิงปริมาณ คือ อัตราสputtering (sputtering yield : S) เป็นปริมาณที่บอกถึงจำนวนอะตอมของเป้าที่หลุดออกต่อการชนของไอออนบวก 1 ตัว อัตราสputtering ขึ้นกับชนิดพลังงานและทิศทางของไอออนบวกที่เข้าชนเป้า โดยกรณีที่ไอออนบวกเข้าชนเป้าในทิศตั้งฉากกับแนวระนาบของเป้าที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมแบบสุ่ม

พลาสมา

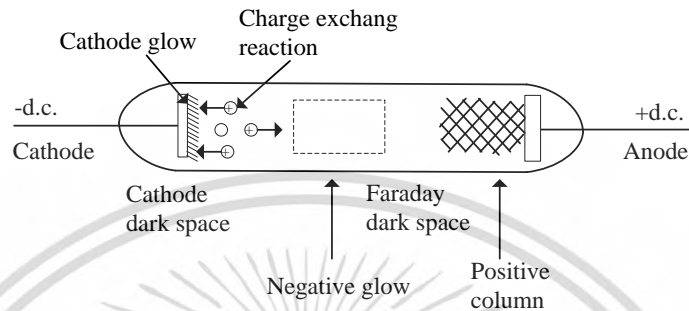
พลาสมา คือ ก๊าซที่เกิดการแตกตัว (ionized gas) ให้ประจุบวก(+) และ ประจุลบ(-) ในจำนวนที่เท่าๆ กัน โดยมี neutron atom – ปะปนอยู่บ้าง

Negative Charge – electrons

Positive Charge – positive ions

สำหรับวิธีการทำพลาสมา มีหลากหลายวิธีด้วยกัน แต่ทุกๆ กรรมวิธีต้องจ่ายพลังงานเข้าไปในระบบ โดยกระบวนการผลิตพลาสมานั้นมักใช้ก๊าซสร้างพลาสมา โดย Transition อันเป็นผลของสนามไฟฟ้าไอโอไนเซชัน(Electric ionization) ของก๊าซจะถูกนำมาใช้ทำก๊าซดิสชาร์จ (gas discharge) บ่อยๆ ซึ่งก๊าซดิสชาร์จเป็นคำที่ใช้เรียกสภาวะที่ก๊าซเกิดการนำ กระแสไฟฟ้าได้พลาสมา โกลดิสชาร์จ คือ Self- sustaining plase) ในการ Transition อันเป็นผลของ สนามไฟฟ้าไอโอไนเซชัน(Electric ionization) ของก๊าซมักจะถูกนำมาใช้ทำก๊าซดิสชาร์จ (gas discharge) บ่อยๆ ซึ่งก๊าซดิสชาร์จเป็นคำที่ใช้เรียกสภาวะที่ก๊าซเกิดการนำ กระแสไฟฟ้าได้พลาสมา โกลดิสชาร์จ คือ Self- sustaining plasma ในรูปที่ 3.9 ดังแสดงถึงระบบ DC diode type อย่างง่าย ที่ใช้คุณสมบัติของการก่อเกิดประจุ (Glow discharge) ภายในหลอดแก้วจะต้องทำสุญญากาศและเติมก๊าซเฉื่อย (Inert gas) ซึ่งก๊าซที่มีคุณสมบัติไม่ติดไฟไม่กัดกร่อนเมื่อผสมกับออกซิเจนและในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะการใช้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

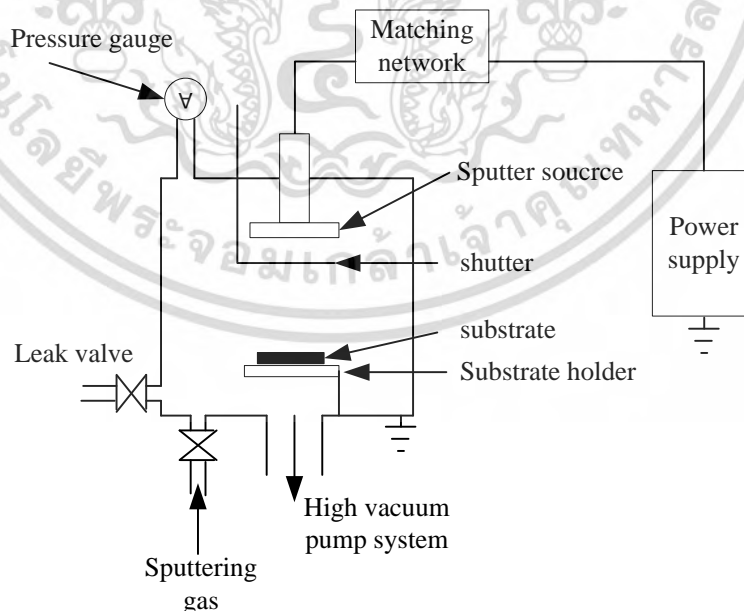
ก๊าซอาร์กอน (Ar gas) เนื่องจากมีมวลหนักเหมาะแก่การทำ Ions Bombardment เข้าไปจนเกิดแรงดันต่ำ ๆ ภายในหลอดแก้วมีอิเล็กโทรดอยู่สองอันบรรจุภายในหลอดอันได้แก่ ขั้วที่มีไฟบวก เรียกว่า อานอด (anode) ส่วนขั้วที่มีไฟลบ เรียกว่า คาโทด (cathode) ทำให้เกิดแรงดันไฟกระแสตรง ตกคร่อมเพื่อทำให้เกิดพลาสมา



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของระบบไดโอดไฟตรง

โครงสร้างของระบบเคลือบฟิล์มวิธีสปัตเตอร์ริง

ระบบสปัตเตอร์ริงในที่ใช้อยู่ปัจจุบันนี้มีหลายรูปแบบ โดยมีชื่อแตกต่างกันไปแล้วแต่รูปแบบ การดัดแปลงการใช้งานดังตัวอย่างที่กล่าวมาแล้วนั้นอย่างไรก็ตามระบบเหล่านี้มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.10 ซึ่งประกอบด้วย



รูปที่ 3.10 ลักษณะทั่วไปของระบบเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอร์ริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ภาชนะสุญญากาศ (vacuum chamber) สำหรับบรรจุก๊าซของการติสซาร์จ แล้วติดตั้งส่วนประกอบอื่นๆ ทำจาก แก้ว เหล็กสแตนเลส หรือโลหะผสม ที่ผ่านการตรวจสอบสุญญากาศแล้ว
- ระบบปั๊มสุญญากาศ (high vacuum pump) ที่มีความสามารถปั๊มความดันลงได้ต่ำกว่า 10^{-6} ทอร์ ทั่วไปเป็นระบบผสมระหว่างปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มแพร่ไอน้ำมัน หรือปั๊มแบบโรตารีกับปั๊มเทอร์โบโมเลคิวลา
- หัววัดความดันก๊าซ (pressure gauge) ในภาชนะสุญญากาศ พร้อมด้วยระบบวัดและแสดงผลทั้งในย่านความดันต่ำและความดันใช้งาน
- วาล์วปล่อย (leak valve) วาล์วที่ใช้สำหรับปล่อยให้อากาศไหลเข้าภายในภาชนะสุญญากาศ
- แหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์ (sputtering source) ประกอบด้วยเป้าและพร้อมแท่นยึด สำหรับระบบแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงภายในจะบรรจุแหวนแม่เหล็กใต้เป้า
- แหล่งจ่ายไฟฟ้า (power supply) ที่ใช้งานในระบบนี้คือ ชนิดกระแสสลับ (RF power supply) ความถี่ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ สำหรับระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง
- หน้ากาก (shutter) ใช้สำหรับเปิดปิดปลั๊กซ์ของอะตอมที่หลุดจากแหล่งกำเนิดการสปัตเตอร์
- แท่นวางวัสดุรองรับ (substrate holder) สำหรับวางวัสดุรองรับฟิล์ม
- แหล่งก๊าซสปัตเตอร์ (sputtering) จะต้องเป็นก๊าซที่ไม่ทำปฏิกิริยากับเป้าและฟิล์มที่เกิดขึ้น หรือส่วนประกอบอื่นๆ ในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ ต้องไม่เป็นพิษและควรมีมวลมากพอที่จะทำให้ได้อัตราการสปัตเตอร์ริงที่สูง ที่ใช้กันอยู่ทั่วไป คือ ก๊าซอาร์กอน เพราะไม่เป็นพิษ หาง่ายและราคาถูก แต่ยังไม่ใช่ก๊าซเฉื่อยที่มีมวลมากที่สุด
- วงจรแมชชิง (match network) สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพในการส่งกำลังไฟฟ้าและป้องกันแหล่งกำเนิด ในกรณีของอาร์เอฟ สปัตเตอร์ริง
- ตัวทำความร้อน (heater) สำหรับเพิ่มอุณหภูมิวัสดุรองรับพร้อมด้วยระบบวัดและควบคุมอุณหภูมิแหล่งจ่ายไฟฟ้า

3.6 เงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างฟิล์มบาง

โดยใช้ระบบอาร์เอฟสปัตเตอร์ริงระบบสปัตเตอร์ริงที่ใช้ในการสร้างฟิล์มบาง นี้จะมีเงื่อนไข

ดังนี้คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

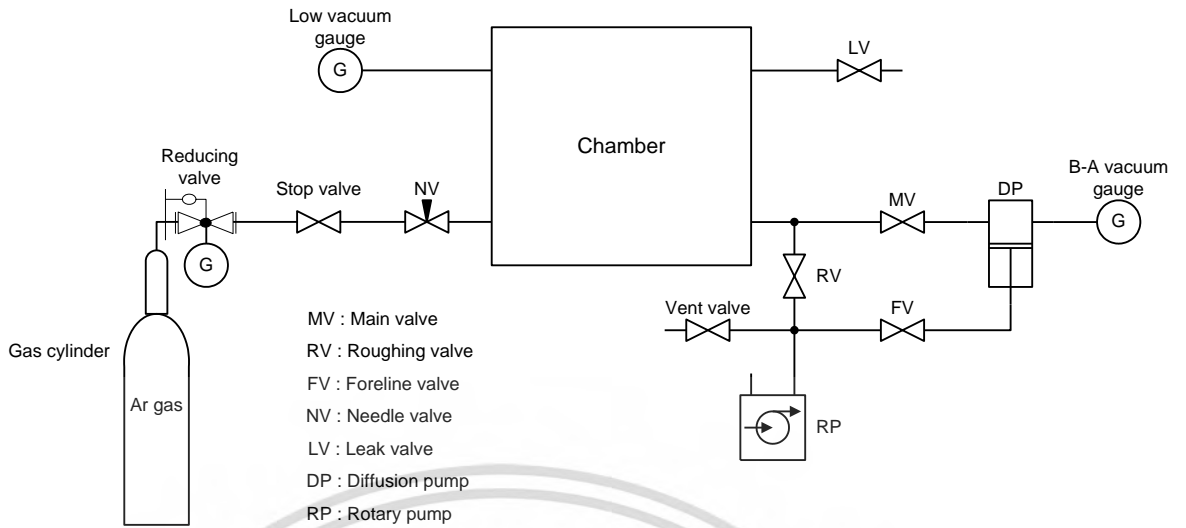
1. เป็นระบบสปีดเตอร์แบบแหล่งจ่ายพลังงานความถี่วิทยุ 13.56 MHz
2. กำลังความถี่คลื่นวิทยุ 100-150 วัตต์
3. ความต่างศักย์ที่ตกคร่อมเป้าไม่เกิน 1.75 กิโลวัตต์
4. ระยะห่างระหว่างฐานรองถึงเป้า 3.5 เซนติเมตร
5. เนื้อวัสดุที่เป็นเป้าเคลือบสารคือที่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร และมีความหนา 0.8 เซนติเมตร
6. อุณหภูมิของฐานรองโลหะมีค่า 25-400 องศาเซลเซียส
7. Presputtering time 20 นาที
8. ก๊าซที่ใช้คือ Ar(85%) : O₂ (15%)

3.7 ส่วนประกอบที่สำคัญของ SPF –RF Sputtering System



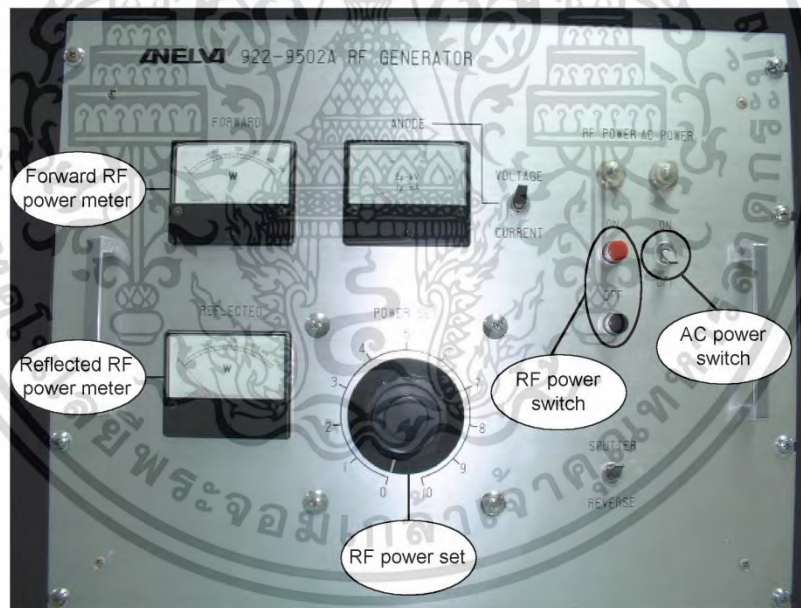
รูปที่ 3.11 SPF – RF Sputtering System

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



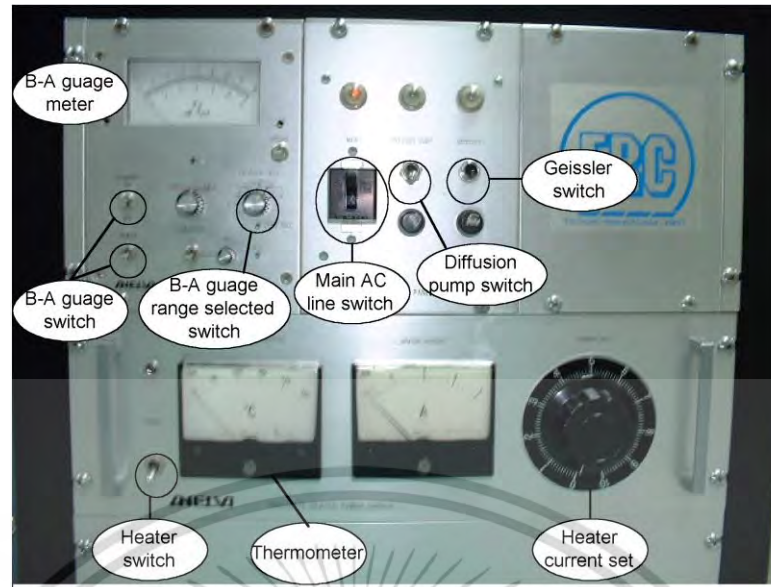
Sputtering system

รูปที่ 3.12 องค์ประกอบรวม SPF – RF Sputtering System



รูปที่ 3.13 ภาพแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 ภาพแผงควบคุม ปั๊ม, B-A Gauge and Heater

1. ปั๊มสุญญากาศ เพื่อใช้ในการลดความดันของก๊าซภายในระบบให้มีความดันต่ำ เพื่อให้ระบบเกิดความสะอาดและมีความเป็นสุญญากาศมากที่สุด โดยระบบนี้ประกอบด้วยปั๊มสุญญากาศ 2 ชนิด

1.1 Mechanical Rotary pump ซึ่งจะใช้ในการลดความดันในระดับ ในช่วง ความดันบรรยากาศ ถึง 10^{-3} mbar

1.2 Oil diffusion Pump ซึ่งจะทำงานร่วมกับ Mechanical Rotary pump โดยจะทำงานต่อจากที่ความดันต่ำกว่า 10^{-1} mbar จนถึง 10^{-8} torr

2. ภาชนะสุญญากาศ ทำจากโลหะผสมระหว่างเหล็กกับสแตนเลส ซึ่งมีทรงเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร

