

การปลูกแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีการระเหยด้วย
ลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยและเทคนิค

GLANCING-ANGLE

ITO NANOROD FILM BY ION-ASSISTED ELECTRON
BEAM EVAPORATION WITH GLANCING-ANGLE
TECHNIQUE



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้สอนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2559

ITO NANOROD FILM BY ION-ASSISTED ELECTRON
BEAM EVAPORATION WITH GLANCING-ANGLE
TECHNIQUE



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIRMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
ACADEMIC YEAR 2016

หัวข้อโครงการพิเศษ

การปลูกแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยและเทคนิค Glancing-Angle ITO Nanorod Films by Ion-Assisted Electron-Beam Evaporation with Glancing-Angle Technique

ชื่อนักศึกษา

นายพิฑูร น้อยมลวัลย์ รหัสนักศึกษา 56051180

ปริญญา

วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชา

ฟิสิกส์

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

ดร.มติ ห่อประทุม

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2559

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.สาทราย เล็กชะอุ่ม ประธานกรรมการ	
ดร.รัชก สมพรเสนต์ กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	
ดร.มติ ห่อประทุม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อโครงการพิเศษ	การปลูกแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์โดยวิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยและเทคนิค Glancing-Angle
ชื่อนักศึกษา	นายพิฑูร น้อยมลิวลย์ รหัสนักศึกษา 56051180
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ดร.มติ ห่อประทุม

บทคัดย่อ

ผลจากการอบแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่ถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค Glancing-Angle ที่ผ่านการการอบที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียสบนความหนา 500 nm ในสภาวะมีอากาศและสุญญากาศ แท่งนาโนฟิล์มได้ถูกนำไปวิเคราะห์ผลทางโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดและการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ คุณสมบัติทางแสงและไฟฟ้าด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด และเครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างแท่งนาโนโดยการวัดความหนาและขนาดพบว่ามีความหนาแน่นลดลงเพียงเล็กน้อยตามอุณหภูมิในการอบอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ของแท่งนาโนมีความต้านทานเชิงแผ่นเพิ่มขึ้นถึง $57.84 \Omega/\square$ ในอากาศ และ $13.63 \Omega/\square$ ในสุญญากาศ จากคุณสมบัติทางแสงของแท่งนาโนพบว่าการเปลี่ยนแปลงการส่งผ่านแสงสูงเพียงเล็กน้อยในช่วงย่านตามองเห็นที่ 85-90% ส่วนความเป็นผลึกนั้นพบว่าการเปลี่ยนแปลงโดยมีความเป็นผลึกมากขึ้นที่อุณหภูมิ 400 และ 500 องศาเซลเซียส

คำสำคัญ: แท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค Glancing-Angle การอบ คุณสมบัติทางฟิสิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	ITO Nanorod Films by Ion-Assisted Electron-Beam Evaporation with Glancing-Angle Technique
Student	Mr.Pitoon Noymaliwan Student ID 56051180
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2559
Advisor	Asst.Prof.Dr.Nathaporn Promros
Co-Advisor	Dr.Mati Horprathum

ABSTRACT

Effect of Annealing temperature on Indium tin oxide (ITO) nanorod films was been grown by Ion-Assisted Electron-Beam Evaporation with Glancing-Angle deposition technique from 100 to 500 °C in air with vacuum on thickness 500 nm. The nanorod was characterized physical morphologies by field-emission scanning electron microscopy (FE-SEM), X-ray diffraction (XRD). The optical and electrical properties were characterized by UV-Vis-NIR spectrophotometry, hall-effect measurement and four-point probe measurement, respectively. The nanorod structure was confirmed from the cross-sectional FE-SEM images and the size of rod was slightly changed with decreasing annealing temperatures. At annealing temperatures of 500 °C, the sheet resistance of ITO nanorods films as enhanced to 57.84 (Ω/\square) in air and 13.63 (Ω/\square) in vacuum. From optical properties of ITO nanorod films, the high transmission in the visible range was nearly constant around 85-90%. The crystallinity of ITO nanorod films was improved when annealing temperatures of 400 °C and 500 °C.

Keyword: Indium tin oxide nanorod films, Ion-Assisted Electron-Beam Evaporation with Glancing-Angle deposition, Physical properties

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่นนี้สำเร็จสมบูรณ์ด้วยดีซึ่งได้รับการสนับสนุนจากบุคคลหลายท่าน ทั้งนี้ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผศ.ดร.ณัฐพร พรหมรส ที่ให้ความรู้ คำแนะนำ คำปรึกษา และแนวทางในการแก้ปัญหา ขอขอบคุณ ดร.มติ ห่อประทุม ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ถ่ายทอดความรู้ด้านวิชาการ แนวทางการแก้ปัญหา ความรู้ด้านการใช้เครื่องมือและยังช่วยกระตุ้นให้การทำงานนี้ สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณคณะกรรมการคุมสอบโครงการพิเศษ รศ.สาหร่าย เล็กชะอุ่ม อ.ภารุจ บัณฑิตธาตาวินัย ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ดร.รัชนก สมพรเสนห์ อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง คณาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบังที่สละเวลาอันมีค่าเข้ารับฟังการนำเสนองานวิจัย อีกทั้งยังให้คำปรึกษาและคำแนะนำในทุกๆ เรื่องที่เกี่ยวข้องกับโครงการพิเศษเล่นนี้

ขอขอบคุณสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช) ที่ให้โอกาสผู้วิจัยในการทำงานวิจัยที่ห้องปฏิบัติการ รวมถึงการใช้เครื่องมือต่างๆ ในสร้างชิ้นงานและวิเคราะห์ผลของชิ้นงานโดยเฉพาะอย่างยิ่ง ดร. พิทักษ์ เอี่ยมชัย หัวหน้าห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีฟิล์มบางเชิงแสง (OTL) ศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) และนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษาภายในห้องปฏิบัติการรวมถึงเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการและนักศึกษาทุกท่านที่สนับสนุนในขณะงานวิจัยตลอดจนให้คำแนะนำทำให้โครงการพิเศษสำเร็จลุล่วงไปได้ สำหรับผู้วิจัยนี้ หากมีโอกาสผู้วิจัยพร้อมจะสร้างประโยชน์ให้กับหน่วยงานอย่างเต็มที่

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณอาจารย์ทุกท่านในภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ ขอขอบคุณเพื่อนๆ ในภาควิชาฟิสิกส์ที่คอยให้คำแนะนำและช่วยเหลืองานวิจัย ขอขอบพระคุณบิดา มารดา ตลอดจนผู้มีพระคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมในการช่วยเหลือ ประสบการณ์ ทักษะต่างๆ ที่ผู้วิจัยได้รับย่อมเป็นผลจากความกรุณาของทุกท่านที่ได้กล่าวมา

พิฑูร น้อยมลิวส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	2
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 คุณสมบัติของธาตุและสารประกอบ	3
2.1.1 ฟิสิกส์นำไฟฟ้าโปร่งใส	3
2.1.2 อินเดียมทินออกไซด์	4
2.2 วิธีการเคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์	6
2.2.1 กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิลิกส์	6
2.3 การเกิดฟิล์มบาง	8
2.3.1 การควบแน่นเป็นฟิล์ม (Condensation)	8
2.3.2 ความหนาแน่นจากการเคลือบฟิล์มบาง	9
2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบาง	10
2.4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	11
2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	12
2.4.3 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	13
2.4.4 เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด	14
2.4.5 เครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	15
2.5 โครงสร้างระดับนาโน	18
2.5.1 เส้นใยนาโน (nanofiber)	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.2 การผลิตระดับนาโน (nanofabrication)	21
2.5.3 ปัจจัยการเกิดแท่งนาโน (Nanorod Factor)	22
2.6 การอบ	23
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	24
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1 การเตรียมแท่งนาโน ITO फिल्म	28
3.1.1 ขั้นตอนเตรียมแท่งนาโน ITO फिल्म	29
3.2 ส่วนประกอบของเครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD	32
3.3 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง	34
3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35
3.2.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์	35
3.2.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	36
3.2.4 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด	36
3.2.5 เครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	37
3.4 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิล์มด้วยวิธีการอบ (Annealing)	38
บทที่ 4 การดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย	40
4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวแท่งนาโน ITO फिल्मก่อนการอบ	40
4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	40
4.2 การวิเคราะห์คุณสมบัติการส่องผ่านแสงบนแท่งนาโน ITO फिल्मก่อนการอบ	57
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแท่งนาโน ITO फिल्मก่อนการอบ	64
4.4 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแท่งนาโน ITO फिल्मก่อนและหลังการอบ	69
บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ	72
5.1 สรุปผลงานวิจัย	72
5.2 ข้อเสนอแนะ	73
เอกสารอ้างอิง	74
ภาคผนวก	77
ภาคผนวก ก	78

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมและเปอร์เซ็นต์พื้นผิวอะตอม	19
3.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินการ	26
3.2 แสดงเงื่อนไขสำหรับการอบในสภาวะอากาศกับสุญญากาศ	39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล	5
2.2 การฉาบไอโลหะและระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	7
2.3 ระบบการสปีดเตอริง	8
2.4 แสดงรูปแบบการโตของฟิล์ม	9
2.5 แสดง Structure-Zone Model ของฟิล์ม	10
2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในผลึก	11
2.7 หลักการทำงานและองค์ประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	12
2.8 ไดอะแกรมระบบทางแสงภายในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์	14
2.9 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด	15
2.10 แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์	15
2.11 วงจรสำหรับวัดค่าแรงดันฮอลล์	16
2.12 แสดงภาพของแท่งนาโนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	20
2.13 การผลิตโครงสร้างระดับนาโน	21
2.14 ภาพแสดงการเกิด Adatom บนพื้นผิวผลึก	22
2.15 แผนภาพแสดงการโตของแท่งนาโนด้วย Glancing	23
2.16 รูปชิ้นงานโลหะที่ถูกทำการอบในเตาหลอม	24
3.1 ไดอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	27
3.2 เครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD	28
3.3 เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)	29
3.4 นำกระจกไปเป่าด้วยไนโตรเจน	29
3.5 วัดค่าความต้านทานของซิลิกอนและกระจก ITO	30
3.6 เครื่องสำหรับทำความสะอาดหัวของปืนไอออน	30
3.7 ที่วัดอุณหภูมิของของปัมโครโอจินิกส์	31
3.8 แสดงฟิล์มบางที่ผ่านการเคลือบความหนา 500 nm	31
3.9 ส่วนประกอบหลักที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของปัมสุญญากาศ	32
3.10 ส่วนประกอบหลักของเครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD	33
3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	35