3. ขั้วคาโทดและเป้าสารเคลือบมีโครงสร้างของคาโทดเป็นแบบระนาบ (planar) ที่ออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเหล็ก-สแตนเลส โดยมีพื้นที่เป้าสารเคลือบจะเป็นรูปทรงกระบอกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร หนา 0.8 เซนติเมตร

4. ระบบระบายความร้อนที่ขั้วคาโทดจะต้องใช้ที่มีความต้านทานสูงเพื่อหล่อเย็นและรักษาความเป็นฉนวนไฟฟ้า โดยมีอัตราการไหลของน้ำ 5 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 20°C ส่วนระบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อนของปั๊มไอฟุ้งกระจาย (Oil diffusion Pump) จะมีอัตราการไหลของน้ำ 0.4 ลิตรต่อนาที ที่อุณหภูมิ 20 °C

5. แหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A

องค์ประกอบโดยหลักของแหล่งจ่ายพลังงานคลื่นความถี่วิทยุ รุ่น 922-9502A

พลังงานอินพุท : AC 100 Volt (50/60 Hz)

พลังงานเอาต์พุท : 450 Watt

คลื่นความถี่ : 13.56 MHz

อิมพีแดนซ์ : 50 Ohm

ขนาดเครื่อง : 4.80x4.90x4.00 m

6. เกจวัดความดัน จะมีอยู่ 2 ชนิด คือ

1. Low vacuum gauge จะวัดความดันในช่วง $10^{-1} - 10^{-4}$ mbar

2. B-A Vacuum gauge ซึ่งจะเป็น NI-10D Wide-Range Ionization Gauge ที่สามารถวัดความดันในช่วง $10^{-4} - 10^{-11}$ torr

7. ระบบป้อนก๊าซจะประกอบด้วยท่อก๊าซ Ar, Ar:O₂(85:15) และ Ar:O₂ (50:50)

3.8 ขั้นตอนกระบวนการสร้างฟิล์มบาง

1. ติดตั้ง target

2. เช็กระบบ

Chamber : Close

Main valve (MV.) : Close

Roughing valve (RV.) : Close

Foreline valve (FV.) : Close

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Needle valve (NV.) : Close

Stop valve : Close

Cooling water valve : Close

3. เปิดวาล์ว Cooling water (หมุน 2.5 รอบ และเปิดวาล์วทุกตัว)
4. เปิดสวิตช์ Rotary pump(Main switch) และเปิดสวิตช์ Diffusion pump (Diffusion pump) จะทำงานหลังจากเปิดไว้แล้ว $\approx 15-25$ นาที โดยกำหนดอุณหภูมิที่ $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ แล้วรอประมาณ 10 นาที ก่อนเปิดวาล์ว Roughing valve.
5. เปิดวาล์ว Roughing valve. (หมุนช้าๆ) และให้รอจนค่าความดันต่ำกว่าจะได้ Pressure $< 1*10^{-1}$ mbar (จะรอประมาณ 10-30 นาที ในระหว่างนี้ให้ทำความสะอาดท่ออาร์กอนก๊าซ (Ar)ด้วย โดยเมื่อได้ความดัน Pressure $< 1*10^{-1}$ mbar แล้วให้เปิดวาล์ว Needle valve. และ Stop valve รอจนกว่า Pressure $< 1*10^{-1}$ mbar อีกจึงปิดวาล์ว Needle valve. แล้วเปิดที่หัวถังของอาร์กอนก๊าซ ปรับความดันให้ได้ 10 Psi แล้วปิดหัวถังอาร์กอนก๊าซ กลับมาเปิดวาล์ว Needle valve. ใหม่รอให้ได้ Pressure $< 1*10^{-1}$ mbar อีกครั้ง ทำอย่างนี้ประมาณ 3 ครั้ง เมื่อครบแล้วให้ปิด Stop Valve และเปิดอาร์กอนก๊าซมาข้างไว้ในท่อ)
6. ปิดวาล์ว Roughing Valve.
7. เปิดวาล์ว Fofeline Valve. แล้วทดลองใช้ Geissler tube วัดอากาศใน ภาชนะสุญญากาศ (Geissler tube ไม่ควรติด) ให้รอเวลาประมาณ 5 นาที
8. เปิดวาล์ว Main valve. (เปิดช้าๆจนสุด) และรอจนระบบสุญญากาศได้ Pressure ใน ภาชนะสุญญากาศ $< 1*10^{-5}$ torr โดยวัดได้จาก B-A vacuum gauge (หรือ Ion-gauge)
9. เติมของ Liquid N_2 เมื่อได้ Pressure $\sim 1*10^{-5}$ torr และควรเติม Liquid N_2 ทุกๆ 30 นาที จนกว่าจะได้ความดัน Base pressure $< 5*10^{-7}$ (ปกติจะใช้ $4.8*10^{-7}$ torr)
10. ปิดสวิตช์ B-A vacuum gauge
11. ปิดวาล์ว Needle Valve. แล้วเปิดหัวถัง อาร์กอนก๊าซ ปรับ Regulator ให้ได้ 10 psi
12. ปิดวาล์ว Main Valve.
13. เปิดวาล์ว Needle Valve. สำหรับ flow อาร์กอนก๊าซ โดยหมุนวาล์ว Needle Valve. ประมาณ 2.5-3 รอบ
14. เปิดวาล์ว Main Valve. (ค่อยๆหมุน) สำหรับควบคุม Pressure ให้ได้ $4*10^{-2}$ mbar ขณะทำ Sputtering
15. เปิดสวิตช์ RF Power switch โดย
 - AC power switch : On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- RF power switch : On

16. ปรับ RF Power set (ยังไม่เปิด Shutter)

Forward power 100 W.

Reflect power < 10 W.

Anode voltage < 1.5 kv.

17. ทำการ Pre-sputter โดยยังไม่ต้องเปิด Shutter เป็นเวลา 20 นาที

18. เปิด Shutter ทำการ Sputtering ตามเวลาที่ต้องการ

19. ปิด Shutter

20. ปรับ RF Power set ของ Forward power ลดลงจนเป็น ศูนย์ แล้วปิดสวิทช์ของ RF power switch

21. ปิด อาร์กอนก๊าซ โดย

- ปิดวาล์ว Needle Valve.

- Stop Valve

- ปิดหัวถังก๊าซ

22. เปิดวาล์ว Main Valve. จนเกือบสุด และรอเวลา 1 ชั่วโมง

23. ปิดสวิทช์ AC switch ของ RF power switch หลังจากปิดสวิทช์ของ RF switch แล้ว 15 นาที

24. ปิดวาล์ว Main valve.

- ถ้าทำต่อไม่ต้องปิด Diffusion pump ให้นำอุปกรณ์ออกได้ แล้วใส่อุปกรณ์ใหม่เข้าไป แล้วทำตามขั้นตอนที่ผ่านมา โดยเริ่มจากนำอุปกรณ์ใส่แล้วปิด ภาชนะสุญญากาศ แล้วทำตามขั้นตอนตั้งแต่ขั้นตอนที่ 5 เป็นต้นไป โดยไม่ต้องทำความสะอาดท่อ อาร์กอนก๊าซ อีก

25. ปิดสวิทช์ Diffusion pump แล้วรออีก 30 นาที

26. ปิดวาล์ว Foreline Valve.

27. ปิดสวิทช์ Rotary pump

28. Leak pressure ของ Rotary pump ในทันที

29. ปิดระบบ Cooling water

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

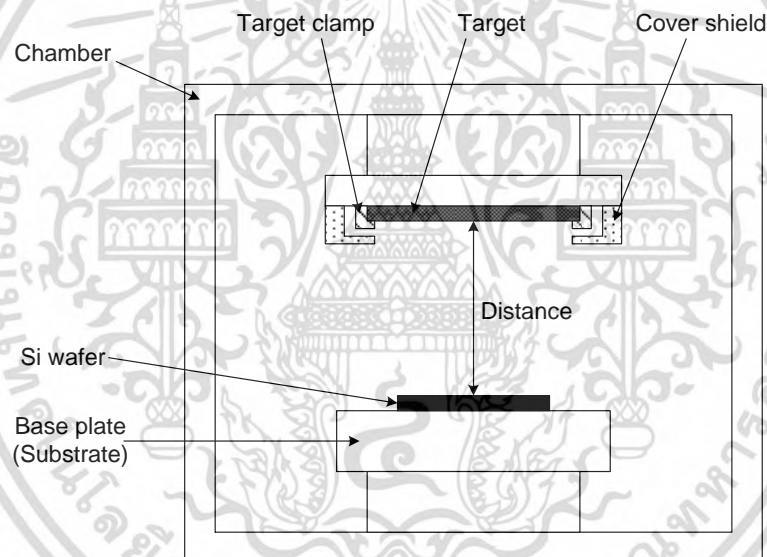
3.9 การทำความสะอาดระบบสุญญากาศ

เนื่องจากเครื่องสปีดเตอร์ต้องมีเครื่องเดี่ยวแต่มี target หลายอัน จะทำให้เกิดปัญหาเรื่องความสกปรกมากทำให้คุณภาพของฟิล์มที่ได้มีคุณภาพที่ไม่ดี เมื่อต้องการเปลี่ยน target ต้องทำความสะอาดภาชนะสุญญากาศ (chamber) แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 4.15

- ทำความสะอาด Chamber , Clamp และ Cover Shield ทำการขัดด้วยกระดาษทรายละเอียดกับน้ำ DI และ เช็ดด้วยแอลกอฮอล์

- ทำความสะอาดระบบสุญญากาศทั้งระบบโดยการปั๊มสุญญากาศเป็นเวลา 8 ชั่วโมง

- ความทำสะอาด target โดยการ pre-sputter 1 ชั่วโมง



รูปที่ 3.15 โครงสร้าง Chamber

3.9 กระบวนการสร้างเซนเซอร์ หรือ ตัวตรวจวัดทางแสง

กระบวนการสร้างเซนเซอร์ หรือ ตัวตรวจวัดทางแสงที่ใช้อินเดียมทินออกไซด์เป็นชั้นไฟฟ้าโปร่งใส จะใช้เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเป็นเทคโนโลยีที่ใช้การสร้างวงจรรวมที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ การสร้างสวดลายต่างๆจะใช้เทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หลังจกขั้นตอนการออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบ แล้วจึงเริ่มกระบวนการสร้างโดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นและพี ระบาย (100) ซึ่งมีค่าสภาพต้านทาน $10 \Omega\text{-cm}$ และใช้ความหนาแผ่นราว

300 μm ขั้นตอนกระบวนการสร้างมีดังต่อไปนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

- อัลตราโซนิก (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

2. กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 1

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (Thermal Oxidation) ให้ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 5000 Å เงื่อนไขและกระบวนการสร้างมีดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/min
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1000 cc/min
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/min

3. กระบวนการแพร่สารเจือชนิดเอ็นเข้มข้น

การแพร่สารเจือชนิดเอ็นเข้มข้นที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน เพื่อให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมกับซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสชนิดโอห์มมิก (Ohmic contact) ขั้นตอนการแพร่สารเจือมีดังนี้

- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านหลังแผ่นซิลิคอน โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₃F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/min เป็นเวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - เปิดเตา ปรับอุณหภูมิของเตาเป็น 1050°C และทำการจ่ายก๊าซไนโตรเจนขึ้นต้น โดยมีอัตราการไหล 500 cc/min
 - ใช้ Thermocouple วัดอุณหภูมิภายในเตา เมื่ออุณหภูมิของเตามีค่าประมาณ 1050°C แล้วให้เพิ่มอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเป็น 800 cc/min
 - ทำการตั้งฐานรองที่มีแผ่น Phosphorus และแผ่นซิลิคอนอยู่เข้าไป โดยเริ่มจากนำฐานรองวางทิ้งไว้ที่ปากเตาเป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ทั้งแผ่น Phosphorus และแผ่นซิลิคอนมีการปรับอุณหภูมิ จากนั้นค่อยๆดันที่รองรับแผ่นซิลิคอน เข้าไปในเตาจนถึงตำแหน่งที่เหมาะสม (ประมาณกลางเตา) ทิ้งไว้ 20 นาที
 - หยุดการจ่ายก๊าซไนโตรเจน แล้วทำการจ่ายก๊าซออกซิเจน (แบบแห้ง) โดยมีอัตราการไหล 1200 cc/min และมีอุณหภูมิ 400°C เป็นเวลา 10 นาที
 - เมื่อครบตามเวลา ค่อยๆดึงโบทออก แล้วทิ้งไว้ที่ปากเตา เป็นเวลา 5 แล้วนำฐานรองออกจากเตา
4. กระบวนการออกซิเดชันครั้งที่ 2
- สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ใหม่ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน ให้ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1500 \AA เงื่อนไขและกระบวนการสร้างมีดังนี้
- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เดิมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นซิลิคอน โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ ($\text{HF} : \text{NH}_3\text{F}$ อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 \AA/min เป็นเวลา 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
 - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/min
 - ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา 10 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1000 cc/min
 - ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 5 นาที อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/min

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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 1 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ชี้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาชี้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้วๆ ละ 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นครั้งที่สอง (post bake) ให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออก เพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสงโดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₃F อัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/min 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 โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

7. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 2 เพื่อสกัดลวดลายโลหะอลูมิเนียม ครั้งที่ 1

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เคลือบน้ำยาไวแสง AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ชี้นลวดลายน้ำไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย 2 แก้วๆ ละ 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นครั้งที่สอง ให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- 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

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

- ติดตั้ง target(ITO)
- เช็กระบบ

chamber : close

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

- เปิดวาล์ว cooling water (หมุน 2.5 รอบ และวาล์วทุกตัวเปิด)
- เปิดสวิตช์ Rotary pump (main switch) และเปิดสวิตช์ diffusion pump (diffusion pump จะทำงานหลังจากเปิดแล้วประมาณ 20 นาที ตั้งอุณหภูมิไว้ที่ 400 °C) แล้วรอประมาณ 2-5 นาที ก่อนเปิดวาล์ว Roughing Valve.
- เปิดวาล์ว Roughing Valve. (ค่อยๆ หมุน) และรอจนกว่าจะได้ pressure $< 1 \times 10^{-1}$ mbar อีกจึงปิดวาล์ว Needle Valve. แล้วเปิดที่หัวถังของอาร์กอนก๊าซ ปรับความดันให้ได้ 10 psi แล้วปิดหัวถังอาร์กอนก๊าซ กลับมาเปิดวาล์ว Needle Valve. ใหม่รอให้ได้ pressure $< 1 \times 10^{-1}$ mbar อีกครั้ง ทำอย่างนี้ประมาณ 3 ครั้ง เมื่อครบแล้วให้ปิด stop Valve และเปิดอาร์กอนก๊าซมาข้างไว้ในท่อ)
- ปิดวาล์ว Roughing Valve.
- เปิดวาล์ว Foreline Valve . แล้วทดลองใช้ geissler tube วัดปริมาณอากาศใน Chamber (geissler tube ไม่ควรติด) รอเวลาประมาณ 3 นาที
- เปิดวาล์ว Main Valve. (ค่อยๆ เปิดจนสุด) และรอจนระบบมี pressure ใน chamber $< 1 \times 10^{-5}$ torr โดยวัดได้จาก B-A vacuum gauge (หรือ ion-gauge)
- เติมของ liquid N₂ เมื่อได้ pressure ประมาณ 1×10^{-5} torr และเติม liquid N₂ ทุกๆ 30 นาที จนเวลากว่าจะได้ base pressure $< 1 \times 10^{-6}$
- ปิดสวิตช์ B-A vacuum gauge
- ปิดวาล์ว Needle Valve. แล้วเปิดหัวถัง อาร์กอนก๊าซ ปรับ regulator ให้ได้ 10 psi
- ปิดวาล์ว Main Valve.
- เปิดวาล์ว Main Valve. สำหรับ flow อาร์กอนก๊าซ โดยหมุนวาล์ว Main Valve. ประมาณ 2.5 – 3 รอบ
- เปิดวาล์ว Main Valve. (ค่อยๆ หมุน สำหรับควบคุม pressure ให้ได้ 4×10^{-2} mbar ขณะทำ sputtering
- เปิดสวิตช์ RF power switch โดย
AC power switch : On

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RF power switch : On

- ปรับ RF power set (ยังไม่เปิด Shutter)
 - forward power 100 W .
 - (ทำการเพิ่มทีละ 20 W ทุกๆ 5 นาที)
 - reflect power <50 W.
 - anode voltage <1.5 kV.
- ทำการ pre-sputter เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยที่ไม่ต้องเปิด shutter เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เปิด shutter ทำการ sputter ตามระยะเวลาที่กำหนด
- ปิด shutter
- ปรับกำลังงาน RF power set ของ forward power โดยค่อยๆลดลงทีละน้อยๆ 20 W ทุกๆ 5 นาที จนเป็น 0 W แล้วปิดสวิทช์ของ RF power switch
- ปิด อาร์กอนก๊าซ โดย
 - ปิดวาล์ว Needle Valve.
 - Stop Valve
 - ปิดหัวถึงก๊าซ
- เปิดวาล์ว Main Valve. จนสุด และรอเวลาอีก 1 ชั่วโมง
- ปิดสวิทช์ AC switch ของ RF power switch หลังจากปิดสวิทช์ RF switch แล้ว 15 นาที
- ปิดวาล์ว MV.
- ปิดสวิทช์ diffusion pump แล้วรอเวลาอีก 30 นาที
- ปิดวาล์ว Foreline Valve.
- ปิดสวิทช์ rotary pump
- Leak pressure ของ rotary pump ในทันที
- ปิดระบบ cooling water

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 3 (ITO Mask) และ มาร์กที่ 2 (Aluminium Mask)

เนื่องจากสารละลาย HCl ที่ไว้ใช้สำหรับสกัดฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์นั้นจะสกัดเอาอลูมิเนียมออกไปด้วย จึงต้องมีการปรับซ่อนทั้ง ITO Mask และ Aluminium Mask เพื่อป้องกันไม่ให้อลูมิเนียมโดนสกัดออก

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที่ เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 3 (ITO Mask) ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 (Aluminium Mask) ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาร์ก (Mask Aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ชี้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาชี้นลวดลาย (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
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

9. กระบวนการอบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ (Annealing)

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

10. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม (ด้านหลังแผ่นซิลิคอน)

- การอบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 5-10 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที

- การอบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 20 นาที
- ทำการสกัดชั้นฟิล์มซิลิคอนออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่นซิลิคอน โดยจุ่มในกรดกัดแก้ว (Hydrofluoric Acid: HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เป็นเวลา 20 นาที
- เคลือบด้านหลังของแผ่นซิลิคอนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (Vacuum Evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

11. กระบวนการอบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม (Sintering)

การอบชิ้นงานในสภาพบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิประมาณ 500 °C ที่ใช้อัตราการไหลของก๊าซ 1000 cc/min เป็นระยะเวลา 10 นาที เพื่อให้ได้รอยต่อสัมผัสที่สมบูรณ์และได้ค่ากระแสรั่วที่ต่ำ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลอง และ ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนาระดับนาโนเมตรเพื่อประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เช่น งานเซนเซอร์แสง งานเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น การสร้างฟิล์มบางจะใช้เทคนิคสปีเตอร์แบบอาร์เอฟ โดยใช้เทคนิคการจับเวลาเพื่อควบคุมความหนาของชั้นฟิล์ม

เมื่อได้ความหนาของฟิล์มตามกำหนดแล้ว ทำการตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวและวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเครื่องกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด ตามด้วยการตรวจสอบความผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ วัดทดสอบสภาพความต้านทาน และสุดท้ายเป็นการวัดค่าการส่องผ่านของแสง

ต่อจากนั้นทำการแอนนิลฟิล์มเพื่อปรับปรุงสมบัติของฟิล์มให้ดีขึ้นในช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C ในสภาวะบรรยากาศที่ต่างกันคือ ก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน และ อากาศ

สุดท้ายนำฟิล์มที่ได้ไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง

4.1 การเตรียมฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

4.1.1 การหาความหนาของฟิล์ม

การสังเคราะห์ฟิล์มบางด้วยวิธีการสปีเตอร์ริงแบบอาร์เอฟ ลงบนฐานรองกระจก ที่สภาวะก๊าซอาร์กอน(85%) และ ออกซิเจน(15%) โดยมีเงื่อนไขที่ใช้ คือ 5 นาที 15 นาที และ 60 นาที ได้ค่าความหนาฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ โดยทำการวัดด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ดังตารางที่ 4.1 ได้ค่าอัตราการเกิดฟิล์มบางประมาณ 16.8 นาโนเมตร/นาที

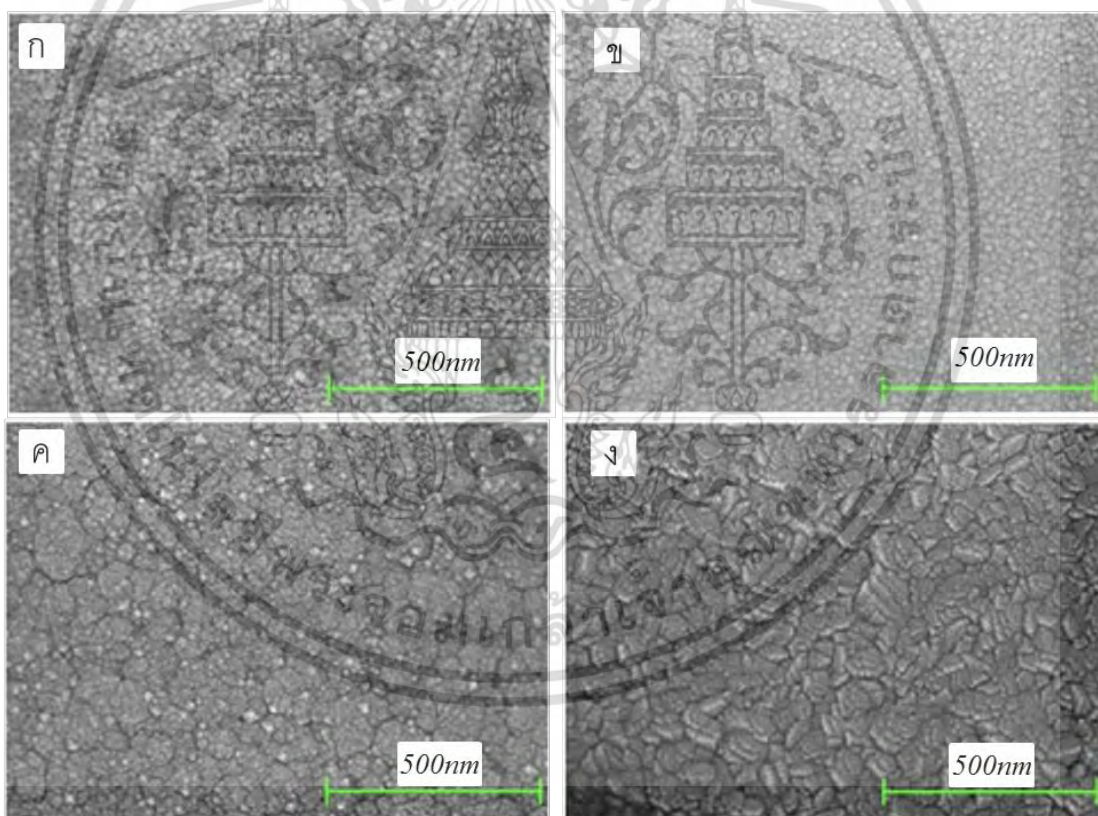
ตารางที่ 4.1 ความหนาของฟิล์มบาง และ อัตราการเกิดฟิล์มบาง

เวลาที่ใช้สร้างฟิล์ม (นาที)	ความหนาฟิล์ม (นาโนเมตร)	อัตราการเกิดฟิล์ม (นาโนเมตร/นาที)
5	75	15.0
15	229	15.3
30	521	17.4
60	1166	19.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(Scanning Electron Microscope, SEM) ที่ยังไม่ได้แอนนีส

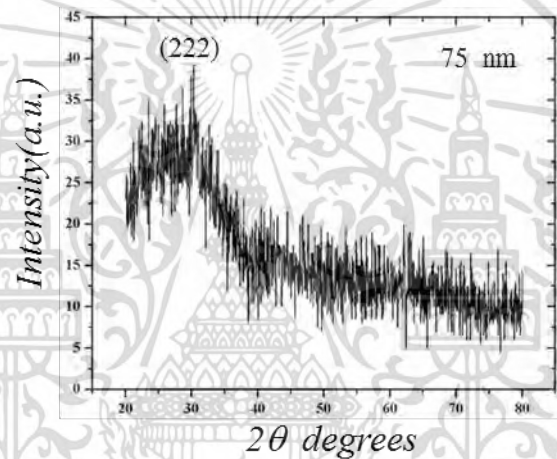
งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของความหนาที่มีต่อพื้นผิวของฟิล์มบาง ที่ได้จากสังเคราะห์ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ริง ดังรูปที่ 4.1 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่ความหนา 75 นาโนเมตร (รูปที่ 4.2(ก)) ได้ลักษณะสัณฐานวิทยาไม่ค่อยสมบูรณ์ เนื่องจากสีของผิวมีทั้งสีเทาและดำ โดยที่สีดำลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่ไม่สม่ำเสมอ ส่วนสีเทาเป็นลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่สม่ำเสมอ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่ความหนา 229 นาโนเมตร (รูปที่ 4.2(ข)) ได้ลักษณะสัณฐานวิทยาสมบูรณ์ขึ้นไม่มีจุดดำ ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่ความหนา 521 นาโนเมตร (รูปที่ 4.2(ค)) ได้ลักษณะสัณฐานวิทยาสมบูรณ์และมีผลึกของเกรนดีขึ้น ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มบางที่ความหนา 1166 nm (รูปที่ 4.2(ง)) ได้ลักษณะสัณฐานวิทยาสมบูรณ์และมีผลึกของเกรนดีขึ้นกว่ารูปที่ผ่านมา



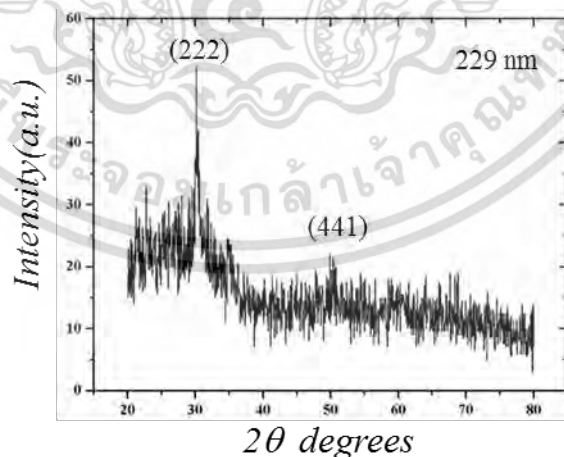
รูปที่ 4.1 สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาดพื้นผิวของฟิล์มบาง ที่ความหนาต่างๆ (ก) 75 nm (ข) 229 (ค) 521 nm และ (ง) 1166 nm

4.1.3 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์ม ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ที่ยังไม่ได้แอนนัล

งานวิจัยนี้ได้ทำการตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์มบางที่ได้จากการสเปกโตรริง ที่ใช้เวลาต่างๆ กัน นั้นจะใช้เทคนิคเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคชันเป็นเครื่องตรวจสอบการเรียงตัวของอะตอมและระนาบของความเป็นผลึกที่ลักษณะเฉพาะของสารแต่ละตัว แสดงดังรูปที่ 4.2 เป็นองค์ประกอบของฟิล์มแสดงระนาบเฉพาะของฟิล์ม คือ (222) (400) (441) (622) เป็นระนาบที่ตรงกับสารประกอบอินเดียมทินออกไซด์ และยังพบว่าเมื่อค่าความหนาฟิล์มเพิ่มขึ้นทำเกิดระนาบเด่นชัดมากขึ้นเพราะว่ามีความเป็นผลึกเพิ่มขึ้น ได้แก่ระนาบ (222) (441) (622)

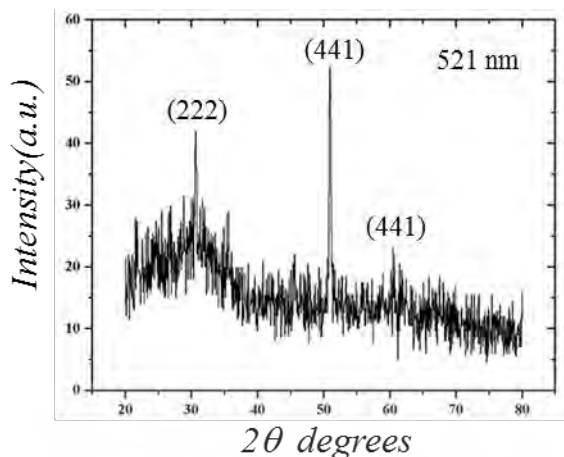


(ก) ฟิล์มบางที่ความหนา 75 นาโนเมตร

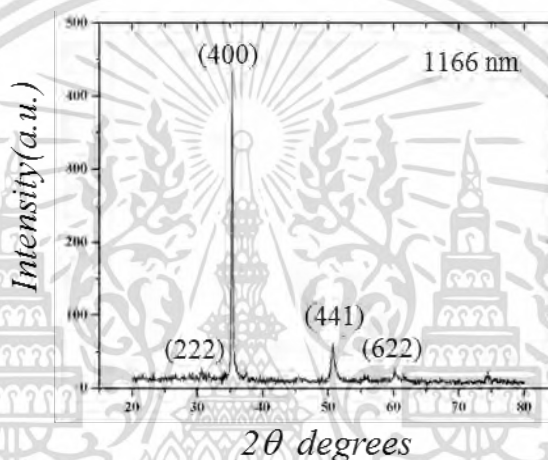


(ข) ฟิล์มบางที่ความหนา 229 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค) फिल्मบางที่ความหนา 521 นาโนเมตร



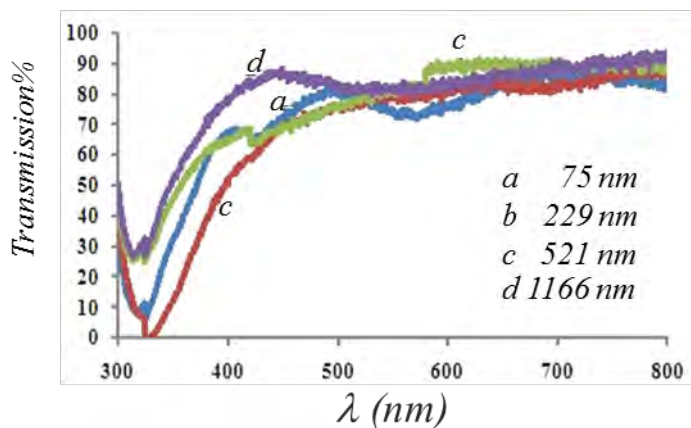
(ง) फिल्मบางที่ความหนา 1166 นาโนเมตร

รูปที่ 4.2 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบฟิล์มบางที่ได้จากสปีเตอร์ด้วยเป่าอินเดียมทินออกไซด์ด้วย(ITO)[19-22]