เอกสาร 3.12 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ได้รับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นใด
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.13 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์	36
3.14 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด	36
3.15 เครื่องมือวัดปรากฏการณ์ฮอลล์	37
3.16 ภาพอุปกรณ์และเงื่อนไขสำหรับการอบในสภาวะมีอากาศกับสุญญากาศ	38
4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्म ความหนา 100 nm	41
4.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्म ความหนา 100 nm หลังการอบในอากาศ	42
4.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्म ความหนา 100 nm หลังการอบในสุญญากาศ	43
4.4 ภาพพื้นผิวได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्म ก่อนการอบที่ความหนา 100 nm	44
4.5 ภาพพื้นผิวได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्मที่ ความหนา 100 nm หลังการการอบในอากาศ	45
4.6 ภาพพื้นผิวได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्मที่ ความหนา 100 nm หลังการการอบในสุญญากาศ	46
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO फिल्मกับจำนวนครั้งที่ใช้ ในการเคลือบฟิล์มที่ความหนา 100 nm	47
4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO फिल्मกับอุณหภูมิความ หนา 100 nm	47
4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO फिल्मกับจำนวน ครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่ความหนา 100 nm	48
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO फिल्मกับ อุณหภูมิที่ความหนา 100 nm	48
4.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्म ความหนา 500 nm	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्मที่มีความหนา 500 nm หลังการอบในอากาศ	50
4.13 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्मที่มีความหนา 500 nm หลังการอบในสุญญากาศ	51
4.14 ภาพพื้นผิวได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्मก่อนการอบที่มีความหนา 500 nm	52
4.15 ภาพพื้นผิวได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्मที่มีความหนา 500 nm หลังการการอบในอากาศ	53
4.16 ภาพพื้นผิวได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO फिल्मที่มีความหนา 500 nm หลังการการอบในสุญญากาศ	54
4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO फिल्मกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 500 nm	55
4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO फिल्मกับอุณหภูมิที่มีความหนา 500 nm	55
4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO फिल्मกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 500 nm	56
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO फिल्मกับอุณหภูมิที่มีความหนา 500 nm	56
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่ความหนา 100 nm ก่อนอบและหลังอบ ITO फिल्म	57
4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่ความหนา 100 nm หลังอบ	58
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่ความหนา 500 nm ก่อนอบและหลังอบ ITO फिल्म	59
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความยาวคลื่นที่ความหนา 500 nm หลังอบ	60
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง αE กับ E ที่ความหนา 100 nm	61
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง αE กับ E ที่ความหนา 500 nm ในอากาศ	62
4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง αE กับ E ที่ความหนา 500 nm ในสุญญากาศ	63

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทาน สภาพคล่อง ปริมาณพาหะนำไฟฟ้าของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับอุณหภูมิที่ความหนา 100 nm หลังอบ	64
4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทาน สภาพคล่อง ปริมาณพาหะของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มความหนา 500 nm	65
4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพความต้านทาน สภาพคล่อง ปริมาณพาหะของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับอุณหภูมิที่ความหนา 500 nm หลังอบ	66
4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่ความหนา 100 nm	66
4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่ความหนา 100 nm หลังการอบ	67
4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่ความหนา 500 nm	67
4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่ความหนา 500 nm หลังการอบ	68
4.35 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมของการเลี้ยวเบนในอากาศ	70
4.36 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมของการเลี้ยวเบนในสุญญากาศ	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย [1]

ฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมออกไซด์ซึ่งนิยมเรียกว่า “อินเดียมทินออกไซด์ (indium tin oxide; ITO)” มีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญสองประการคือนำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงได้ดี จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้งานทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ (optoelectronics) ดังนั้นผลจากการศึกษา ITO จึงถูกนำมาใช้ประโยชน์มากมาย เช่น การประยุกต์ใช้กับงานด้านเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้เซลล์แสงอาทิตย์สามารถรับแสงเข้ามาได้มากที่สุด หรือทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งใสสำหรับจอภาพแสดงผล เป็นต้น ซึ่งโครงสร้างของ ITO ที่ใช้จะเป็นแบบเส้นใยนาโน (nanofiber) หมายถึงวัสดุนาโนที่มีมิติภายนอกที่คล้ายกันสองมิติมีขนาดนาโน แต่อีกหนึ่งมิติมีขนาดยาวกว่ามาก อาจแบ่งเป็นแท่งนาโน (nanorods) ท่อนาโน (nanotube) และ ลวดนาโน (nanowire) ซึ่งเส้นใยนาโนที่กล่าวมานี้จะมีคุณสมบัติเฉพาะตัวคือ พื้นที่ผิวสำหรับการรับแสงจะเพิ่มขึ้น แสงที่ตกกระทบบนวัสดุจะดูดกลืนได้ดี และมีค่าดัชนีการหักเหต่ำ ดังนั้นจึงมีการแทนที่โครงสร้างนาโน ITO ด้วยโครงสร้างแบบแท่งนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร ซึ่งสามารถเตรียมฟิล์มจากหลากหลายเทคนิคโดยแบ่งเป็น การเคลือบโดยแสงเลเซอร์กำลังสูงระเหิดในภาวะสุญญากาศ (Pulsed Laser Deposition) การเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการระเหยด้วยลำโมเลกุล (Molecular Beam Epitaxy) กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์ (Physical Vapor Deposition) การเคลือบดังกล่าวใช้อุณหภูมิสูงจึงไม่เหมาะกับการปลูกฟิล์มที่เป็นโครงสร้างนาโนเพราะส่งผลต่อขนาดที่ไม่สม่ำเสมอ ทำให้โครงสร้างจัดเรียงตัวไม่เป็นระเบียบ ดังนั้นกระบวนการเตรียมฟิล์มให้มีความเสถียรและเกิดเป็นแท่งนาโนตามต้องการคือเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค Glancing-Angle (Ion-Assisted Electron-Beam Evaporation with Glancing-Angle (GLAD) technique) และเพิ่มประสิทธิภาพหลังจากการเคลือบด้วยการอบ (Anneal) จากข้อมูลข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาอิทธิพลของการนำไฟฟ้า ความเป็นผลึก สภาพคล่องของพาหะ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างนาโนจากการอบ การส่งผ่านแสง เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้งานกับอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์

- 1) เพื่อศึกษาวิธีการสร้างแท่งนาโน ITO ฟิล์มโดยอาศัยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD
- 2) เพื่อศึกษาวิธีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติพื้นฐานของแท่งนาโน ITO ฟิล์มโดยอาศัยกระบวนการอบ
- 3) เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อโครงสร้างแท่งนาโน ITO ฟิล์มที่เคลือบด้วยการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD
- 4) ศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของแท่งนาโนฟิล์ม

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1) เคลือบแท่งนาโนฟิล์มบนกระจก ITO และซิลิกอนโดยอาศัยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD
- 2) เคลือบแท่งนาโนฟิล์มภายใต้ความหนาที่แตกต่างกัน
- 3) อบแท่งนาโน ITO ฟิล์มที่อุณหภูมิ 100 ถึง 500 องศาเซลเซียส
- 4) ศึกษาอิทธิพลของการนำไฟฟ้า ความเป็นผลึก สภาพคล่องของพาหะ การเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างนาโน การส่องผ่านแสง

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) มีความชำนาญจากการปฏิบัติจริงในเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD
- 2) มีเข้าใจกระบวนการการสร้างแท่งนาโน ITO ฟิล์มด้วยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD และกระบวนการอบ
- 3) มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติต่างๆของแท่งนาโน ITO ฟิล์มหลังจากผ่านการอบ
- 4) สามารถวิเคราะห์ผลที่เกิดขึ้นโดยอาศัยเครื่องมือต่างๆ เช่น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ เป็นต้น
- 5) สามารถสร้างแท่งนาโน ITO ฟิล์มตามคุณสมบัติที่ต้องการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติของธาตุและสารประกอบ

2.1.1 พิล์มนำไฟฟ้าโปร่งใส [2]

กระจกโปร่งแสงนำไฟฟ้าเป็นวัสดุตัวนำไฟฟ้าที่มีความโปร่งแสงซึ่งทำมาจากออกไซด์ของโลหะที่เคลือบอยู่บนกระจก ITO และ fluorine-doped tin oxide (FTO) ความโปร่งแสงของวัสดุและการนำไฟฟ้านี้ก็เพื่อประยุกต์เป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงสำหรับจอภาพผลึกเหลว เซลล์แสงอาทิตย์ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และอื่นๆ มากมาย ซึ่งในการเลือกวัสดุนำไฟฟ้าโปร่งใสมาใช้งานแต่ละประเภทนั้นมีปัจจัยมากมายที่ต้องพิจารณาเช่นความคงทนทางกายภาพ ทางเคมี และทางความร้อน การนำไฟฟ้า ความโปร่งใส ความยาวคลื่นพลาสมา อุณหภูมิที่ใช้เคลือบฟิล์ม เป็นต้น

1) เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำสำหรับการแปลงพลังงานจากแสงอาทิตย์ (หรือที่เรียกกันว่าโฟตอน) มาเป็นพลังงานไฟฟ้าโดยที่ผิวบนสุดของเซลล์ต้องการฟิล์มที่ยอมให้แสงอาทิตย์ในช่วงคลื่นความร้อนผ่านได้มาก และนำไฟฟ้าได้ดี ตัวอย่างวัสดุกลุ่มหนึ่งที่กำลังเป็นที่สนใจขณะนี้คือวัสดุนาโนที่เติบโตในมิติเดียว เช่น แท่งนาโน (nanorods) หรือ ท่อนาโน (nanotubes) เป็นต้น วัสดุเหล่านี้จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้าได้ เนื่องจากสมบัติในการนำประจุที่ดีของโลหะออกไซด์และการจัดเรียงตัวที่เป็นระเบียบในทางเดียวนั้นเอง

2) จอแสดงผลแบบจอแบน

จอภาพผลึกเหลว (crystal display: LCD) เป็นอุปกรณ์จอภาพแบบแบนบางสร้างขึ้นจากพิกเซลหรือพิกเซลโมโนโครมจำนวนมากที่เรียงอยู่ด้านหลังของแหล่งกำเนิดแสงสำหรับงานในกลุ่มนี้ต้องการการนำไฟฟ้าที่รวดเร็ว ซึ่งฟิล์ม ITO เป็นฟิล์มที่มีการใช้งานมากกล่าวคือแต่ละพิกเซลของจอผลึกเหลวนั้นจะประกอบไปด้วยชั้นโมโลกุผลึกเหลวที่แขวนลอยอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงสองขั้วที่ทำด้วยวัสดุ ITO

3) อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เทคโนโลยีที่มีความพิเศษ คือ สามารถดูดซับหรือสะท้อนสีของแสงบางสีได้ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับวัสดุที่เป็นออกไซด์ของโลหะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีเมื่อได้รับพลังงานไฟฟ้า ตัวอย่างเช่น ความร้อนจากแสงอาทิตย์ที่ส่องผ่านเข้ามาภายในอาคาร หรือที่อยู่อาศัยก็จะถูกลดทอนลงหรือกั้นไม่ให้เข้ามาได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.2 อินเดียมทินออกไซด์ [2,3,4,5,6,10]

1) อินเดียมทินออกไซด์

ฟิล์มบางทินออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมออกไซด์ซึ่งเรียกว่า “อินเดียมทินออกไซด์” ประกอบไปด้วย indium, tin และ oxygen ในสัดส่วนที่แตกต่างกันและมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์ที่สำคัญสองประการ คือ นำไฟฟ้าและส่งผ่านแสงได้ดี ซึ่งมีการพัฒนาสารออกไซด์ชนิดใหม่ขึ้นมาจำนวนมาก ทั้งจากระบบสารประกอบแบบธรรมดาไปจนถึงระบบที่ซับซ้อน เพื่อหาสารที่มีสมบัติเหมาะสมสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท

ITO เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่มีการโคปอย่างหนักโดยช่องว่างแถบพลังงานจะมีขนาดใหญ่ประมาณ 4 eV ซึ่ง ITO จะเกิดจากเจือตีบุกเข้าไปในผลึกอินเดียมออกไซด์ (In_2O_3) เมื่ออินเดียมที่มีประจุบวก 3 (In^{3+}) ถูกแทนที่ด้วยตีบุกที่มีประจุบวก 4 (Sn^{4+}) จะเหลืออิเล็กตรอนอิสระอยู่ 1 ตัวทำให้ ITO กลายเป็นสารออกไซด์กึ่งตัวนำแบบเอ็น (n-type) การเจือตีบุกอาจทำโดยผสมผงอินเดียมออกไซด์กับผงตีบุกเข้าด้วยกันตามอัตราส่วนที่เหมาะสม แล้วอัดเป็นเม็ดเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นหรืออาจเจือในระหว่างการเตรียมฟิล์มบาง

2) สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม ITO

ข้อไฟฟ้าโปร่งแสงเป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ เช่น จอภาพแสดงผลในโทรศัพท์มือถือ จอภาพสัมผัสของกล้องดิจิทัลและโทรศัพท์มือถือ เซลล์แสงอาทิตย์ หรือแม้แต่เซ็นเซอร์แบบต่างๆ สมบัติทางไฟฟ้าที่ต้องการคือให้ฟิล์มมีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำเพื่อให้มีการนำไฟฟ้าที่ดีขึ้น สำหรับการนำไฟฟ้าของฟิล์ม ITO นั้นมาจาก 2 ปัจจัย คือ จากผลของพาหะอิสระ และผลของความสามารถในการเคลื่อนตัว (Mobility, μ) ของพาหะอิสระ ดังนี้

ก. การนำไฟฟ้าของวัสดุสารกึ่งตัวนำขึ้นอยู่กับจำนวนของพาหะอิสระซึ่งมีทั้งอิเล็กตรอนและ โฮล กล่าวคือ ถ้าจำนวนอิเล็กตรอนในแถบนำหรือจำนวนโฮลในแถบเวเลนซ์เพิ่มขึ้นในวัสดุสารกึ่งตัวนำจะทำให้การนำไฟฟ้าดีขึ้น ที่อุณหภูมิศูนย์องศาสัมบูรณ์ (zero absolute temperature) วัสดุสารกึ่งตัวนำจะประพฤติตัวเป็นฉนวน เนื่องจากในแถบเวเลนซ์มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มดังนั้นจึงไม่มี อิเล็กตรอนอิสระ (free electron) อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น พลังงานเนื่องจากความร้อน ที่ผลึกได้รับจะทำให้พันธะโคเวเลนต์บางพันธะของอะตอมแยกออกอิเล็กตรอนที่ร่วมอยู่ในพันธะจะหนีหลุดออกมาเป็นอิเล็กตรอนอิสระเคลื่อนที่ไปได้ทั่ว ผลึกการขาดอิเล็กตรอนที่ร่วมอยู่ในพันธะโคเวเลนต์ทำให้เกิดที่ว่างขึ้นที่แถบเวเลนซ์ เรียกว่าโฮล (hole) อะตอมขณะนี้จะมีสถานะทางไฟฟ้าเป็นประจุบวกและจะพยายามดึง อิเล็กตรอนจากพันธะใกล้เคียงเข้ามาเพิ่มเติมในที่ว่างที่เกิดขึ้นดังนั้นตำแหน่งที่ว่างนี้จึง เปรียบเสมือนประจุบวก ซึ่งจะเห็นว่าโฮลไม่ใช่ประจุบวกแต่เป็นช่องว่างที่ทำตัวคล้ายประจุบวก ดังนั้นปริมาณความหนาแน่นของพาหะอิสระในวัสดุสารกึ่งตัวนำ

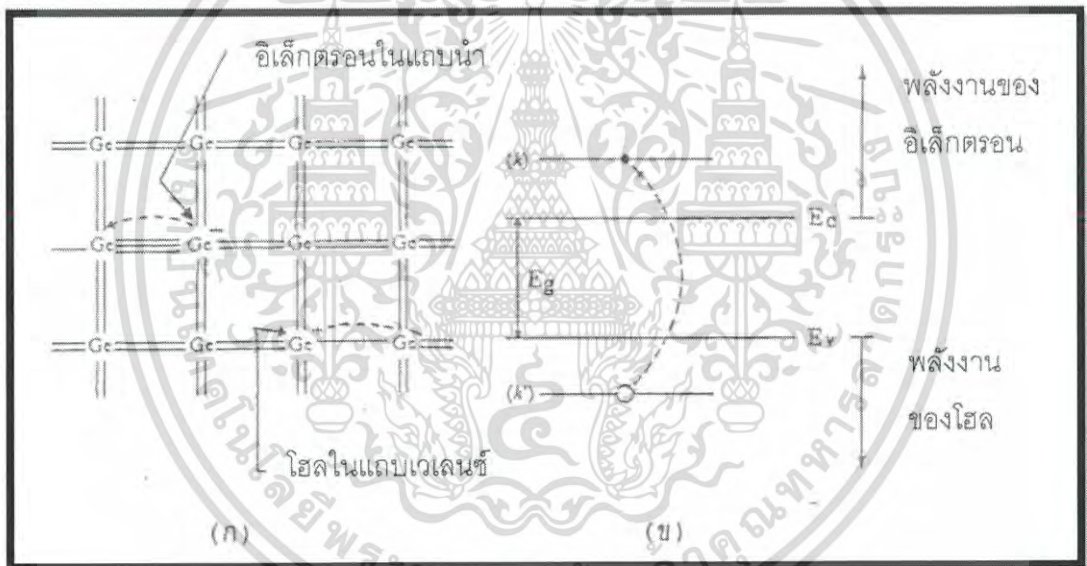
ขึ้นอยู่กับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ความหนาแน่นของผู้ให้ (N_D) ความหนาแน่นของผู้รับ (N_A) และอุณหภูมิของวัสดุสารกึ่งตัวนำในขณะนั้นที่สภาวะสมดุลเชิงความร้อน โอกาสที่อิเล็กตรอนจะไม่ว่างกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถูกกระตุ้นด้วยความร้อนเป็นไปตามฟังก์ชันการ แจกแจงของเฟอร์มิดิแรก (Fermi-Dirac distribution function)

$$f(E) = 1/e^{\frac{E-E_F}{KT}} + 1 \quad (2.1)$$

โดยที่ $f(E)$ คือโอกาสที่อิเล็กตรอนจะอยู่ได้ที่ระดับพลังงานนั้นๆ K คือค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant) T คืออุณหภูมิในหน่วยเคลวิน E_F คือระดับพลังงานเฟอร์มิ (Fermi energy level) ระดับพลังงานเฟอร์มิ $F(E)$ หมายถึงระดับพลังงานที่กำหนดสถานะสมดุลเชิงความร้อนของระบบ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและปริมาณของอิเล็กตรอนทั้งหมดในระบบ

ตามทฤษฎีแถบพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนในแถบเวเลนซ์ได้รับพลังงานเพิ่มขึ้นมากพอที่จะกระโดดไปยังแถบนำและทิ้งโฮลไว้ในแถบเวเลนซ์ดังรูปที่ 2.1 อิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบเวเลนซ์นี้เราเรียกว่าพาหะอิสระ (free carrier) ซึ่งสามารถนำไฟฟ้าได้



รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล ก) โดยใช้โครงสร้างพันธะ ข) โดยใช้แถบพลังงาน

ข. ความสามารถในการเคลื่อนตัวของพาหะอิสระ ที่เกิดจากการกระเจิงของอิเล็กตรอน ซึ่งการเคลื่อนตัวของอิเล็กตรอน (μ) หรือสภาพคล่องของพาหะนั้นจะเกี่ยวข้องกับความเร็วของพาหะและสนามไฟฟ้า กรณีที่สนามไฟฟ้ามีค่าสูงการเพิ่มขึ้นของความเร็วพาหะจะช้าลง แสดงให้เห็นว่าที่สนามไฟฟ้าสูงๆ สภาพคล่องจะมีค่าไม่คงที่แต่จะแปรผกผันกับสนามไฟฟ้า ที่เป็นเช่นนี้อธิบายได้ว่าสนามไฟฟ้าสูงๆ จะทำให้เกิดมีการชนระหว่างพาหะกับอะตอมหรือแลตทิซ (Lattice) สภาพคล่องพาหะจึงมีค่าลดลง ซึ่งปัจจัยที่มีต่อสภาพคล่องของอิเล็กตรอน คือ ความร้อน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความบกพร่องของเนื้อฟิล์มเนื่องจากความไม่สมบูรณ์ของผลึก เป็นต้น ความสัมพันธ์ดังกล่าวอธิบายได้ดังสมการที่ 2.2

$$\mu = \frac{e\tau}{m_c^*} \quad (2.2)$$

โดยที่ τ คือ Relaxation time (ระยะเวลาเฉลี่ยในการชนแต่ละครั้ง) ขึ้นอยู่กับวิธีและสภาวะในการเตรียมฟิล์ม m_c^* คือ มวลประสิทธิผล (Effective mass) ขึ้นอยู่กับชนิดของสารกึ่งตัวนำ

2.2 วิธีการเคลือบฟิล์มบาง ITO

วิธีการเคลือบฟิล์มบางที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้วยกระบวนการเคลือบไอทางฟิสิกส์ (physical vapor deposition process: PVD) พอจะแบ่งได้ 2 แบบ คือ กระบวนการเคลือบฟิล์มด้วยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation : EBE) และกระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง (Sputtering)

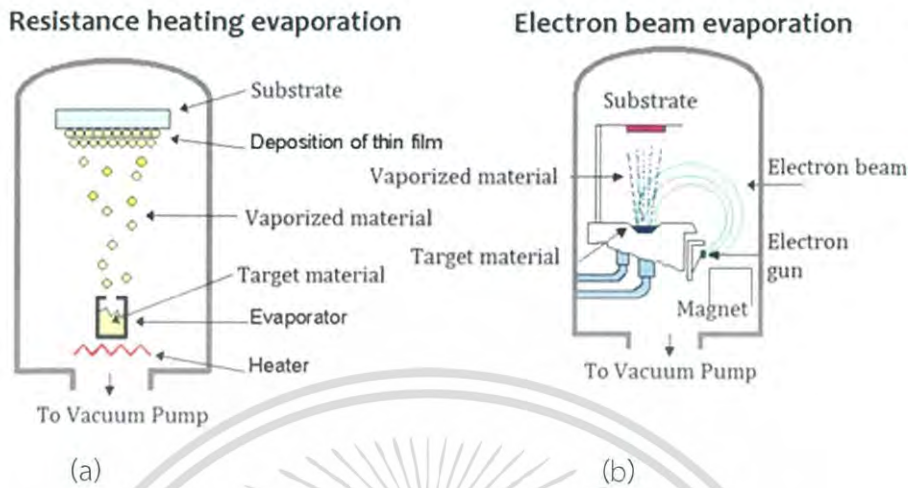
2.2.1 กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์

การเคลือบด้วยไอทางฟิสิกส์ คือ การตกตะกอนของไอสารที่ได้มาโดยวิธีการทางฟิสิกส์ เป็นเทคโนโลยีทางด้านวิศวกรรมผิววัสดุ เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบาง สำหรับการใช้งานต่างๆ เช่น งานด้านไตรโบโลยี (tribology) (การสึกหรอ, แรงเสียดทาน และการหล่อลื่น), งานด้านออปติก (optics), เทคโนโลยีไมโครชิพ (microchips), เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ (hard disk drive) ฯลฯ การชุบเคลือบจะกระทำกันในเตาสัญญากาศสูง สารตั้งต้นจะถูกกระทำให้เป็นไอ ในระบบสุญญากาศ โดยวิธีต่างๆทางฟิสิกส์ แล้วไอสารนั้นซึ่งมีได้ทั้งอะตอมและไอออน ฯลฯ จะตกตะกอนลงบนพื้นผิวที่ต้องการ ทั้งในแบบเกิดปฏิกิริยา (reactive deposition) และไม่เกิดปฏิกิริยา (non reactive deposition) เพื่อสร้างสารเคลือบต่างๆ ตามความต้องการของผู้ใช้งาน

1) กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน [15] แผ่นผลึกที่ต้องการฉาบโลหะจะวางอยู่ในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งเป็นสุญญากาศ โดยที่มีเครื่องสูบบแบบโรตารี (rotary pump หรือ roughing pump) ทำหน้าที่ดูดอากาศออกจากความดันบรรยากาศจนมีค่าประมาณ 10^{-3} Torr จากนั้นเครื่องสูบแพร่้ำมัน (oil diffusion pump) ที่มีการเติมไนโตรเจนเหลว จะทำการดึงความดันให้ต่ำลงอีกจนอยู่ในระดับ $10^{-6} - 10^{-7}$ Torr หรือใช้ ไครโอเจนิคส์ปั๊ม (Cryogenic pump) ในการดึงความดันแทนปั๊มแพร่ไอ (diffusion pump) ช่วงความดันที่กล่าวนี้ใช้สำหรับการฉาบไอระเหยซึ่งอาจใช้วิธีใส่ขดลวด (filament) หรือลำอิเล็กตรอน (e-beam) ก็ได้ จากนั้นโลหะที่ต้องการจะเคลือบจะถูกควมแน่นและระเหยไปบนชิ้นงานเนื่องจากระบบที่ใช้ใส่ขดลวดมักมีโซเดียมเข้ามาผสมกับทั้งสแตนจึงทำให้เกิดสิ่งปนเปื้อนขึ้น ซึ่งมีผลต่อการทำงานของไอซี ดังนั้นในการฉาบไอเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระเหยโลหะบนไอซีจึงมักใช้ระบบการฉาบไอระเหยแบบลำอิเล็กตรอนแทนซึ่งทั้ง 2 วิธี แสดงดังรูปที่

2.2

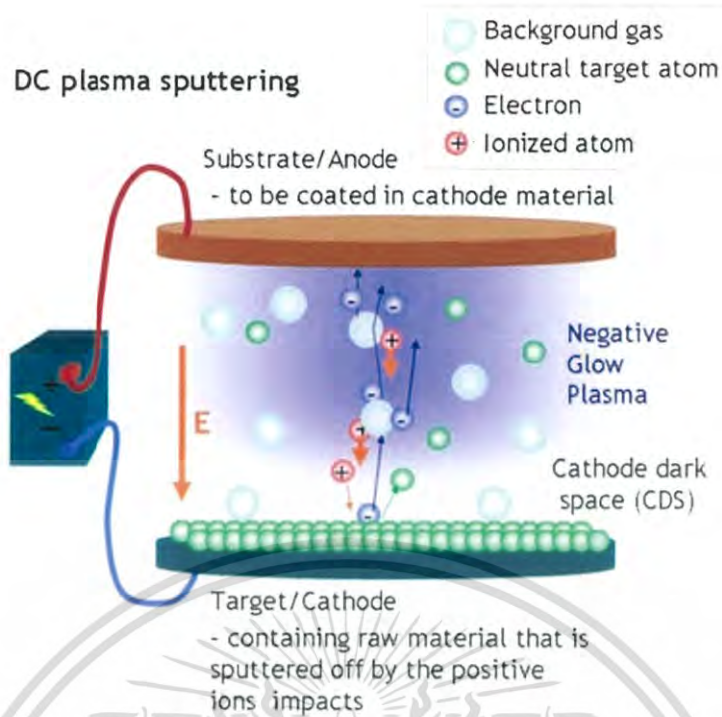


รูปที่ 2.2 แสดงเทคนิคสำหรับเคลือบฟิล์มด้วย (a) การฉาบไอโลหะแบบขดลวดที่เป็นไส้ (b) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน

2) กระบวนการเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอริง [13,14,15,16]

สปัตเตอริงเป็นเทคนิคการเคลือบฟิล์มบางอีกชนิดหนึ่งซึ่งอาจเป็นโลหะวัสดุกึ่งตัวนำหรือ ฉนวนก็ได้ หลักการของกระบวนการสปัตเตอริง คือ กระบวนการที่อะตอมผิวหน้าสารที่จะเคลือบหลุดออกมาเมื่อถูกชนด้วยอนุภาคที่มีพลังงานสูง และเกิดการเข้าไปเคลือบบนแผ่นรองรับ การชนของอนุภาคจะถ่ายเททั้งพลังงานและโมเมนตัมให้กับอะตอมผิวหน้าสารเคลือบ ในระบบนี้แผ่นฐานรอง (substrate) จะวางอยู่บนแอโนดซึ่งมีอุปกรณ์ทำความร้อนอยู่ข้างใต้เพื่อใช้เพิ่มอุณหภูมิให้แก่ฐานในขณะที่เคลือบชั้นฟิล์มและทางขั้วแคโทดจะมีเป้าซึ่งเป็นวัสดุที่จะทำการเคลือบหรือฝากลงบนแผ่นฐานที่วางอยู่ เมื่อทำการดูดอากาศออกจนได้ความดันต่ำเท่าที่ต้องการ (background pressure) อยู่ในช่วง $10^{-5} - 10^{-6}$ Torr จากนั้นจะทำการป้อนแรงดันค่าสูงให้ระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด และปรับความดันของก๊าซเฉื่อย (มักใช้ Ar เนื่องจากเป็นธาตุที่มีน้ำหนักอะตอมค่อนข้างมาก จึงเหมาะกับการใช้ระดมยิงเป้า) ที่จะเข้ามาในระบบให้มีขนาดตามต้องการหลังจากนั้น Ar จะแตกตัวเป็นไอออนอันเนื่องจากสนามไฟฟ้าค่าสูงที่ใช้ทำเป้าจึงทำให้อะตอมหรือกลุ่มอะตอมของวัสดุดังกล่าวหลุดจากผิวหน้าเป้ามาเคลือบบนแผ่นฐานรอง กระบวนการสปัตเตอริงจะให้ฟิล์มที่แน่นกว่าการระเหยสารเนื่องจากอะตอมของสารเคลือบที่เข้าเคลือบจะมีพลังงานที่สูงกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 ระบบการสปัตเตอร์