4.1.4 การตรวจสอบสมบัติทางแสงของฟิล์มที่ยังไม่ได้แอนนัล

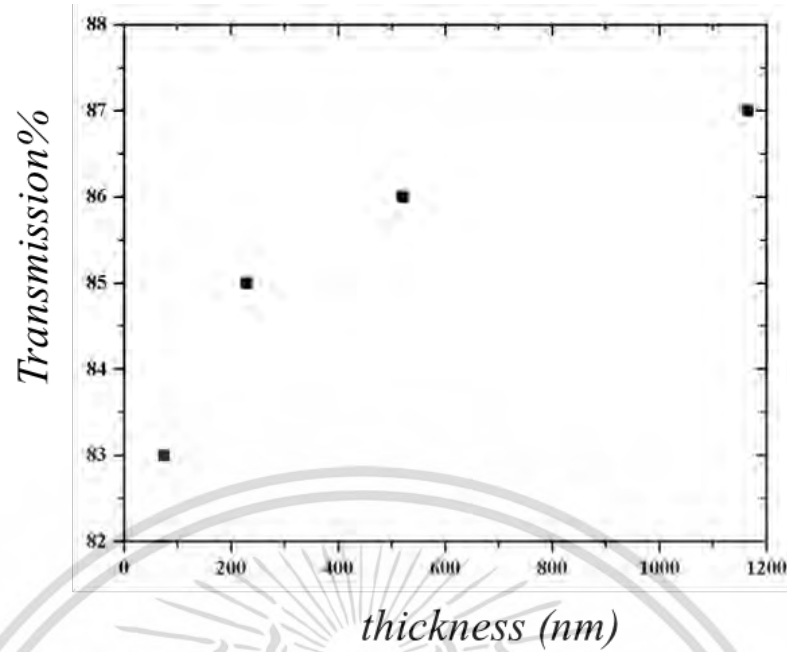
งานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบสมบัติเด่นของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ คือความโปร่งใส ที่ยอมให้แสงสีขาวย้อนผ่านตัวฟิล์มได้ ที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 400 ถึง 800 nm ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มบางที่มีความหนาของฟิล์มบางที่ต่างกัน โดยเน้นที่ที่แสงสีขาวยุคที่มีความยาวคลื่น(400 ถึง 700 nm) แสดงผลการส่องผ่านของแสง ดังรูปที่ 4.3 พบว่าแสงสามารถส่องผ่านฟิล์มได้มากกว่า 70% ขึ้นไป แต่ช่วงความยาวที่ต่ำกว่า 400 nm (ultraviolet)การส่องผ่านของได้ต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 การส่องผ่านของแสงผ่านฟิล์มบางที่ได้จากสปีเตอร์ด้วยเปาอินเดียมทินออกไซด์ด้วย(ITO) ที่ความหนาของฟิล์มต่างๆ กัน

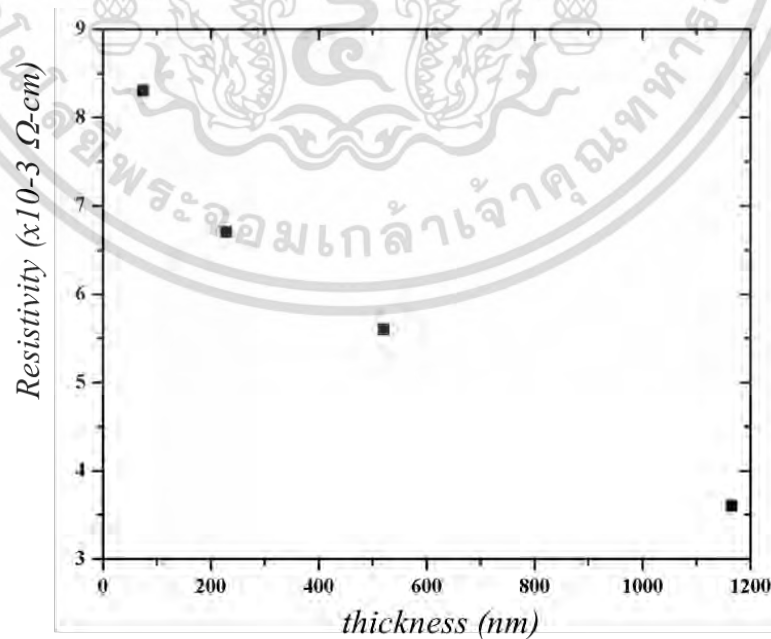
จากผลของความแตกต่างของค่าการส่องผ่านของแสงที่ความหนาฟิล์มบางต่างกันไม่มาก มาตรวจสอบการส่องผ่านของแสง โดยใช้ความยาวคลื่น 670 nm (แสงสีแดง) พบว่าความหนาของมีผลต่อการส่องผ่านของแสง ดังรูปที่ 4.4 ที่ความหนาของฟิล์มบาง 1166 nm (ซึ่งมีความหนาสูงสุด) แสงสีแดงสามารถส่องผ่านได้สูงสุด $\approx 87\%$ เพราะว่าการจัดเรียงของอนุภาคเป็นผลึกของอินเดียมทินออกไซด์ สอดคล้องกับผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบฟิล์มบาง ดังรูปที่ 4.2(ง) แต่ในขณะเดียวกันที่ความหนาฟิล์มบาง 75 nm แสงสีแดงสามารถส่องผ่านต่ำที่สุด $\approx 83\%$ เพราะการเรียงตัวของอนุภาคมีความเป็นผลึกต่ำ สอดคล้องกับผลการตรวจสอบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ขององค์ประกอบฟิล์มบาง ดังรูปที่ 4.2(ก) ส่งผลต่อการส่องผ่านของแสง เนื่องจากการดูดกลืน หรือ การกระเจิงของแสง



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับการส่องผ่านของแสงที่มีความคลื่น 670 nm.

4.1.5 การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ยังไม่ได้แอนนihil

การตรวจสอบสมบัติเด่นของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ อีกประการหนึ่งคือ สภาพความต้านไฟฟ้าที่ต่ำ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหนาฟิล์มบาง กับ สภาพความไฟฟ้า แสดงผลความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.5 พบว่าค่าความหนาของฟิล์มเพิ่มขึ้น จะได้ค่าสภาพความต้านทานลดลง

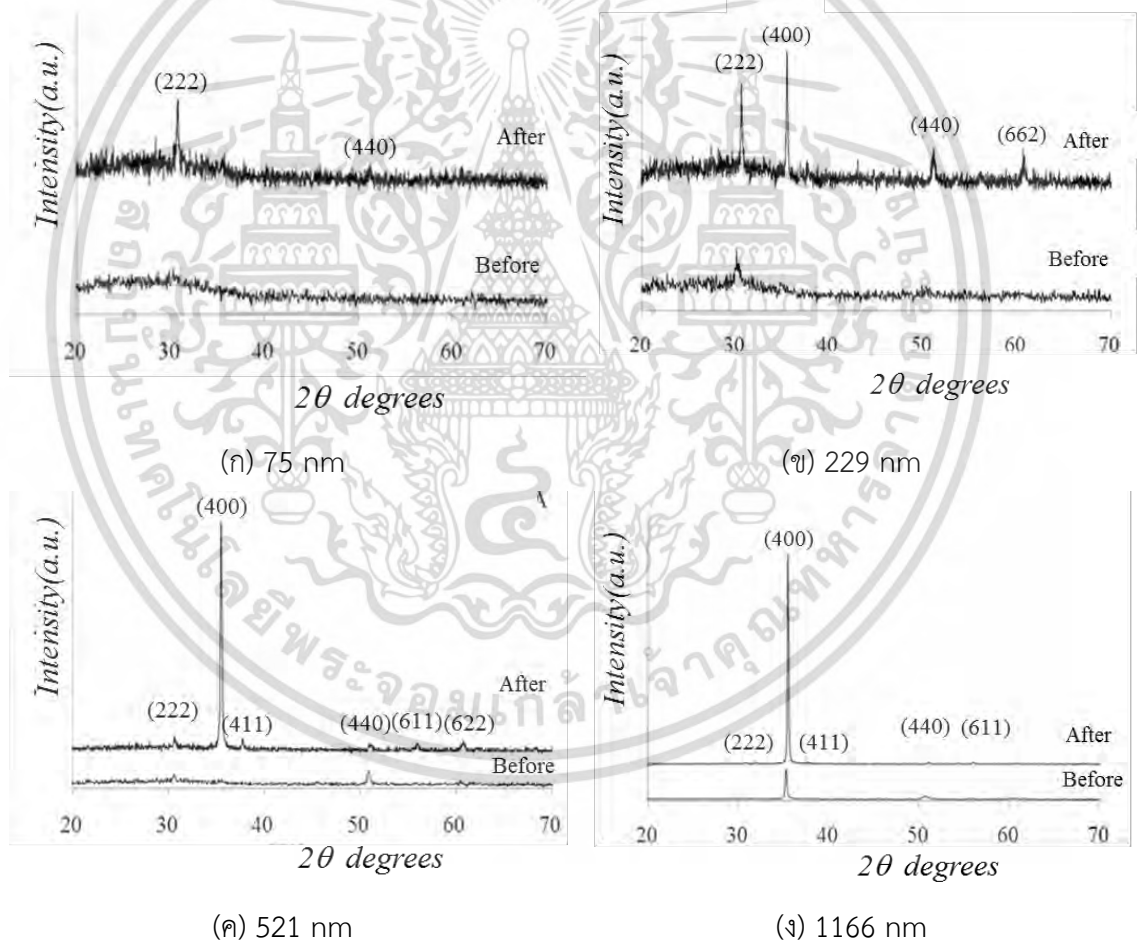


รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง ความหนาของฟิล์ม กับ ค่าสภาพความต้านทาน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทางความร้อนในบรรยากาศ

กระบวนการทางความร้อนที่ให้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ เรียกว่า “กระบวนการแอนนัลหรือ การแอนนัล(Annealing)” ที่อุณหภูมิไม่เกิน 550°C ในสภาพบรรยากาศที่แตกต่างกัน คือ ในอากาศ ก๊าซออกซิเจน(O_2) และ ก๊าซไนโตรเจน(N_2) ตามลำดับ

4.2.1 การตรวจสอบเอกลักษณ์ของฟิล์ม ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction, XRD) ที่ผ่านแอนนัลแล้ว



รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ขององค์ประกอบฟิล์มบางที่ได้จากสปีเตอร์ด้วยเป้าอินเดียมทินออกไซด์ด้วย(ITO) ทั้งก่อนและหลังการแอนนัล

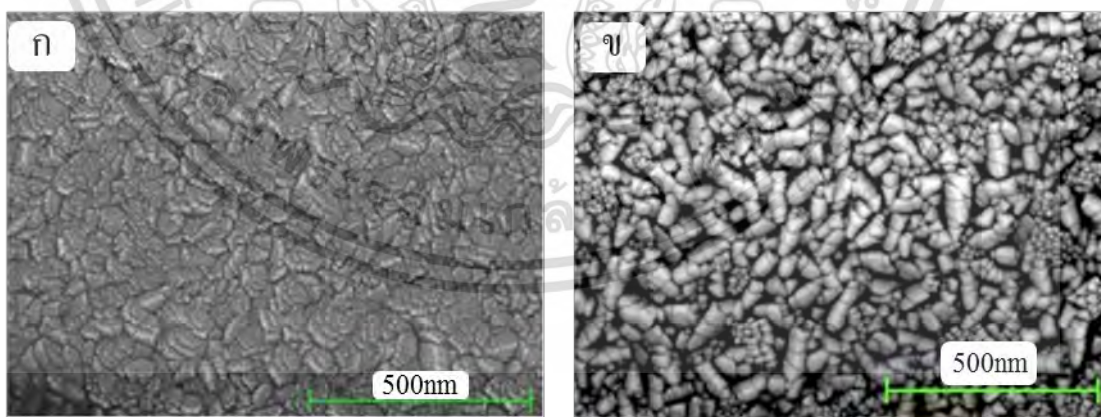
งานวิจัยนี้ได้ทำการแอนนัลฟิล์มบางที่อุณหภูมิประมาณ 500°C ในสภาพบรรยากาศ

โดยทั่วไป(ที่สัดส่วนการผสมก๊าซ ออกซิเจน 1 ส่วน และ ก๊าซไนโตรเจน 3 ส่วน) พบว่าฟิล์มมีคุณภาพดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขึ้นอย่างชัดเจน เมื่อเทียบกับก่อนการแอนนีสล ดังรูปที่ 4.6 ลักษณะการจัดตัวผลึกและโครงสร้างผลึก มีความสมบูรณ์มากขึ้น เริ่มจากความหนาของฟิล์มบาง 75 nm (รูปที่ 4.6(ก)) ระบายมีความชัดเจนมากขึ้น คือระบบ (222) (440) ที่ความหนาของฟิล์มบาง 229 nm (รูปที่ 4.6(ข)) ระบายมีความชัดเจนมากขึ้น คือระบบ (222) (400) (440) (622) ที่ความหนาของฟิล์มบาง 521 nm (รูปที่ 4.6(ค)) ระบายมีความชัดเจนมากขึ้น คือระบบ (222) (440) (411) (440) (611) (622) ที่ความหนาของฟิล์มบาง 1166 nm (รูปที่ 4.6(ง)) ระบายมีความชัดเจนมากขึ้น คือระบบ (222) (440) (440) (611) จากระนาบของฟิล์มบางที่ผ่านการแอนนีสลนั้นมีความเด่นชัดมากขึ้น แสดงว่ามีความผลึกมากขึ้นและอนุภาคมีการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบมากขึ้น

4.2.2 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด (Scanning Electron Microscope, SEM) ที่ผ่านแอนนีสล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มที่ผ่านการแอนนีสล พบว่ามีความเป็นผลึกที่สมบูรณ์มากขึ้น ดังรูปที่ 4.7 แต่มีรูปร่างของเกรนไม่เหมือนกัน เนื่องจากได้รับผลจากการแอนนีสลในบรรยากาศที่มีทั้งก๊าซออกซิเจนและไนโตรเจน โดยที่รูปร่างของเกรนมี 2 แบบ คือ รูปร่างตามยาวเรียงต่อกันคล้ายเส้น และ รูปร่างมนขนาดเล็กกว่าเกรนที่ลักษณะตามแนวยาว รูปแบบเกรนลักษณะเรียงตัวตามแนวยาวมีปริมาณมากกว่าเกรนที่มีลักษณะมนๆ คาดว่าน่าจะมีผลจากชนิดก๊าซที่ใช้แอนนีสล โดยที่รูปร่างเกรนยาวเป็นของก๊าซไนโตรเจน และ รูปร่างเกรนมนเป็นของก๊าซออกซิเจน



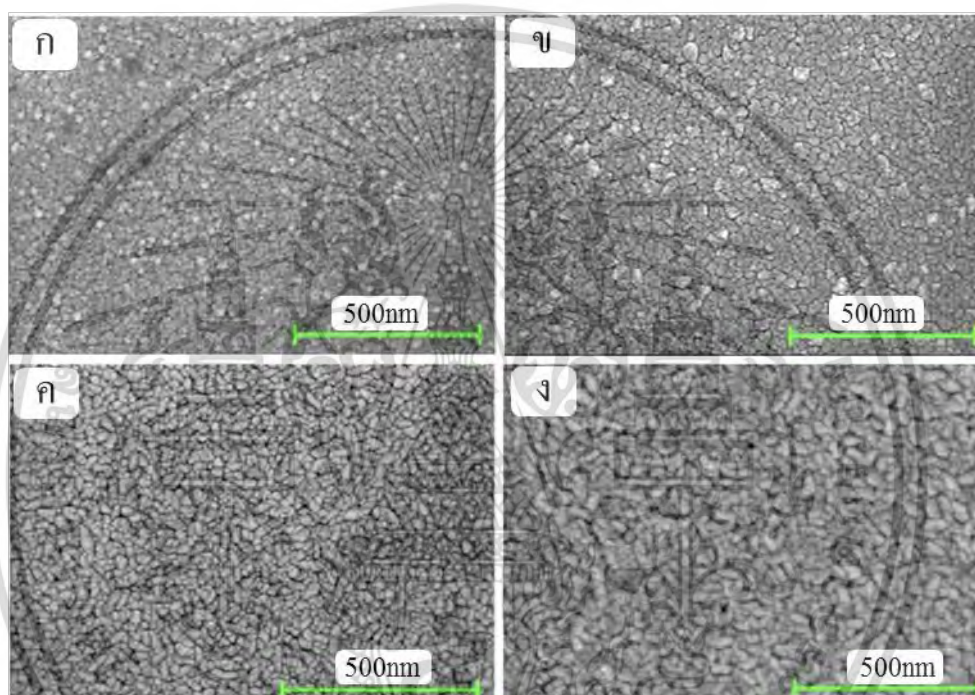
(ก) ไม่ผ่านแอนนีสล

(ข) ผ่านแอนนีสลในบรรยากาศ

รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเกรนระหว่าง (ก) กับ (ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนิลมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางในสภาวะบรรยากาศทั่วไป(ประกอบด้วย ก๊าซออกซิเจน 25% และไนโตรเจน 75%) ได้ผลความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.8 พบว่าอุณหภูมิของการแอนนิลมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางที่อุณหภูมิ 300 และ 400 °C ตามรูปที่ 4.8 (ค) และ รูปที่ 4.8 (ง) ตามลำดับ แต่ที่อุณหภูมิ 200 และ 300 °C ตามรูปที่ 4.8 (ก) และ รูปที่ 4.8 (ข) ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางยังไม่ค่อยเปลี่ยนแปลงซึ่งสังเกตได้จากลักษณะของเกรน แต่พื้นผิวเรียบขึ้น[23]

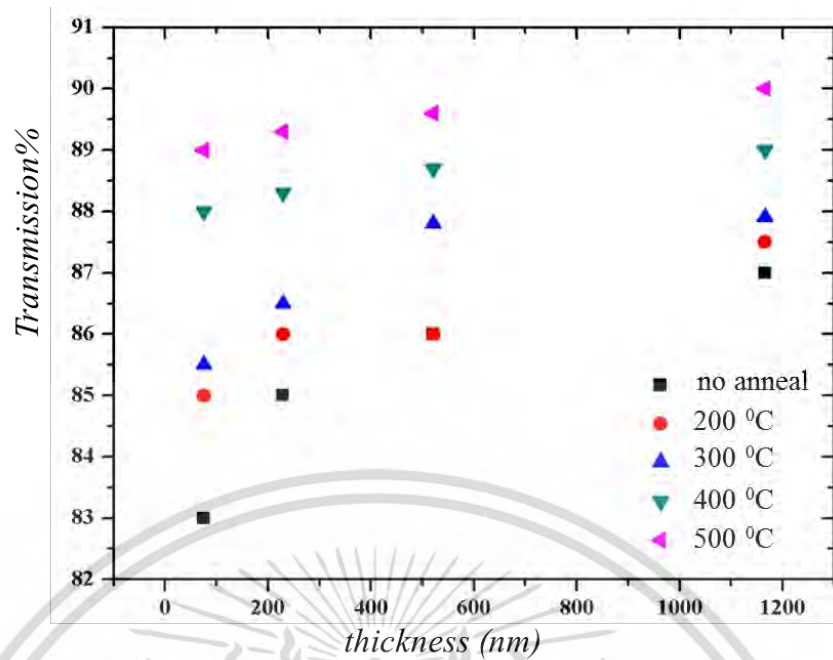


รูปที่ 4.8 การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาฟิล์มบาง ที่ความหนาหนา 229 nm ที่ผ่านการแอนนิลในสภาวะบรรยากาศ ที่อุณหภูมิต่างๆกัน คือ (ก) 200 °C, (ข) 300 °C, (ค) 400 °C และ (ง) 500 °C

4.2.3 สมบัติทางแสงของฟิล์มที่ผ่านการแอนนิล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนิลมีผลต่อการส่องผ่านของแสง(transmission) ได้ผลดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้แอนนิลมีค่าสูงสูงขึ้นการส่องผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้นและแสงผ่านได้สูงสุด $\approx 90\%$ ที่ความหนาฟิล์ม 1166 nm เพราะว่าเกรนมีการจัดเรียงของอนุภาคที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลการกระเจิงของแสงลดลงและ ขณะเดียวกันฟิล์มที่ไม่ผ่านการแอนนิลแสงส่อง

ผ่านได้ $\approx 87\%$
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

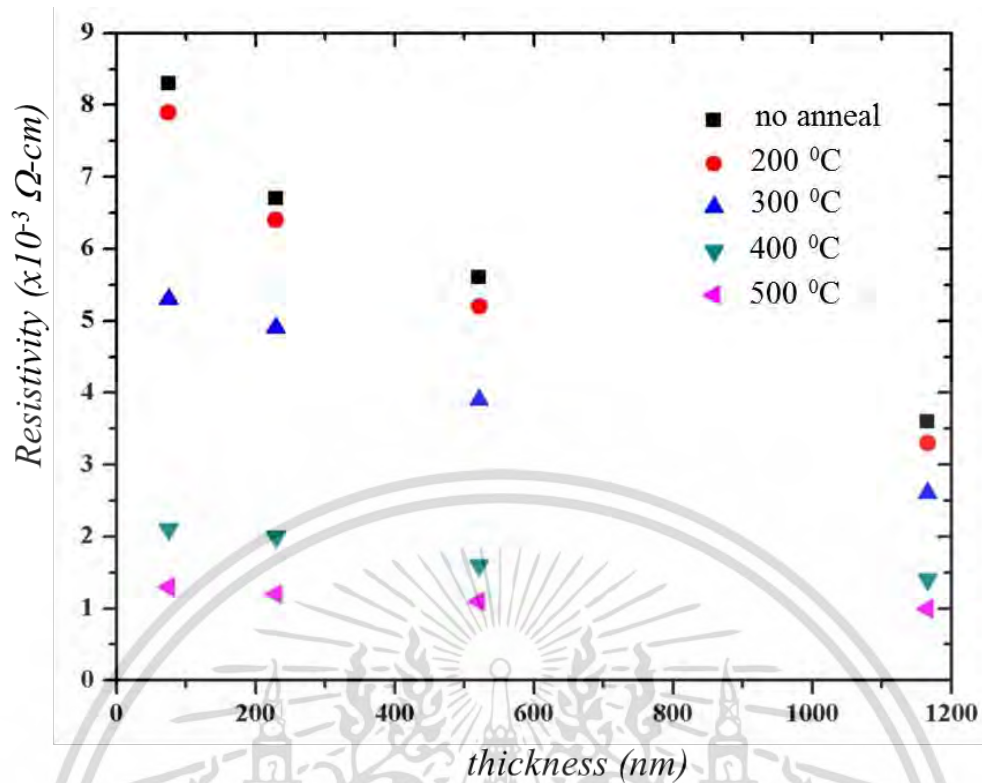


รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ การส่องผ่านของแสงสีขาวย ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.2.4 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ผ่านการแอนนัล

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนัลมีผลต่อสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ได้ผลดังรูปที่

4.10 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการแอนนัลที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มบางลดลง เนื่องจากอนุภาคมีการจัดเรียงตัวที่ขึ้นทำให้เกรนมีความสมบูรณ์ขึ้นและประจุพาหะมีสภาพคล่องตัวสูง ที่อุณหภูมิ 500 °C และความหนาฟิล์มบาง 1166 nm[24] ได้ค่าสภาพความต้านทานต่ำสุด



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ สภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

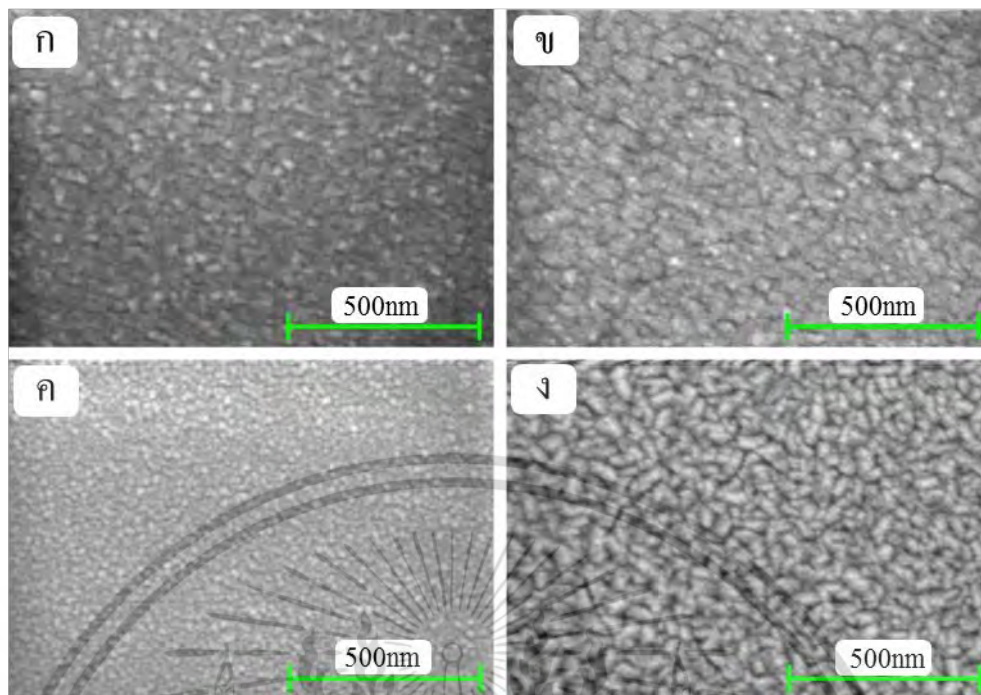
4.3 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทางความร้อนในก๊าซไนโตรเจน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์(ITO) โดยการแอนนีสที่อุณหภูมิไม่เกิน 500 °C ในสภาพบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน(N₂) เพื่อศึกษาถึงผลของความร้อนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางเพราะว่าก๊าซไนโตรเจน(N₂) จะมีสภาพความเฉื่อยใกล้เคียงกับก๊าซอาร์กอน(Ar)

4.3.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(Scanning Electron Microscope, SEM) ที่ผ่านแอนนีสด้วยก๊าซไนโตรเจน(N₂)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนีสมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางในสภาวะบรรยากาศก๊าซไนโตรเจน ได้ผลความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.11 มีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางคล้ายๆกับการแอนนีสที่ผ่านมา พบว่าฟิล์มบางได้ผ่านการแอนนีส ผลึกมีการเรียงตัวเป็นแนวยาวและผลึกมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น[25-26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

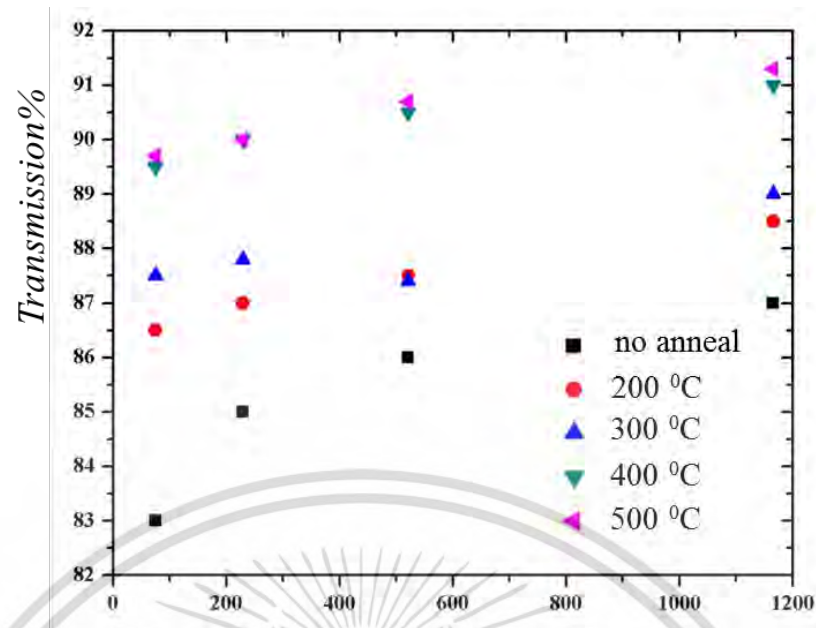


รูปที่ 4.11 การเปรียบเทียบลักษณะสัณฐานวิทยาฟิล์มบาง ที่ความหนาหนา 229 nm ที่ผ่านการแอนนีสในสถานะก๊าซไนโตรเจน ที่อุณหภูมิต่างๆกัน คือ (ก) 200 °C, (ข) 300 °C, (ค) 400 °C และ (ง) 500 °C

4.3.2 สมบัติทางแสงของฟิล์มที่ผ่านการแอนนีสด้วยก๊าซไนโตรเจน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนีสมีผลต่อการส่องผ่านของแสง(transmission) ได้ผลดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้แอนนีสมีค่าสูงขึ้นการส่องผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลคล้ายกับการแอนนีสในสภาพบรรยากาศทั่วไป และแสงผ่านได้สูงสุด $\approx 91\%$ [27] ที่ความหนาฟิล์ม 1166 nm เพราะว่าเกรนมีการจัดเรียงของอนุภาคที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลการกระเจิงของแสงลดลงและ ขณะเดียวกันฟิล์มที่ไม่ผ่านการแอนนีสแสงส่องผ่านได้ $\approx 87\%$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

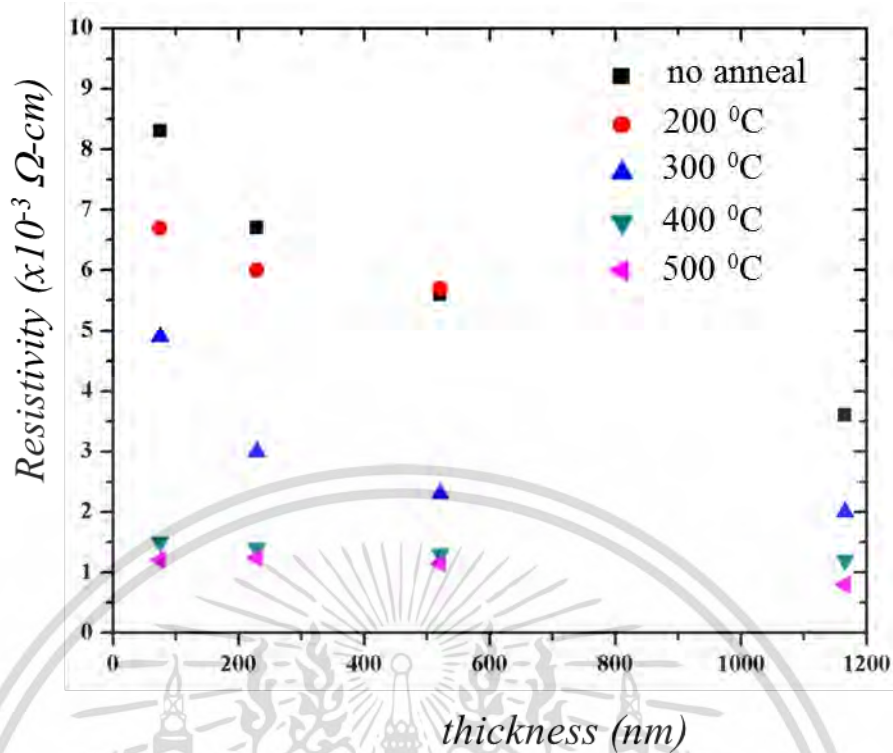


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ การส่องผ่านของแสงสีขาว่า ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.3.3 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ผ่านการแอนนัลด้วยก๊าซไนโตรเจน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนัลมีผลต่อสภาพต้านทานทางไฟฟ้าได้ผล ดังรูปที่

4.13 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการแอนนัลที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มบางลดลง เนื่องจากอนุภาคมีการจัดเรียงตัวที่ขึ้นทำให้เกรนมีความสมบูรณ์ขึ้นและประจุพาหะมีสภาพคล่องตัวสูง ที่อุณหภูมิ 400-500 °C และความหนาฟิล์มบาง 1166 nm[24] ได้ค่าสภาพความต้านทานต่ำสุด



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ สภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