2.3 การเกิดฟิล์มบาง

2.3.1 การควบแน่นเป็นฟิล์ม (Condensation) [7,8]

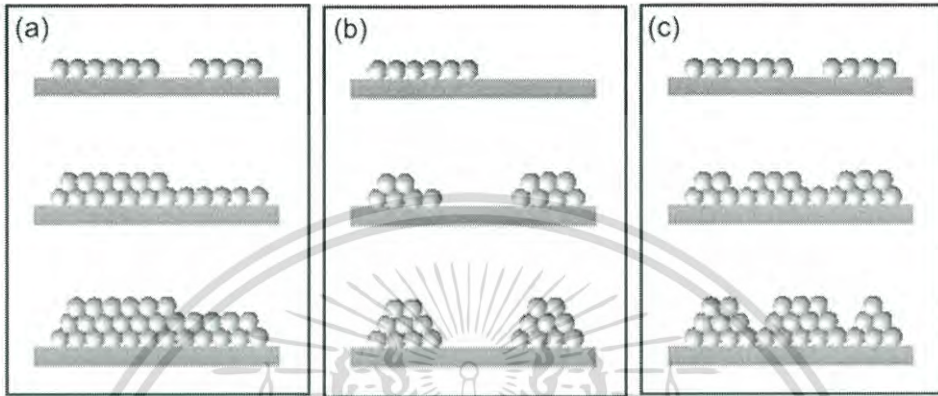
เมื่อไอของสารเคลือบสัมผัสกับแผ่นรองรับ จะเกิดการควบแน่นเป็นนิวเคลียสของสารเคลือบกระจายทั่วแผ่นรองรับและเกิดการโตเป็นฟิล์มบาง สำหรับการเคลือบฟิล์มบางแบบโอกายภาพนั้น กระบวนการเกิดนิวเคลียส (Nucleation) เป็นขั้นตอนเริ่มแรกที่สำคัญในการควบคุมกลไกการโตของฟิล์ม แบบจำลองที่ใช้อธิบายการฟอร์มตัวและการโตของฟิล์มนั้น มี 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 2.4

ก. แบบ Frank-van der Merwe หรือแบบชั้น (layer-by-layer) เกิดจากนิวเคลียสที่มีขนาดเล็กได้ขยายตัวออกในแนวระนาบและเกิดการสร้างเป็นฟิล์มชั้นแรกแล้วถูกซ้อนทับด้วยฟิล์มอีกชั้นหนึ่ง ในลักษณะที่ละชั้น ซึ่งจัดเป็นการโตใน 2 มิติ การโตของฟิล์มในลักษณะนี้เกิดเนื่องจากอะตอมเกิดการจับยึดกับแผ่นรองรับได้ดีกว่าจับกันเอง แสดงดังรูปที่ 2.4a

ข. แบบ Volmer - Weber หรือแบบเกาะ (isolated island) เกิดขึ้นจากนิวเคลียสขนาดเล็กที่คงตัวบนแผ่นฐานรองเกิดการโตใน 3 มิติแล้วฟอร์มตัวเป็นกลุ่มขึ้นมา การโตในลักษณะนี้เกิดเนื่องจากอะตอมมีการยึดเหนี่ยวกันอย่างแข็งแรง สำหรับฟิล์มโลหะและสารกึ่งตัวนำที่เคลือบบนแผ่นรองรับที่เป็นวัสดุออกไซด์จะเกิดการฟอร์มตัวแบบนี้ แสดงดังรูปที่ 2.4b

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค. แบบ Stranski-Krastanov จัดเป็นการโตแบบผสมกันทั้งลักษณะแบบ 2D layer + 3D islands โดยที่จะเกิดการฟอร์มตัวเป็นฟิล์มแบบ two-dimensional layer ก่อนซึ่งอาจมีชั้นเดียวหรือหลายชั้น หลังจากนั้นจะเกิดการฟอร์มต้นแบบ three-dimensional islands ขึ้นบนฟิล์มแบบชั้น layer ลักษณะแบบนี้พบได้ในระบบฟิล์มโลหะกับโลหะ และระบบฟิล์มโลหะกับสารกึ่งตัวนำ แสดงดังรูปที่ 2.4c



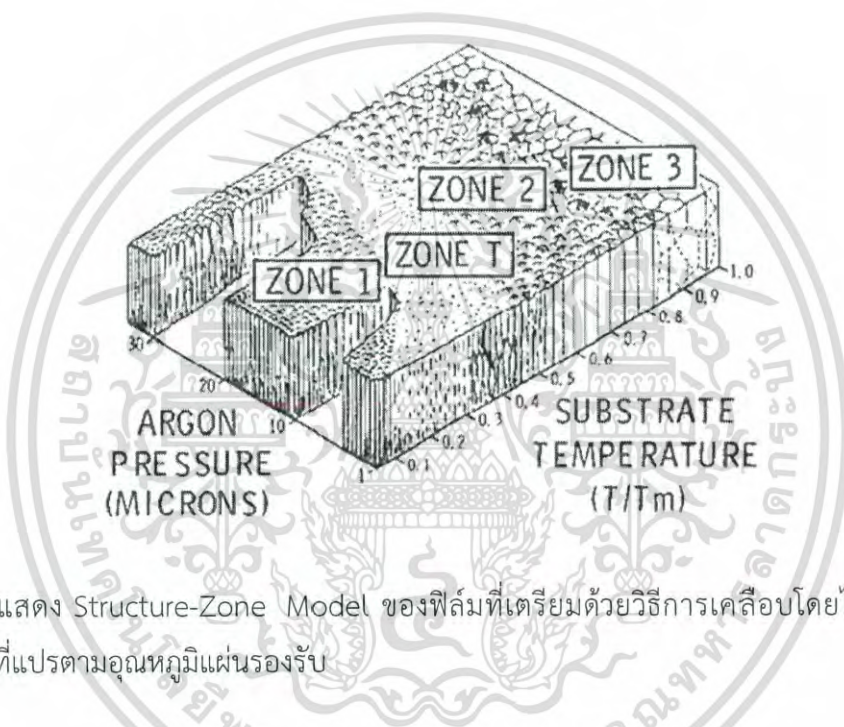
รูปที่ 2.4 ภาพแสดงรูปแบบการโตของฟิล์ม a) แบบ Frank-van der Merwe หรือแบบชั้น b) แบบ Volmer-Weber หรือแบบเกาะ c) แบบ Stranski-Krastanov

2.3.2 ความหนาแน่นจากการเคลือบฟิล์มบาง [9,38]

ฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์มักจะได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างแบบแท่งยาว ฟิล์มที่ได้ส่วนใหญ่จึงมีรูพรุนจำนวนมากที่อยู่ทั้งระหว่างแท่งและในแท่ง ปริมาณของรูพรุนเหล่านี้ขึ้นอยู่กับตัวแปรเช่น อุณหภูมิของแผ่นฐานรอง อัตราการโตของฟิล์ม ความดันตกค้างในระบบ และตัวแปรอื่นๆ พิจารณาความสัมพันธ์ของโครงสร้างจุลภาคแบบแท่งยาวกับอัตราส่วนของอุณหภูมิแผ่นรองรับกับอุณหภูมิหลอมเหลว (T_s/T_m) ดังรูปที่ 2.6 บริเวณโซนที่ 1 เป็นการเคลือบในช่วงอุณหภูมิต่ำ และความดันของก๊าซที่ไหลเข้าไปมีค่าสูงและเกิดการเกาะกันเป็นกลุ่มก้อนเล็กๆเนื่องจากสัมประสิทธิ์การแพร่ของอะตอมที่ต่ำหรืออะตอมที่เคลือบมีพลังงานจลน์ที่ต่ำทำให้เกิดการเกาะกันเป็นหลุมเล็กๆและเกิดโครงสร้างผลึกที่มีลักษณะเรียวยาวแหลมแบบ Tapers Crystallites เนื่องจากที่ความดันสูงความหนาแน่นของก๊าซในภาชนะสุญญากาศมีมาก อนุภาคจะเคลื่อนที่ตกลงมาได้ยากขึ้น ทำให้อนุภาคของผิวเคลือบตกลงมาได้น้อยและขณะตกอาจรวมกับอนุภาคอื่น ทำให้อนุภาคที่ตกลงมามีขนาดใหญ่ และมีเวลานานขึ้นในการเคลื่อนที่เพื่อฟอร์มตัวเป็นนิวเคลียส จึงทำให้ช่องระหว่างเกรนมีขนาดใหญ่ขึ้นเกิดขึ้น โซน T เป็นบริเวณต้นแบบสำหรับเคลือบฟิล์มด้วยระบบสปัตเตอร์ เกิดอยู่ในช่วงระหว่างโซน 1 และ 2 อะตอมที่อยู่บนผิวรองรับจะมีปริมาณมากขึ้น และได้รับพลังงานการชนของอนุภาคของแผ่นรองรับจะเพิ่มขึ้น และโครงสร้างในโซน 1 ก็เข้าสู่โซน T ซึ่งจะเริ่มมีเกรนยาว