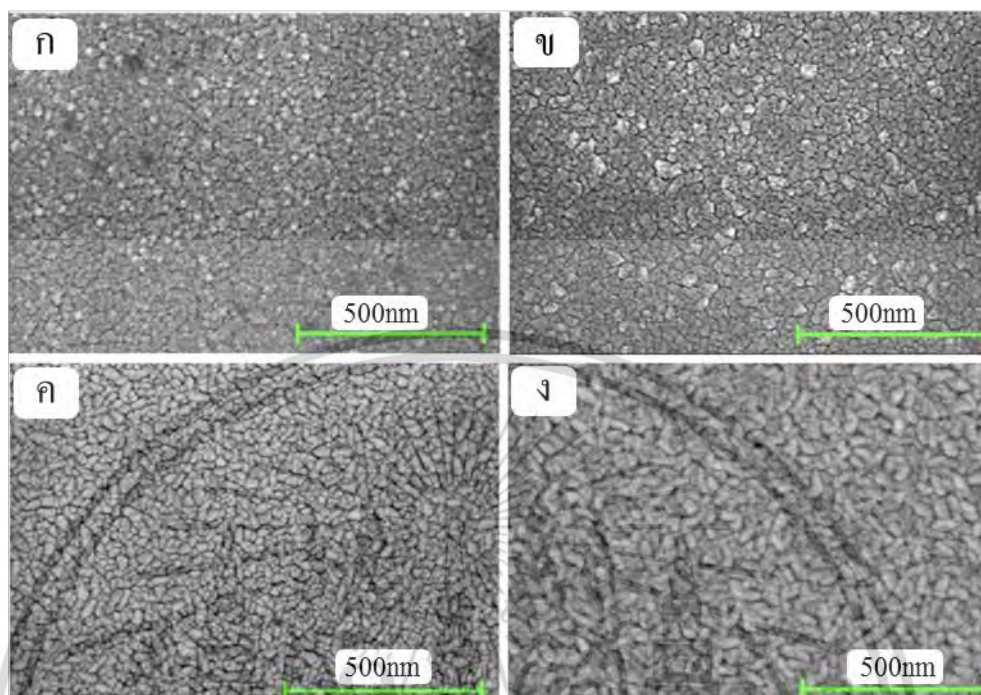
4.4 การปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยกระบวนการทางความร้อนในก๊าซออกซิเจน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการปรับปรุงสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์(ITO) โดยการแอนนัลที่อุณหภูมิไม่เกิน 500 °C ในสภาพบรรยากาศก๊าซออกซิเจน(O₂) เพื่อศึกษาถึงผลของความร้อนและผลองก๊าซออกซิเจนที่มีต่อสมบัติของฟิล์มบางเพราะว่าก๊าซออกซิเจน(O₂) จะมีสภาพความไวต่อฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์(ITO)

4.4.1 การตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกวาด(Scanning Electron Microscope, SEM) ที่ผ่านแอนนัลด้วยก๊าซออกซิเจน(O₂)

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนัลมีผลต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มบางในสภาวะบรรยากาศก๊าซออกซิเจน(O₂) ได้ผลความสัมพันธ์ ดังรูปที่ 4.14 พบว่าผลึกเริ่มจับตัว

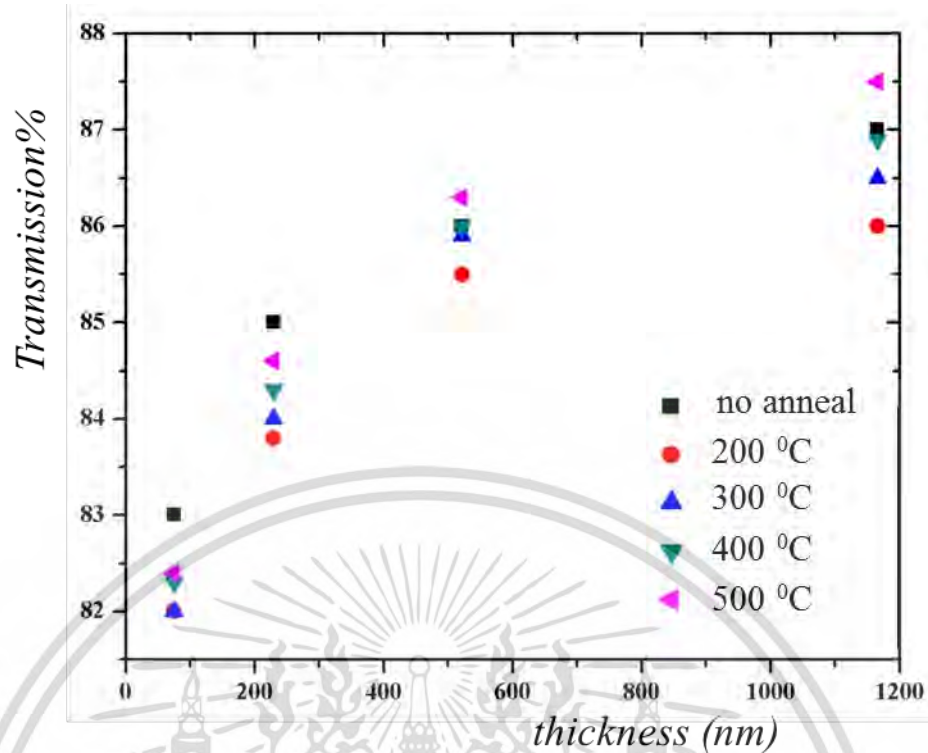
เป็นผลึก เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น และแนวโน้มการจัดเรียงตัวดีขึ้น ทำให้ลักษณะพื้นผิวและขนาดรูปร่างของเกรนใกล้เคียงกัน[24]



รูปที่ 4.14 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพื้นผิวฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ความหนา 229 nm แอนนีสใน บรรยากาศของก๊าซออกซิเจน ที่อุณหภูมิ (ก) 200 °C, (ข) 300 °C, (ค) 400 °C และ (ง) 500 °C

4.4.2 สมบัติทางแสงของฟิล์มที่ผ่านการแอนนีสด้วยก๊าซออกซิเจน

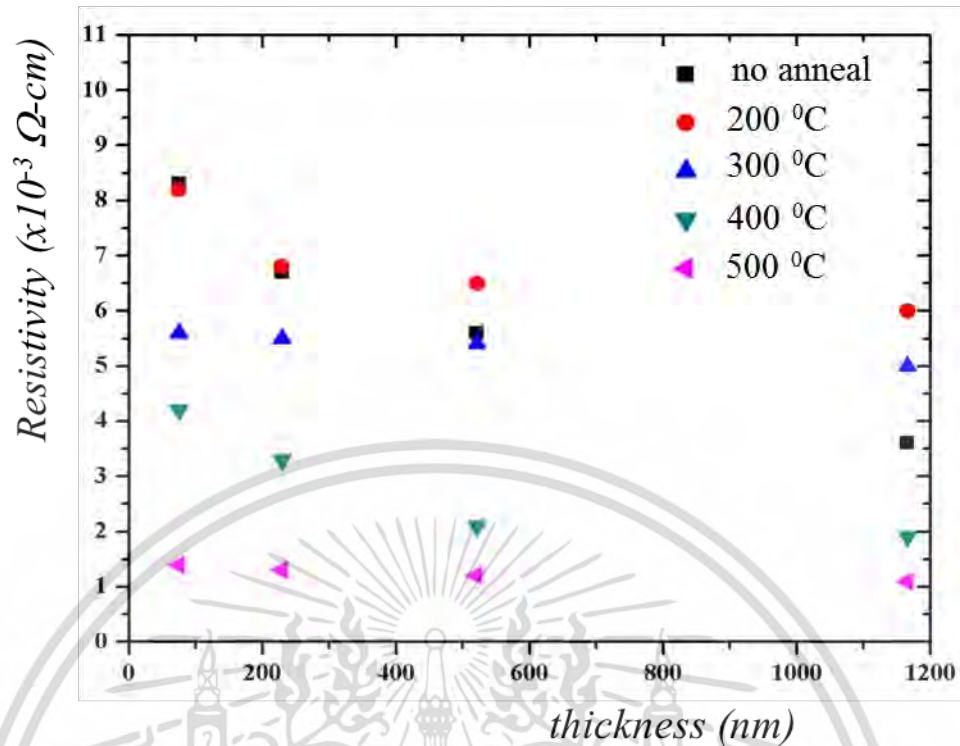
งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนีสมีผลต่อการส่องผ่านของแสง(transmission) ได้ผลดังรูปที่ 4.12 พบว่าเมื่ออุณหภูมิที่ใช้แอนนีสมีค่าสูงขึ้นการส่องผ่านของแสงจะเพิ่มขึ้นซึ่งมีผลคล้ายกับการแอนนีสในสภาพบรรยากาศทั่วไป และแสงผ่านได้สูงสุด $\approx 88\%$ ที่ความหนาฟิล์ม 1166 nm เพราะว่าเกรนมีการจัดเรียงของอนุภาคที่เป็นระเบียบมากขึ้น ส่งผลการกระเจิงของแสงลดลง และ ขณะเดียวกันฟิล์มที่ไม่ผ่านการแอนนีสแสงส่องผ่านได้ $\approx 83\%$



รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ การส่องผ่านของแสงสีขาวย ที่อุณหภูมิต่างๆ

4.4.3 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มที่ผ่านการแอนนีย์ลด้วยก๊าซออกซิเจน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของอุณหภูมิที่ใช้แอนนีย์ลมีผลต่อสภาพต้านทานทางไฟฟ้า ได้ผลดังรูปที่ 4.16 พบว่าเมื่ออุณหภูมิของการแอนนีย์ลที่สูงขึ้นจะทำให้ค่าสภาพต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มบางลดลง เนื่องจากอนุภาคมีการจัดเรียงตัวที่ขึ้นทำให้เกรนมีความสมบูรณ์ขึ้นและประจุพาหะมีสภาพคล่องตัวสูง ที่อุณหภูมิ 400-500 °C และความหนาฟิล์มบาง 1166 nm[42][26] ได้ค่าสภาพความต้านทานต่ำสุด



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของฟิล์ม กับ สภาพต้านทานทางไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่างๆ

4.5 การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส

งานวิจัยนี้ได้ทำการวัดทดสอบสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่ผ่านมาเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นขั้วไฟฟ้าตัวนำ โดยได้ทำการแอนนिलในช่วงอุณหภูมิ 200-500 °C ซึ่งมีจุดประสงค์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกายภาพ สมบัติทางไฟฟ้า และการผ่านของแสง

การพิจารณาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะนำฟิล์มบางไปประยุกต์ใช้งาน ได้แก่ ความหนาฟิล์ม อุณหภูมิที่ใช้แอนนिल สภาพสภาวะบรรยากาศ การส่องผ่านของแสง และ สภาพความต้านทานทางไฟฟ้า

การแอนนिलที่อุณหภูมิสูงในช่วง 400-500 °C ได้ลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาทางพื้นผิวของฟิล์มมีรอยแตก จึงทำให้ไม่เหมาะสมที่จะนำมาทำเป็นขั้วไฟฟ้าได้ และส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในการแอนนिल คือ 300 °C ได้ลักษณะทางสัณฐานทางวิทยาทางพื้นผิวของฟิล์มไม่มีรอยแตก สภาพความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้านทานไฟฟ้าที่ดี และ การส่องผ่านของแสงที่ดี ส่วนความหนาของฟิล์มบางที่เหมาะสม คือ 230 nm และสภาพบรรยากาศสำหรับการแอนนีส คือ ก๊าซไนโตรเจน

ตารางที่ 4.2 การเปรียบเทียบสภาพบรรยากาศสำหรับการแอนนีส ที่อุณหภูมิ 300 °C

สมบัติ	ไม่แอนนีส	ไนโตรเจน+ออกซิเจน	ไนโตรเจน	ออกซิเจน
สภาพความต้านทาน(Ω -cm)	6.7×10^{-3}	4.8×10^{-3}	2.8×10^{-3}	5.2×10^{-3}
การส่องของแสง	85	86.5	88	83.5

4.5.1 รูปทรงเรขาคณิตและขนาดพื้นที่รับแสง

งานวิจัยนี้ได้ใช้รูปทรงเรขาคณิต ที่เป็น วงกลม สี่เหลี่ยม และ สี่เหลี่ยมมุมมน และใช้ขนาดพื้นที่(mm^2) 0.0625, 0.25, 1.0 และ 4 ตามลำดับ

โดยงานวิจัยนี้วัดค่ากระแสรั่วที่ไม่มีแสง หรือ กระแสรั่วมืด(dark current, I_{0_dark}) โดยสร้างฟิล์มบางลงแผ่นฐานรองซิลิคอน และได้ผลกระแสมืด(dark current, I_{0_dark})

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบรูปทรงเรขาคณิต พื้นที่ และ ค่ากระแสมืด

ขนาดพื้นที่รับแสง mm^2	กระแสมืด หรือ dark current(μm)		
	วงกลม	สี่เหลี่ยมขอบมน	สี่เหลี่ยม
0.0625	4.36	4.52	4.62
0.25	16.8	17.8	17.9
1.00	66.9	69.6	70.3
4.00	265.2	274.4	278.2

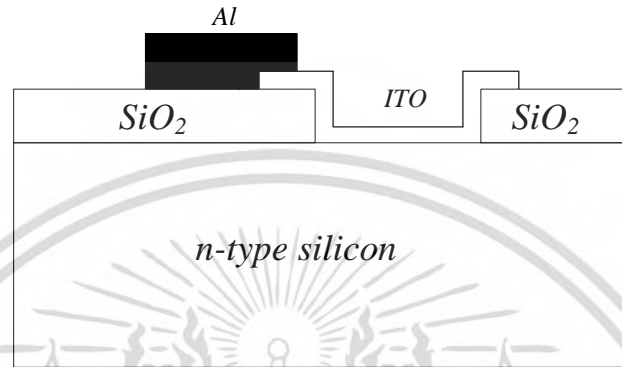
ผลของค่ากระแสมืด ตามตารางที่ 4.3 พบว่าเมื่อขนาดพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น จะได้ค่ากระแสมืดก็จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่เมื่อนำขนาดพื้นที่รับแสงเท่ากันและรูปทรงเรขาคณิตต่างกัน พบว่าพื้นที่วงกลมให้ค่ากระแสมืดต่ำที่สุด เพราะว่ามีขนาดเส้นรอบวงกลมน้อยที่สุด

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะได้เงื่อนไขรูปทรงเรขาคณิตและพื้นที่ทรงกลม และขนาดพื้นที่ 0.0625 mm^2 มาเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นขั้วไฟฟ้าตัวนำ ดังรูปที่ 4.17 เป็นรอยต่อของวัสดุระหว่าง

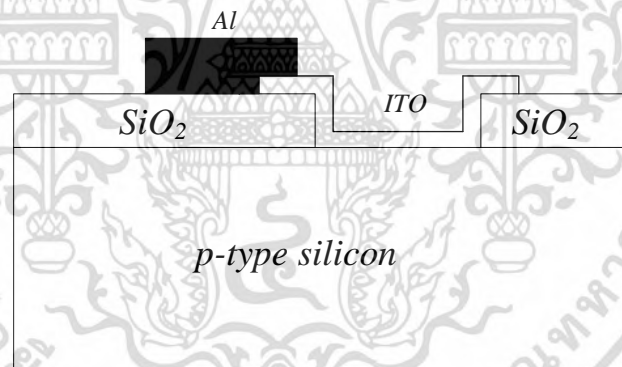
ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ITO/Silicon ได้ค่าแรงดันภายใน น้อยกว่า 0.4 V เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.2 การประยุกต์ใช้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์เป็นขั้วไฟฟ้า สำหรับเซนเซอร์แสง

การสร้างตัวเซนเซอร์แสงนั้นจะเทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำซิลิคอนซึ่งเป็นไดโอดชนิดหนึ่ง ที่ใช้ฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ แทนที่ โลหะอลูมิเนียม เพื่อเพิ่มที่รับแสง ดังภาพตัดขวางรูปที่ 4.18 และ ภาพตัดขวางรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.17 ภาพตัดขวางของเซนเซอร์แสง ที่ใช้รอยต่อระหว่าง ITO/n-type silicon ที่สภาพความต้านทานของซิลิคอน $10 \Omega \text{ cm}$

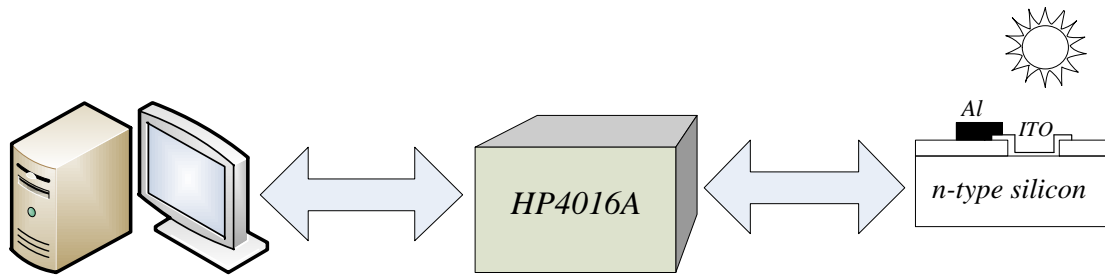


รูปที่ 4.18 ภาพตัดขวางของเซนเซอร์แสง ที่ใช้รอยต่อระหว่าง ITO/n-type silicon ที่สภาพความต้านทานของซิลิคอน $1-10 \Omega \text{ cm}$

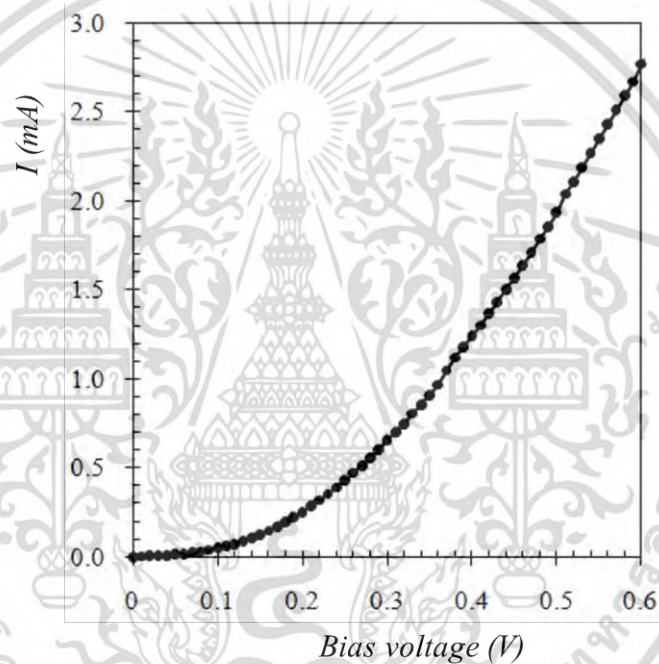
4.5.3 การวัดสมบัติทางไฟฟ้ารอยต่อสัมผัสแบบช็อตกีย์ไดโอด

ระบบการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของช็อตกีย์ไดโอด แสดงดังรูปที่ 4.20 ประกอบด้วย คอมพิวเตอร์ เครื่อง HP4061A และเซนเซอร์แสงแบบรอยต่อสัมผัสแบบช็อตกีย์ไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ระบบการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของซีตทิกียโดโอด ที่ไม่ได้ฉายแสง

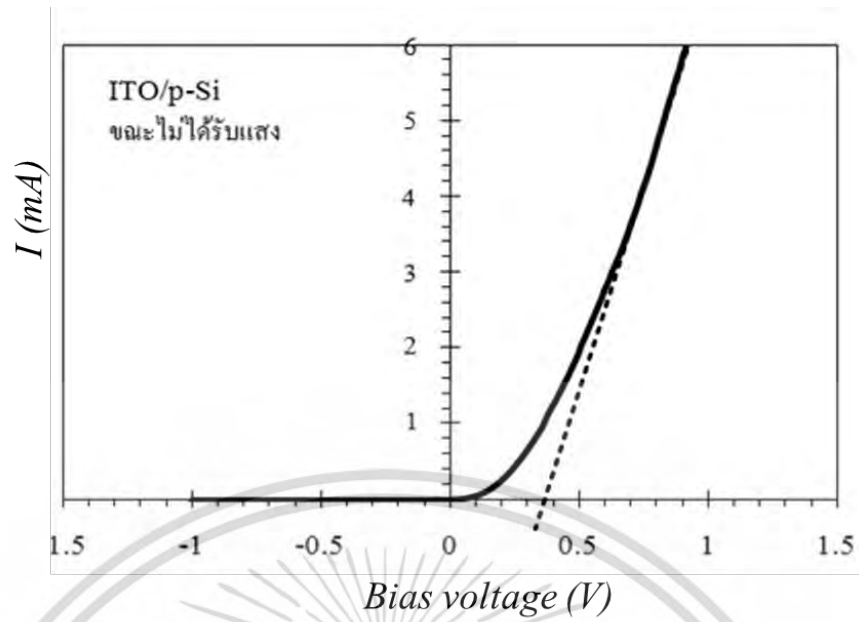


รูปที่ 4.20 ลักษณะของแรงดันที่ไบอัส-กระแสของรอยสัมผัสแบบซีตทิกีย

จากการวัดทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัสกับค่ากระแส ได้ผลดังรูปที่ 4.20 ที่รอยต่อสัมผัสแบบซีตทิกียโดโอด มีค่าแรงดันภายใน(built in voltage, V_{bi}) อยู่ในช่วง 0.2-0.4 V. มีสมบัติใกล้เคียงกับซีตทิกียโดโอด

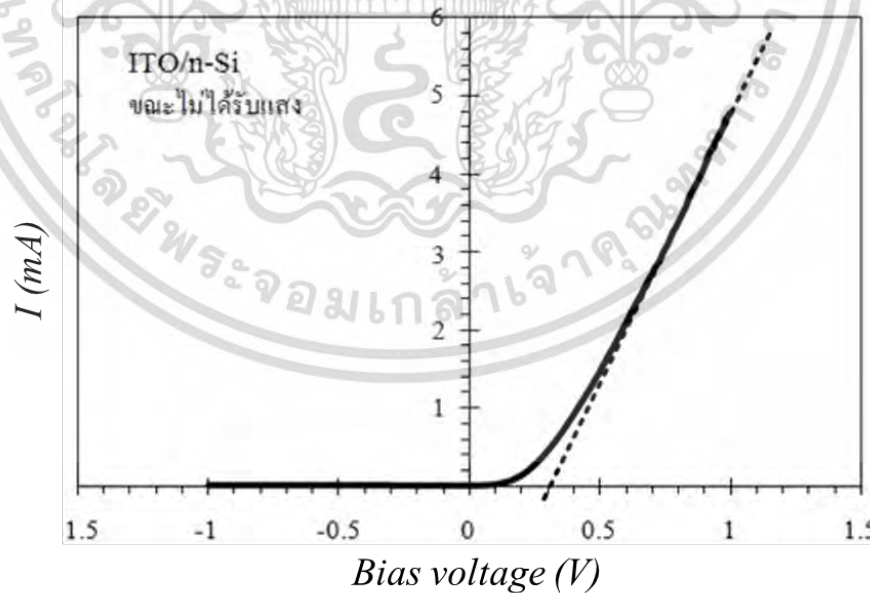
จากการวัดทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัสกับค่ากระแสของรอยต่อสัมผัส ITO/n-type-Silicon ดังรูปที่ 4.21 ได้ค่าแรงดันภายใน(V_{bi}) ≈ 0.30 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัส-กระแสของรอยสัมผัส ITO/n-type-Silicon

จากการวัดทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัสกับค่ากระแสของรอยต่อสัมผัส ITO/n-type-Silicon ดังรูปที่ 4.22 ได้ค่าแรงดันภายใน(V_{bi}) ≈ 0.35 V



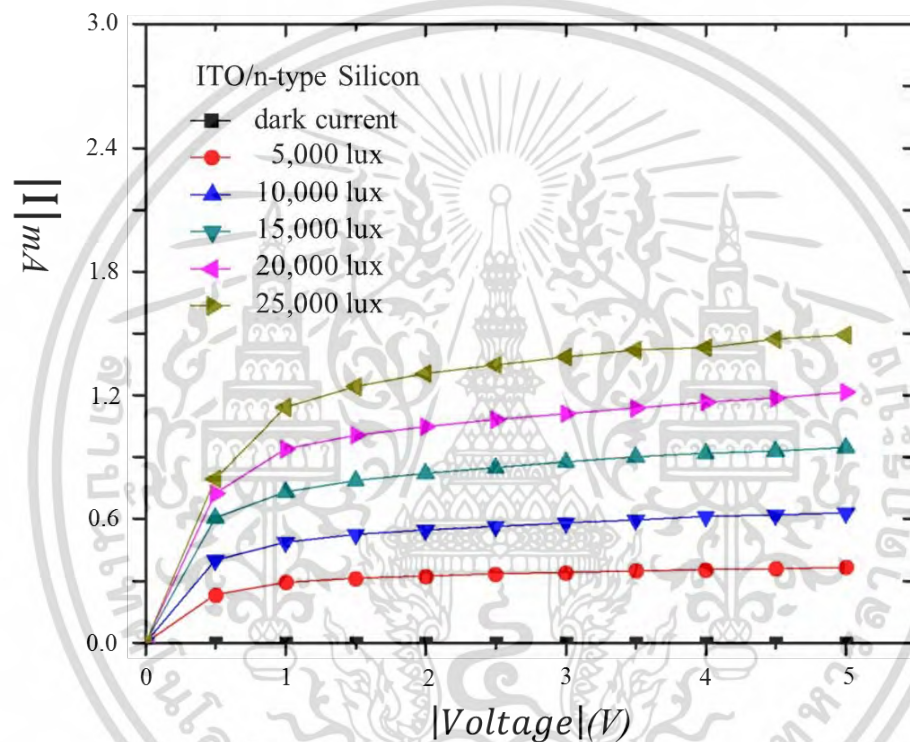
รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัส-กระแสของรอยสัมผัส ITO/p-type Silicon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.4 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าของการไบอัสแรงดันกับกระแสของเซนเซอร์แสง

งานวิจัยนี้จะศึกษาผลของฉายแสงด้วยแหล่งกำเนิดจากหลอดฉายฮาโลเจน ที่มีกำลังงาน 150 วัตต์ ในช่วงความเข้มข้นของแสง 5000-25000 lux ลงบนหัวเซนเซอร์แสง ทั้ง 2 แบบ คือ ITO/n-type Si และ ITO/p-type Si

กรณีเซนเซอร์แสงแบบ ITO/n-type Si ได้ค่ากระแสสูงสุด ≈ 1.5 mA ที่ไบอัสแรงดัน 5 V และฉายแสงที่ความเข้มแสง 25000 lux ดังรูปที่ 5.23

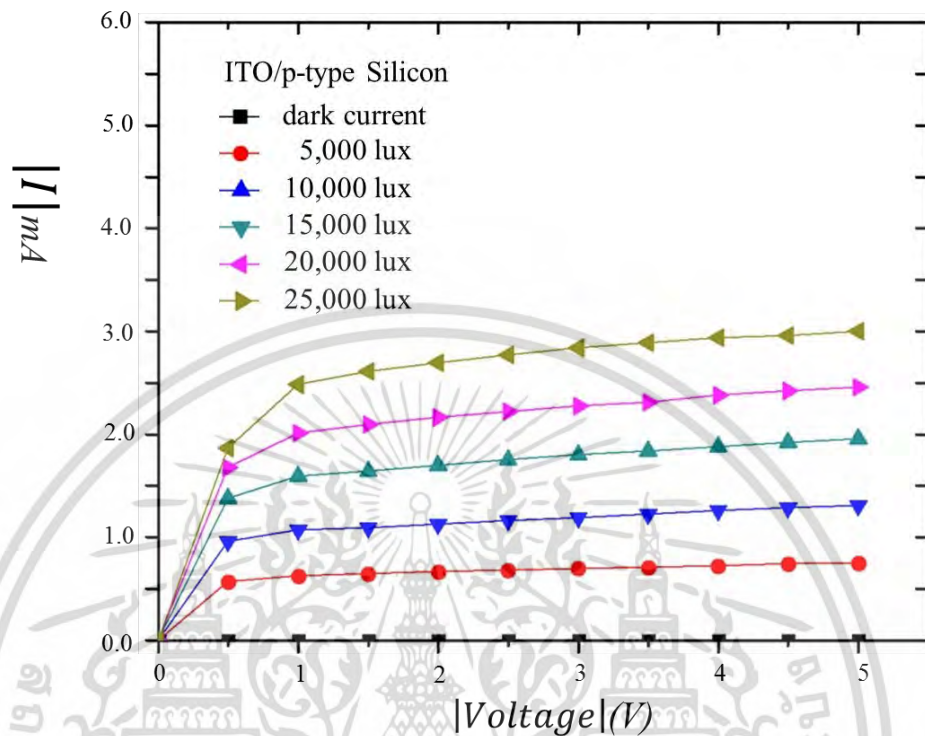


รูปที่ 4.23 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแรงดันไบอัสกับกระแสแสง โดยความเข้มแสงมีค่าต่างๆ ของรอยต่อสัมผัส ITO/n-type Silicon

กรณีเซนเซอร์แสงแบบ ITO/p-type Silicon ได้ค่ากระแสสูงสุด ≈ 3 mA ที่ไบอัสแรงดัน 5 V และฉายแสงที่ความเข้มแสง 25000 lux ดังรูปที่ 5.23

จากเปรียบเทียบค่ากระแสแสงของเซนเซอร์แสงฉายแสงที่ ITO/p-type Silicon จะมีปริมาณกระแสแสงมากกว่า กระแสแสงของ ITO/n-type Silicon ทั้งนี้เพราะว่า การวัดค่ากระแสของแสงจะวัดจากกระแสที่มาจากพาหะส่วนน้อยมีค่าสภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน $1350 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ กรณี p-type Silicon มีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อย และมีค่าสภาพการเคลื่อนที่ของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

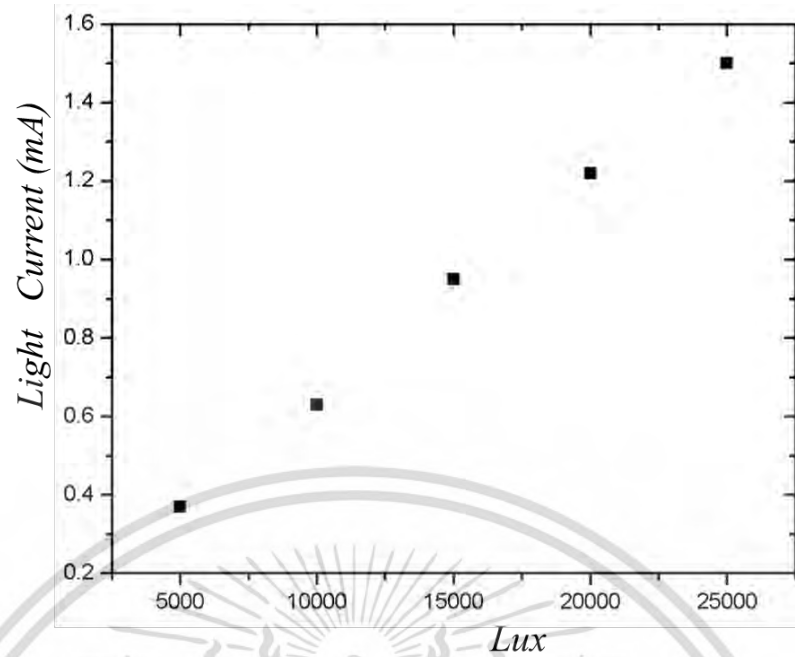
อิเล็กตรอน ส่วนกรณี n-type Silicon มีโฮลเป็นพาหะส่วนน้อย และมีค่าสภาพการเคลื่อนที่ของโฮล $450 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$



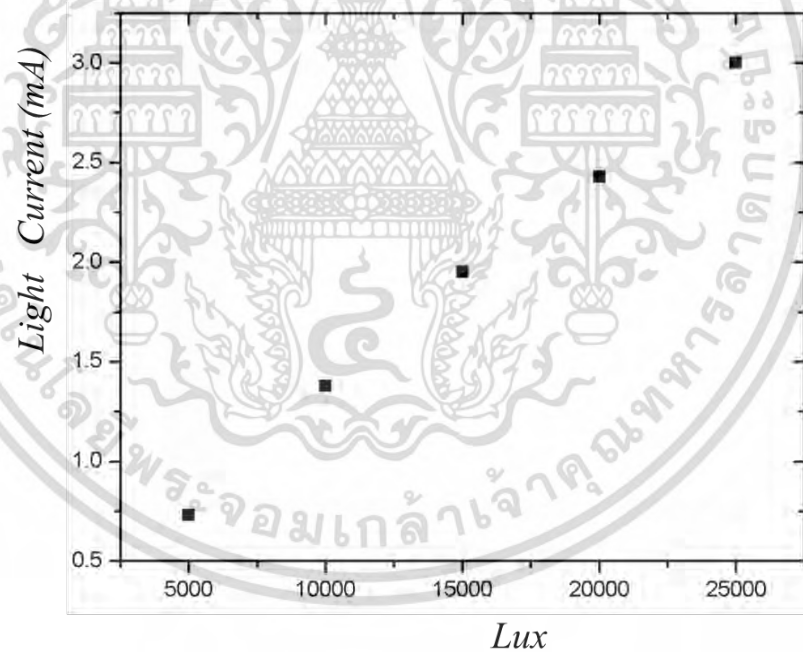
รูปที่ 4.24 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสต้นไบอัสกับกระแสแสง โดยความเข้มแสงมีค่าต่างๆ ของรอยต่อสัมผัส ITO/p-type Silicon