เอกสารนี้เป็นทรัพย์สินของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามมิให้ทำซ้ำหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Fibrous Grain) เต็มพื้นที่ และขอบเกรนมีความหนาแน่นสูงชันมาก จึงมีการแพร่ของอะตอมผ่านขอบเกรนที่ไม่แข็งแรงนั้นเข้าไปเป็นเนื้อเดียวกัน จนกลายเป็น Columnar ต่อไป โดยปราศจากช่องว่างบริเวณขอบ โชนที่ 2 จะเกิดการแพร่ที่รอยต่อระหว่างขอบเกรน จนเกิดเป็นโครงสร้าง Columnar ที่เกิดจากการอยู่กันอย่างหนาแน่นของผลึกทั้งหลาย ขนาดของเกรนกับความหนาของฟิล์มจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากอุณหภูมิในการเคลือบและอัตราการเคลือบเพิ่ม สำหรับโชนที่ 3 ผลของอุณหภูมิที่เพิ่มทำให้ผลึกมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เนื่องจากการแพร่ของอะตอมเพิ่มขึ้น ขนาดเกรนที่ใหญ่ขึ้นรวมทั้งเป็นเกรนที่ด้านเท่ากันหมด ดังนั้นจะทำให้ปริมาตรรูพรุนลดลงเมื่อเทียบกับโชนที่ 2 นอกจากนี้การที่อะตอมแพร่ได้มากขึ้นส่งผลให้อะตอมสามารถแพร่ไปเติมตามรูพรุนทำให้ฟิล์มมีความหนาแน่นสูงขึ้น



รูปที่ 2.5 แสดง Structure-Zone Model ของฟิล์มที่เตรียมด้วยวิธีการเคลือบโดยไอทางฟิสิกส์ที่แปรตามอุณหภูมิแผ่นรองรับ

2.4 เทคนิคการวิเคราะห์ฟิล์มบาง

ฟิล์มบาง ITO จะถูกวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของฟิล์มด้วยเครื่องมือที่ใช้สำหรับการตรวจสอบดังนี้

- 1) เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
- 2) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
- 3) สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
- 4) เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด
- 5) เครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

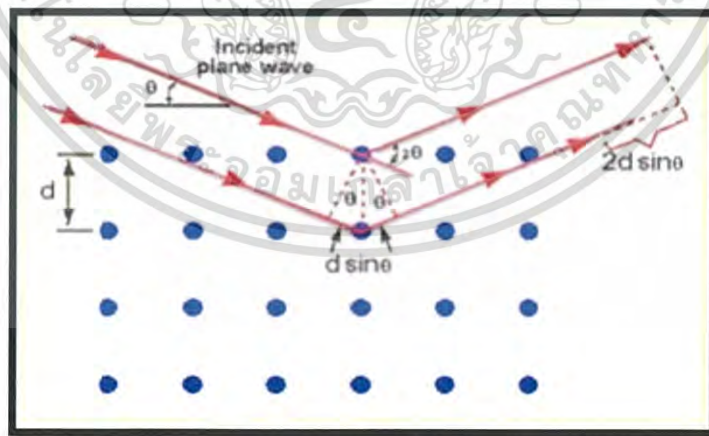
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 การวิเคราะห์ห้องค์ประกอบสารด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [20,21]

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุขั้นพื้นฐานซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) เพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างของผลึก การจัดเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลของสารประกอบต่าง ๆ ทั้งในเชิงคุณภาพและปริมาณ โดยอาศัยหลักการเลี้ยวเบนและการกระเจิงของรังสีเอ็กซ์ และความรู้เกี่ยวกับวิชาการระบบโครงสร้างผลึก เครื่องมือชนิดนี้มีความสำคัญมากในการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของธาตุต่างๆในสารตัวอย่างเพื่อศึกษาเกี่ยวกับโครงสร้างหรือเฟสของผลึก

1) หลักการทำงาน

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เป็นเครื่องมือวิเคราะห์เลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ในผลึกของตัวอย่าง โดยอาศัยหลักการของ Bragg's law หรือ $2d\sin\theta = n\lambda$ ในการคำนวณค่าการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ที่ยิงผ่านชั้นผลึก ที่อยู่ในตัวอย่าง โดยจะใช้ Detector รับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ที่เกิดจากการเลี้ยวเบนในมุมต่างๆ ของการทดสอบ โดยสามารถทำการวิเคราะห์ ได้ทั้งสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง และนำมาใช้ศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างผลึกของสารตัวอย่างได้อีกด้วย ในผลึกของตัวอย่างแต่ละชนิด จะมีขนาดของ Unit Cell ที่ไม่เท่ากัน ทำให้รูปแบบของการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่ออกมาไม่เท่ากัน ทำให้เราสามารถหาความสัมพันธ์ของสารประกอบต่างๆ กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ได้ ซึ่งจะทำให้เราทราบว่าในตัวอย่างนั้นมีสารประกอบอะไรอยู่บ้าง ข้อจำกัดของการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ก็คือไม่สามารถทำการวิเคราะห์ตัวอย่างเพื่อหาปริมาณหรือห้องค์ประกอบตัวอย่างที่เป็นอสัณฐาน (Amorphous) ได้เนื่องจากสารตัวอย่างกลุ่มนี้จะไม่เกิดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในผลึก [22]

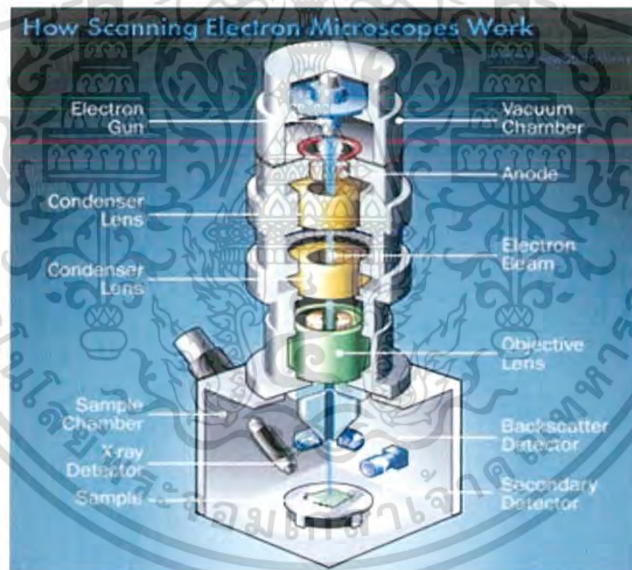
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [23,24]

เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้ศึกษาโครงสร้างพื้นผิวของวัสดุที่มีขนาดเล็กรวมไปถึงฟิล์มบาง โดยเฉพาะศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยา เช่น ลักษณะรูปร่างตลอดจนขนาดของวัสดุโดยลำอิเล็กตรอนจะส่องกราดไปบนผิวของวัตถุทำให้ได้ภาพซึ่งมีลักษณะเป็นภาพ 3 มิติ กำลังขยาย 20-800,000 เท่า

1) หลักการทำงาน

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดมีส่วนบนสุดเป็นแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (electron gun) เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปแปลงเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 2.7 หลักการทำงานและองค์ประกอบภายในของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [25]

2) สัญญาณภาพที่เกิดจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

- Secondary Electrons (SE) เป็นอิเล็กตรอนพลังงานต่ำที่เกิดจาก Primary Electrons ไปชนกับอิเล็กตรอนชั้นนอกสุดของชิ้นงานและจะหลุดออกจากผิวชิ้นที่ความลึกจากพื้นผิว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่เกิน 10 นาโนเมตร พลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะส่งสัญญาณไปยังเครื่องตรวจจับ (detector) ให้ภาพที่มีรายละเอียดสูง ภาพที่ได้จาก SE เรียกว่า Secondary Electron Image, SEI

- Back Scattered Electrons (BSE) คือ อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิด (primary electron beam) ที่ทะลุทะลวงเข้าไปใต้ผิวชิ้นงานและเกิดอันตรกิริยากับอะตอมในชิ้นงานในแบบ elastic scattering ซึ่งจะมีการกระเจิงกลับออกมาจากผิวชิ้นงาน ดังนั้น back-scattered electron จึงมีพลังงานสูงในระดับที่ใกล้เคียงกับพลังงานของ primary electron จากแหล่งกำเนิด กล่าวคือ เมื่อ Primary Electrons วิ่งเข้าใกล้หรือเข้าชนนิวเคลียสของอะตอมบนผิวชิ้นงานก็จะเกิดการเปลี่ยนทิศทางกระเจิงกลับออกมาจากผิว โดย BSE จะเกิดมากกับธาตุที่มีเลขอะตอมสูง ความเข้มของสัญญาณ BSE จะขึ้นกับมุมที่ Primary Electrons ตกใส่ชิ้นงาน และยังขึ้นกับเลขอะตอมของธาตุที่ผิวชิ้นงาน ภาพที่ได้จาก BSE เราเรียกว่า Back Scattered Electron Image (BEI) หรือ Primary Electron Image

2.4.3 เครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ [26]

สเปกโตรโฟโตมิเตอร์เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่า intensity ในช่วงรังสียูวีและช่วงแสงขาวที่ทะลุผ่านหรือถูกดูดกลืนโดยตัวอย่างที่วางอยู่ในเครื่องมือ โดยที่ความยาวคลื่นแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ สารประกอบเชิงซ้อนและสารอนินทรีย์ที่สามารถดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นเหล่านี้ได้ คุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของสารเมื่อโมเลกุลของตัวอย่างถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานเหมาะสมจะทำให้อิเล็กตรอนภายในอะตอมเกิดการดูดกลืนแสงแล้วเปลี่ยนสถานะไปอยู่ในชั้นที่มีระดับพลังงานสูงกว่าเมื่อทำการวัดปริมาณของแสงที่ผ่านหรือสะท้อนมาจากตัวอย่างเทียบกับแสงจากแหล่งกำเนิดที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ

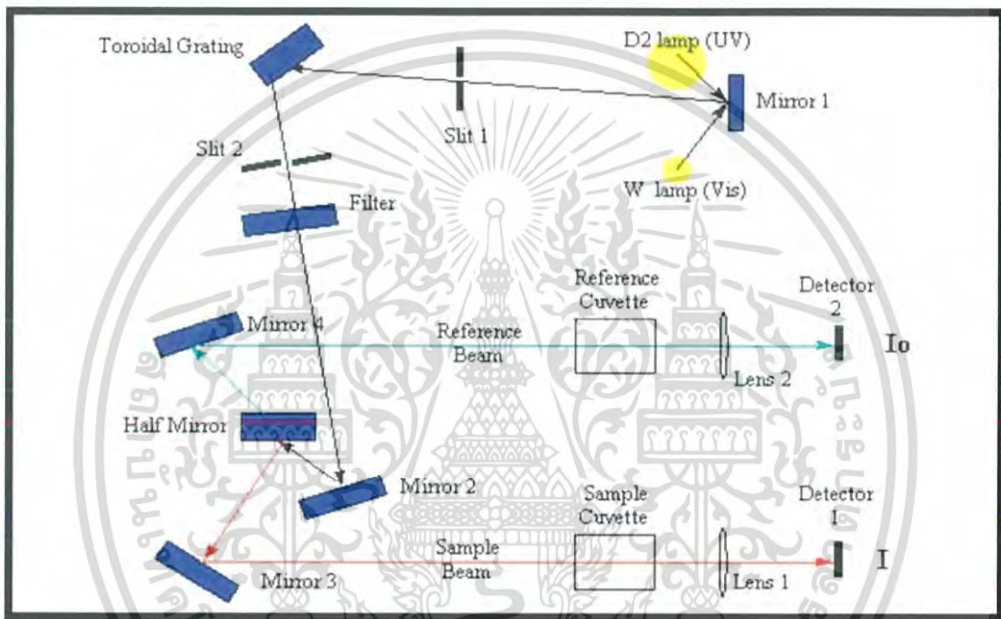
ตามกฎของ Beer-Lambert ค่าการดูดกลืนแสง (absorbance) ของสารจะแปรผันกับจำนวนโมเลกุลที่มีการดูดกลืนแสง ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ในระดับชนิดและปริมาณของสารต่างๆ ที่มีอยู่ในตัวอย่างได้

1) หลักการทำงาน

การวิเคราะห์โดยใช้สเปกโตรโฟโตมิเตอร์จะอาศัยหลักการพื้นฐานคือเมื่อโมเลกุลได้รับพลังงานคลื่นแสงในช่วง UV-Visible อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะถูกกระตุ้นให้มีระดับพลังงานที่สูงขึ้นจอร์รับ (projector lens) และปรับโฟกัสของลำอนุภาคอิเล็กตรอนให้ยาวพอดีที่จะปรากฏบนฉากเรืองแสง สุดท้ายจะเกิดการสร้างภาพขึ้นมาได้ เมื่อโมเลกุลของสารตัวอย่างได้รับพลังงานในช่วงคลื่นแสงที่ match กับ electronic transition ของอิเล็กตรอนภายในโมเลกุล พลังงานจะถูกดูดกลืนและ อิเล็กตรอนที่อยู่ภายในโมเลกุลจะมี higher energy orbital เครื่อง spectrophotometer จะ record ความยาวคลื่นที่เกิดการดูดกลืนแสงและ ปริมาณการดูดกลืนแสงในแต่ละความยาวคลื่น ภาพ

ที่ 2.9 แสดงไดอะแกรมของ optical system ภายในเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ซึ่งเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิดคือ Deuterium (D2) lamp ซึ่งให้คลื่นแสงในช่วง UV และ ไม่สามารถใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Tungsten (W) lamp ซึ่งให้คลื่นแสงในช่วง visible หลักการทำงาน เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบบนที่ mirror1 ลำแสงจะผ่านไปยัง slit และไปตกกระทบบนที่ diffraction grating ซึ่งอุปกรณ์ชนิดนี้จะถูกออกแบบให้สามารถหมุนเพื่อเลือกความยาวคลื่นแสงที่เฉพาะเจาะจง หลังจากนั้น monochromatic light (แสงซึ่งมีความยาวคลื่นเดียว) จะผ่านไปยัง slit และ filter จะทำหน้าที่กรองแสงที่รบกวนออก จากนั้นลำแสงจะตกกระทบบน mirror 2 ก่อนที่จะสะท้อนและแบ่งออกเป็นสองส่วน โดย half mirror โดยครึ่งหนึ่งของลำแสงจะสะท้อนจะผ่านไปยัง reference cuvette สุดท้ายโดย detector ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า



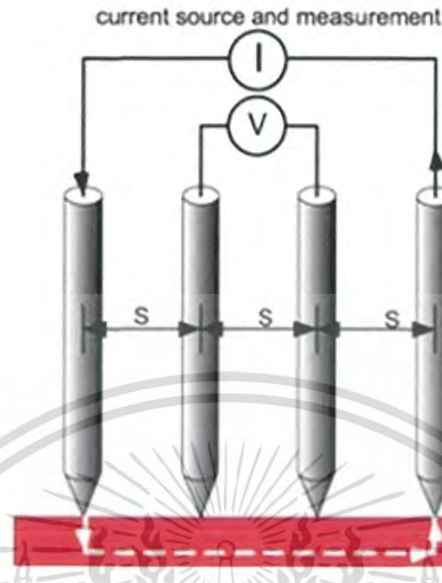
รูปที่ 2.8.1 โดยอะแกรมระบบทางแสงภายในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์

2.4.4 เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด [27]

ความต้านทานไฟฟ้าเป็นสมบัติที่สำคัญของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่จำเป็นจะต้องพิจารณาเมื่อต้องการนำวัสดุนั้นมาใช้ในสิ่งประดิษฐ์ทางไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ กรณีที่สามารถควบคุมหรือตรวจวัดพารามิเตอร์รอบข้างได้อย่างแม่นยำ การวัดค่าความต้านทานช่วยให้สามารถประเมินคุณภาพของวัสดุและสิ่งประดิษฐ์ได้ง่าย รวดเร็ว มีความแม่นยำสูง และยังเป็นการวัดแบบไม่ทำลาย อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติการวัดค่าความต้านทานให้มีความแม่นยำสูงทำได้ค่อนข้างยาก เนื่องจากผลกระทบหลายด้าน เช่น อุณหภูมิเครื่องมือวัดและการติดตั้งเครื่องมือวัด ดังนั้นจึงวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ซึ่งเป็นวิธีการมาตรฐานในการวัดค่าความต้านทานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ โดยเข็มวัดคู่หนึ่งใช้จ่ายกระแสให้กับชิ้นงานทดสอบส่วนเข็มวัดอีกคู่จะใช้วัดแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากชิ้นงานทดสอบด้วยลักษณะเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งแรงดันไฟฟ้าเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับเอาค่าไปใช้ประโยชน์ด้านการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

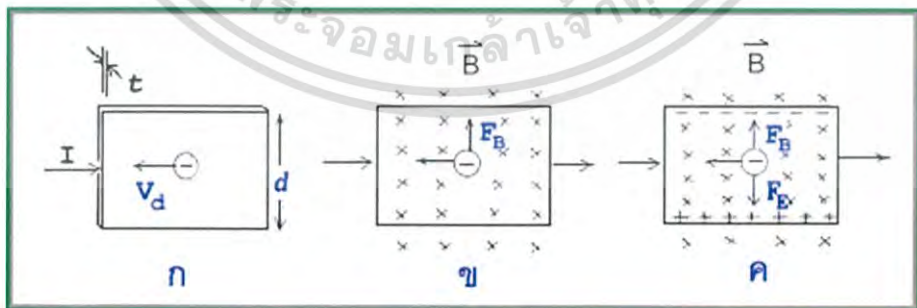
เช่นนี้สามารถตัดผลกระทบจากความต้านทานของสายไฟที่ใช้วัดและแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมจุดวัดจึงทำให้ค่าความต้านทานที่คำนวณได้มีความถูกต้องมากขึ้น



รูปที่ 2.9 การวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด [28]

2.4.5 เครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ [12]

ใน ค.ศ. 1879 เอ็ดวิน ฮอลล์ (Edwin Hall) นักศึกษามหาวิทยาลัยจอห์น ฮอปคินส์ ซึ่งในขณะนั้นมีอายุ 24 ปี ได้พบว่า เมื่อนำแผ่นตัวนำบางที่มีกระแสไฟฟ้าผ่านไปวางไว้ในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็ก พาหะประจุ (charge carriers) ในตัวนำสามารถเบนไปจากแนวทางเดิมได้ และการเบนนี้มีผลทำให้เกิดสนามไฟฟ้าในตัวนำบางในทิศตั้งฉากกับทั้งกระแสไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก การค้นพบนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์ฮอลล์