งานวิจัยนี้จะศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับกระแสแสง ได้ผลดัง รูปที่ 4.25 และ รูปที่ 4.26 พบว่าการเพิ่มของกระแสแสงจะแปรผันตรงกับค่าความเข้มของที่ฉาย ทั้งรอยสัมผัส ITO/n-type Silicon และ ITO/p-type Silicon

โดยที่กระแสแสงของ ITO/n-type Silicon ได้ค่า $\approx 1.5 \text{ mA}$ และ $\approx 3 \text{ mA}$ สำหรับ ITO/p-type Silicon



รูปที่ 4.25 กราฟค่ากระแสแสงที่ฉายแสงด้วยความเข้มแสงต่างๆ ของ ITO/n-type Silicon

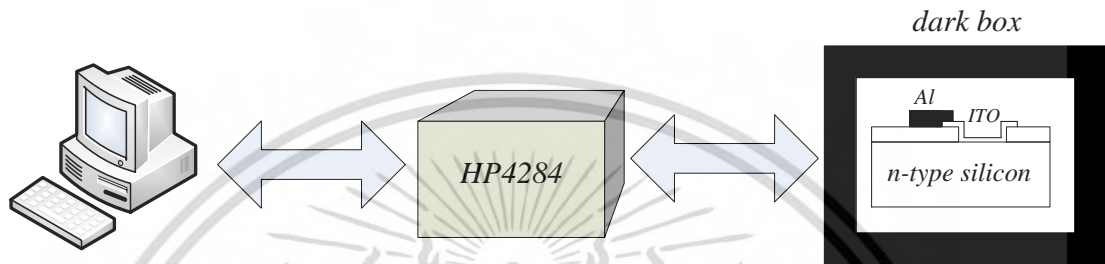


รูปที่ 4.26 กราฟค่ากระแสแสงที่ฉายแสงด้วยความเข้มแสงต่างๆ ของ ITO/p-type Silicon

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5.5 การวัดสมบัติทางไฟฟ้าการไบอัสย้อนกลับกับความประจุไฟฟ้าของรอย ITO/silicon ของตัวเซนเซอร์แสง

การวัดสมบัติทางไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อ ITO/silicon ของเซนเซอร์แสงที่มีโครงคล้ายรอยต่อพีเอ็นของไดโอด มีระบบการวัด ดังรูปที่ 4.27 โดยการวัดทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ไบอัสกับค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ ITO/Silicon



รูปที่ 4.27 ระบบการวัดความจุทางไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อ ITO/silicon

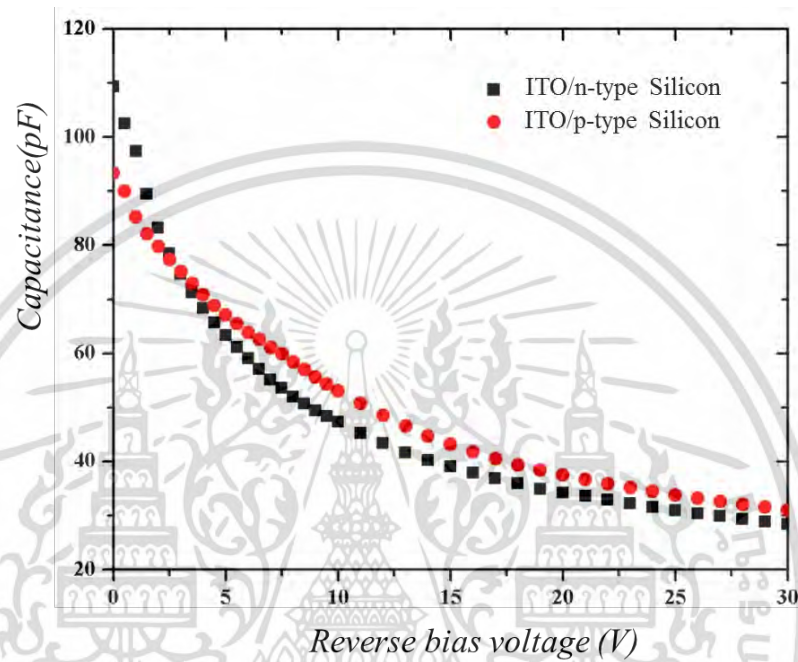
ในขณะยังไม่ได้ไบอัสแรงดันย้อนกลับ (0 V) ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อสัมผัส ITO/n-type silicon ได้ค่าความจุไฟฟ้า $\approx 110 \mu\text{F}$ และส่วนความจุไฟฟ้าที่รอยต่อสัมผัส ITO/p-type silicon ได้ค่าความจุไฟฟ้า $\approx 95 \mu\text{F}$ ดังรูปที่ 4.28

เมื่อทำการไบอัสแรงดันย้อนกลับ ค่าความจุไฟฟ้าตรงบริเวณรอยต่อ (ITO/n-type silicon และ ITO/p-type silicon) มีแนวโน้มลดลงตามขนาดแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยการลดลงของค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันตรงส่วนกลับขนาดความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ดังสมการ (4.1) และ (4.2) ดังรูปที่ 4.29

$$C = \frac{A\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (4.1)$$

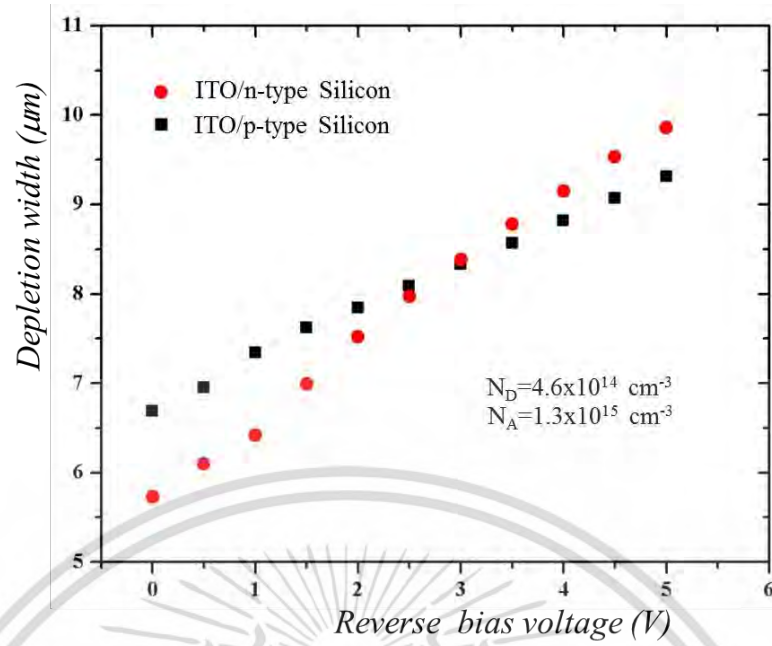
$$C = \frac{A\epsilon_s}{W} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (4.2)$$

- ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ
- N_D คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-type Silicon
- N_A คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้รับใน p-type Silicon
- V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ
- W คือ ความกว้างบริเวณเขตปลอดพาหะ



รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงทั้ง 2 โครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณเขตปลอดพาหะ กับ การไบอัสแรงดันย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้นำเสนอกระบวนการสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ ด้วยวิธีการสปีดเตอร์ เพื่อนำฟิล์มบางที่ได้ไปประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าตัวนำโปร่งใส ที่สามารถใช้งานได้ใกล้เคียงกับฟิล์มโลหะอลูมิเนียม แต่สมบัติทางที่เด่นกว่าฟิล์มอลูมิเนียม ซึ่งแสงสามารถผ่านฟิล์มบางตัวนำโปร่งใสได้มากกว่า 80% โดยงานวิจัยนี้จะมุ่งเน้นเกี่ยวกับสมบัติของฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ที่สามารถใช้งานเป็นขั้วตัวนำโปร่งใสที่ใช้ประยุกต์เป็นหัวเซนเซอร์แสงและอาจใช้กับงานเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคตอันใกล้

การสร้างฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีการสปีดเตอร์ด้วยวิธีการสปีดเตอร์แบบอาร์เอฟ ได้ความหนาฟิล์ม 75, 229, 521 และ 1166 นาโนเมตร แล้วนำฟิล์มบางมาวิเคราะห์ตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ พบว่ามีความเป็นผลึกที่ต่ำ ค่าสภาพความต้านทาน $10^{-3} \Omega\text{-m}$ และแสงสามารถส่งผ่านได้ 82%-89% โดยที่ความหนาฟิล์มบาง 75 นาโนเมตร ให้ค่าการส่งแสงต่ำสุด $\approx 83\%$ เนื่องจากมีความสมบูรณ์ของผลึกต่ำสุด

ต่อจากนั้นนำฟิล์มบางมาแอนนัลเพื่อปรับปรุงสมบัติ ทางกายภาพและไฟฟ้า ในสภาวะบรรยากาศ อากาศ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซไนโตรเจน และอุณหภูมิในช่วง $200\text{-}500^{\circ}\text{C}$ สำหรับการแอนนัลที่อุณหภูมิ $400\text{-}500^{\circ}\text{C}$ พบว่าที่ผิวของฟิล์มมีรอยแตกและมีบางส่วนร้อนออกจากฐานรองกระจกและนำฟิล์มบางมาวิเคราะห์ตรวจสอบความเป็นผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์อีกครั้งหนึ่ง พบว่าความเป็นผลึกสมบูรณ์ขึ้น และมีแนวโน้มดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

หลังจากตรวจสอบความเป็นผลึกเสร็จแล้วต่อจากนั้นนำฟิล์มที่ไปตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้า ในสภาวะบรรยากาศ ก๊าซไนโตรเจน ได้สภาพความต้านทานไฟฟ้าลดลงสูงสุด $2.8 \times 10^{-3} \Omega\text{-m}$ และค่าการส่งผ่านของสูงสุด 88% แอนนัลที่อุณหภูมิ 300°C

จากการหาเงื่อนไขของฟิล์มที่เหมาะสมที่สุด ไปประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าตัวนำโปร่งใสเพื่อสร้างรอยต่อสัมผัสระหว่าง ito/n-type silicon และ รอยต่อสัมผัสระหว่าง ito/p-type silicon ซึ่งการออกแบบมีรูปทรงเรขาคณิตต่างกันและพื้นที่รับแสง มีพื้นที่ วงกลม สี่เหลี่ยม และ สี่เหลี่ยมขอบมน จากการวัดทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าพื้นที่วงกลมขนาด 0.0625 mm^2 และ มีค่ากระแสรั่วต่ำสุด จึงถูกเลือกเป็นขั้วไฟฟ้าของเซนเซอร์แสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับตัวเซนเซอร์แสง โดยการไปอัสแรงดัน 5 V พบว่ารอยต่อสัมผัส ito/n-type silicon มีกระแสรั่วไหล 5.00×10^{-6} A ค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) 0.3 V และ ค่าประจุไฟฟ้า 110 pF ส่วนรอยต่อสัมผัส ito/p-type silicon มีกระแสรั่วไหล 5.38×10^{-6} A ค่าแรงดันภายใน (V_{bi}) 0.35 V และ ค่าประจุไฟฟ้า 95 pF พบว่าเป็นรอยสัมผัสแบบช็อกกีทั้ง ito/n-type silicon และ ito/p-type silicon ดังนั้นตัวเซนเซอร์แสงที่เหมาะสมคือ รอยต่อสัมผัสระหว่าง ito/n-type silicon เนื่องจากอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อยในฐานรองชนิดพี (p-type silicon) ซึ่งมีค่าสภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน $1350 \text{ cm}^2 \text{V}^{-1} \text{s}^{-1}$ (สูงกว่าโฮลประมาณ 3 เท่า)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] พิรินธร พลายเวช, การเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงเพื่อใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี พ.ศ. 2547
- [2] อรรณพ คล้าชื่น, การปลูกฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์บนฐานรองรับพลาสติกโดยอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงแบบควบคุมเวลาก๊าซ, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2548
- [3] เรืองศักดิ์ ภัทรกิจโสภณ, ฟิล์มดีบุกออกไซด์เจือสารฟลูออรีนที่เคลือบด้วย วิธีการจุ่ม, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ.2550
- [4] 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
- [5] S. Niemcharoen, I. Srithanachai, P. Phetnoi, K. Nutaman, S. Supadech and N. Atiwong-sanghong, " Analysis the Suitable Indium Tin Oxide Thin Films which Prepared by RF Sputter for Schottky Photodetector Fabrication", EECON'31
- [6] A. Salehi, "Radiation damage in air annealed indium tin oxide layers", Thin Solid Films, Vol. 338, 1999, pp. 197-200
- [7] 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
- [8] https://www.webelements.com/_media/compounds/In/In2O3-1312432.jpg สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2561
- [9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Tin\(II\)_oxide_jpg](https://en.wikipedia.org/wiki/Tin(II)_oxide_jpg) สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2561
- [10] https://www.webelements.com/_media/compounds/Sn/O2Sn1-18282105.jpg สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2561
- [11] 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
- [12] Callister, Jr.William D., Materials Science and Engineering an Introduction, 8th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Edition, John Wiley & Sons Inc., USA, 2011

- [13] C. Cali and M. Mosca, "INDIUM TIN OXIDE FILMS FOR OPTICAL SENSORS", Istituto Nazionale di Fisica della Materia and Dipartimento di Ingegneria Elettrica dell'Aniversità degli Studi di Palermo Viale delle Scienze Italy, pp. 79-85
- [14] <https://www.purdue.edu/ehps/rem/rs/sem.htm> สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2561
- [15] https://www.google.co.th/search?q=tunnel+electron+microscope,tEM&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEWjbpJji7pbKAhULao4KHV7wC4EQ_AUIBygB&biw=1366&bih=673#imgrc=3xsPZ5qfp2TshM%3A สืบค้นเมื่อ 10 มกราคม 2561
- [16] นายธนศ โสพะเหม, การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [17] นางสาวกุลวรงค์ นุตมาน, การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิตัล, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยี พระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552
- [18] สมเกียรติ ศุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์, พิมพ์ครั้งที่ 2, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2547
- [19] 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
- [20] 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.
- [21] 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
- [22] 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
- [23] Y. Iwama, D. C. Cho, T. Mori and T. Mizutani, "Electroluminescence Properties of Organic Light-Emitting Diodes Using ITO with Different Surface Treatments", Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 2003, pp. 4-6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [24] 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.
- [25] 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
- [26] 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
- [27] 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
- [28] 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.

ประวัติคณะผู้วิจัย

1. หัวหน้าโครงการ

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ
(ภาษาอังกฤษ) Dr. RANGSON MUANGHLUA
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3660100854710
3. ตำแหน่งปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทร. 02-329-8344 โทรสาร 02-329-8346

E-mail : rangson.mu@kmitl.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

วุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถาบัน
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต วศ.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	2553	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	2544	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาศาสตร์บัณฑิต วท.บ.(วัสดุศาสตร์)	2535	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ผู้ร่วมวิจัย

1. ชื่อ (ภาษาไทย) ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
2. หมายเลขบัตรประชาชน 3-1101-01199-84-1
3. ตำแหน่งปัจจุบัน รองศาสตราจารย์
4. หน่วยงานที่อยู่ติดต่อได้สะดวก พร้อมหมายเลขโทรศัพท์ โทรสาร และ E-mail

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ถ.ฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

โทร. 02-329-8344 โทรสาร 02-329-8346

E-mail : surasak.ni@kmitl.ac.th

5. ประวัติการศึกษา

วุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถาบัน
วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต วศ.ด.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	2548	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วศ.ม.(วิศวกรรมไฟฟ้า)	2536	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง
วิทยาศาสตร์บัณฑิต วท.บ.(ฟิสิกส์)	2530	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้