รูปที่ 2.10 ก-ค แสดงการเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์

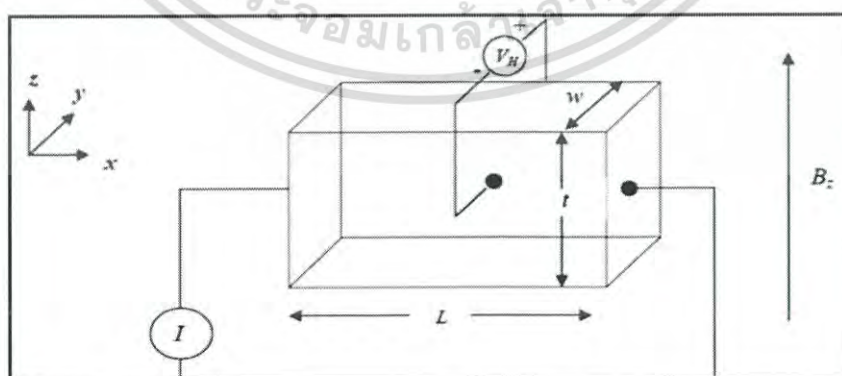
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเกิดปรากฏการณ์ฮอลล์อธิบายได้โดยใช้รูป 2.11 ก-ค ดังนี้รูป 2.11 ก แสดงแผ่นตัวนำบางที่มีความกว้าง d หนา t และมีกระแสไฟฟ้า (conventional current) I ผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ (ด้วยอัตราเร็วลอยเลื่อน (V_d) ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้า I จากด้านขวาไปด้านซ้ายรูป 2.11 ข เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งเข้าหาและตั้งฉากกับระนาบแผ่นตัวนำบางหรือกระดาษจะเกิดแรงแม่เหล็ก FB กระทำกับอิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางขอบด้านบนของแผ่นตัวนำบางรูป 2.11 ค เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ขอบด้านบนจำนวนมาก ส่วนขอบด้านล่างจะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ขอบทั้งสองทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (hall field) E_H ในแผ่นตัวนำบางมีทิศจากขอบด้านล่างไปขอบด้านบนสนามไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงไฟฟ้า FE กระทำกับอิเล็กตรอน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนถูกผลักไปทางขอบด้านล่าง เมื่อแรงไฟฟ้าและแรงแม่เหล็กมีขนาดเท่ากัน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศไปทางซ้ายโดยไม่เบน

1) ตัวรับรู้ฮอลล์ (Hall sensor) [29]

แม่เหล็ก (magnet) เป็นสิ่งที่สามารถดูวัสดุบางชนิดได้ เช่น เหล็ก นิกเกิล โคบอลต์ เป็นต้น การที่แม่เหล็กดูสารบางอย่างได้ เนื่องจากมีสนามแม่เหล็ก (magnetic field) ในบริเวณโดยรอบแม่เหล็ก เราสามารถตรวจสอบว่าบริเวณใดมีสนามแม่เหล็กหรือไม่ โดยใช้เข็มทิศ แต่เราไม่สามารถทราบได้ว่ามีค่าเท่าใดนักวิทยาศาสตร์พยายามวัดสนามแม่เหล็กด้วยวิธีการต่าง ๆ แต่ในปัจจุบันเราสามารถวัดสนามแม่เหล็กได้สะดวกและรวดเร็วโดยใช้ตัวรับรู้ฮอลล์ (Linear Hall sensor) ซึ่งทำงานโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ฮอลล์ ตัวรับรู้ฮอลล์เป็นวงจรรวมที่ทำให้เกิดความต่างศักย์ซึ่งเป็นสัดส่วนตรงกับความเข้มของสนามแม่เหล็กที่ผ่านในแนวตั้ง เมื่อนำตัวรับรู้ฮอลล์ไปต่อกับโวลต์มิเตอร์ แล้วนำไปวางใกล้บริเวณที่มีสนามแม่เหล็กก็จะทำให้ทราบค่าความเข้มของสนามแม่เหล็กได้

2) แรงดันไฟฟ้าฮอลล์ (Hall voltage)



รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับวัดค่าแรงดันฮอลล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.11 แสดงแผ่นตัวนำที่มีความกว้าง t , ยาว L และหนา w ในกรณีนี้ ยกตัวอย่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) โดยมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านในทิศจากด้านซ้ายไปด้านขวา ทำให้มีสนามไฟฟ้าคือ $E=V/L$ (พาหะประจุคืออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าจากด้านขวาไปด้านซ้าย) เมื่อใส่สนามแม่เหล็ก B ในทิศพุ่งขึ้นและตั้งฉากฐานของแผ่นตัวนำ จะเกิดแรงแม่เหล็ก F_B กระทำกับอิเล็กตรอน ทำให้อิเล็กตรอนเบนไปทางด้านหน้าของแผ่นตัวนำ (เส้นประทึบ) เมื่อเวลาผ่านไปจะมีอิเล็กตรอนถูกผลักไปที่ด้านหน้าจำนวนมาก ส่วนด้านหลัง (เส้นทึบ) จะเกิดประจุไฟฟ้าบวกจำนวนมากเช่นกัน การที่มีประจุไฟฟ้าต่างชนิดกันที่ทั้งสองด้าน ทำให้เกิดสนามไฟฟ้า เรียกว่า สนามไฟฟ้าฮอลล์ (hall field: E_H) ในแผ่นตัวนำสนามไฟฟ้าที่เกิดในแผ่นตัวนำมีความสัมพันธ์กับความต่างศักย์ V_H คือ $V_H = E_H W$ ดังนั้นการต่อหัวของมัลติมิเตอร์เพื่ออ่านค่าแรงดัน V_H ดังรูปที่ 2.11 ค่าแรงดันจะเป็นลบและในกรณีที่แผ่นตัวนำมีคุณสมบัติเป็นชนิดพี (p-type) ค่าแรงดัน V_H จะมีค่าเป็นบวก ดังนั้นเราสามารถระบุชนิดของสารกึ่งตัวนำได้ ถ้าหากเราทราบทิศทางของกระแส และทิศทางของสนามแม่เหล็ก โดยอัตราเร็วลอยเลื่อนของประจุพาหะ (Carrier drift velocity) สามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} I_x &= qv_x n_x \quad (\text{n-type}) \\ I_x &= qv_x p_x \quad (\text{p-type}) \end{aligned} \quad (2.3)$$

ในสมการที่ (2.3) I_x คือกระแสในทิศ $+x$ ที่เกิดจากสนามไฟฟ้า n หรือ p คือ ปริมาณของพาหะ/cm³ (carrier concentration/cm³) A คือ พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานด้านที่ฉีดกระแสในหน่วย cm² จากและหากใช้ $V_H = E_H W$

จะได้สมการความสัมพันธ์กับพาหะ n-type และ p-type ดังนี้

$$\begin{aligned} V_H &= E_H W = \frac{-I_x B_z}{|q|nt} \quad (\text{n-type}) \\ V_H &= E_H W = \frac{I_x B_z}{|q|nt} \quad (\text{p-type}) \end{aligned} \quad (2.4)$$

3) ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์ (Hall Coefficient)

ค่าสัมประสิทธิ์ฮอลล์สามารถเขียนได้เป็น

$$R_H = \frac{V_H t}{i_x b_z} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และหากแทนค่า V_H จากสมการที่ (2.4) ในสมการที่ (2.5) จะได้เป็นค่าความเข้มข้นหรือปริมาณของพาหะ n หรือ p ดังสมการ

$$R_H = \frac{-1}{|q|n} \quad (\text{n-type})$$

$$R_H = \frac{+1}{|q|p} \quad (\text{p-type}) \quad (2.6)$$

4) สภาพคล่องฮอลล์ (Hall Mobility)

หลังจากที่เราทราบความเข้มข้นของพาหะและชนิดของสารกึ่งตัวนำจากสมการ (2.5) และ (2.6) แล้วหลังจากนั้นเราสามารถที่จะหา สภาพคล่องของพาหะ (carrier mobility) โดยการหาค่าความนำ (conductivity) จากกฎของโอห์ม เมื่อ

$$\sigma = \frac{L}{A \times R} \quad (2.7)$$

$$\sigma = |q|\mu_n n$$







$$\sigma = |q|\mu_p p \quad (2.8)$$

2.5 โครงสร้างระดับนาโน (nanostructures)

หลักของการสังเคราะห์หรือการสร้างโครงสร้างนาโนก็คือการสังเคราะห์โครงสร้างเพื่อให้ได้โครงสร้างที่มีเกรนหรืออนุภาคที่มีขนาดอยู่ในช่วงระหว่าง 1 – 100 นาโนเมตร จึงจะนับได้ว่าเป็นโครงสร้างระดับนาโน คุณสมบัติเฉพาะที่สำคัญมากอย่างหนึ่งของอนุภาคนาโนก็คือมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวและปริมาตรค่อนข้างสูง สัดส่วนพื้นที่ผิวของอะตอมที่สูงมากดังกล่าวทำให้อนุภาคนาโนมีคุณสมบัติที่แตกต่างไปจากก้อนปริมาตรของวัสดุในขนาดใหญ่ การเตรียมอนุภาคนาโนจากสถานะไอระเหยและของเหลวมีกระบวนการที่เกี่ยวข้อง 3 ขั้นตอน คือ การก่อตัว (nucleation) การเกาะกลุ่ม (coalescence) และการเติบโต (growth) อนุภาคนาโนจะเริ่มเกิดจากการการก่อตัวจากแกนกลางจากนั้นจึงค่อยๆ เกาะกลุ่ม และรวมตัวกันเกิดเป็นกลุ่มก้อนใหญ่ขึ้น ด้วยเหตุนี้อนุภาคนาโนหลายๆอนุภาคจะถูกสร้างขึ้นอย่างสม่ำเสมอจากกลุ่มอะตอมเรียงตัวกันเป็นรูปแบบกล่องลูกบาศก์หรือโครงสร้างรูปหกเหลี่ยมแบบปิดชนิดต่างๆ ซึ่งโครงสร้างหนึ่งๆ อาจะเกิดจากการก่อตัวรอบๆ อะตอมแก่นกลางอะตอมหนึ่ง โดยในชั้นแรกมี 12 อะตอม ชั้นที่สองมี 42 อะตอม และชั้นที่ 3 มี 92 อะตอม เป็นต้น จำนวนอะตอมในแต่ละชั้นจะถูกกำหนดโดยตัวเลข $10n^2+2$ สามารถแสดงให้เห็นได้ดังตารางที่ 2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอะตอมทั้งหมดในกลุ่มและเปอร์เซ็นต์พื้นผิวอะตอม

Full shell clusters	Total number of atoms	Surface atoms (%)
One shell 	13	92
Two shells 	55	76
Three shells 	147	63
Four shells 	309	52
Five shells 	561	45
Seven shells 	1415	35

วัสดุผลึกนาโน สามารถจัดแบ่งออกเป็นหลายกลุ่มขึ้นอยู่กับทิศทาง หรือมิติของผลึก คือ

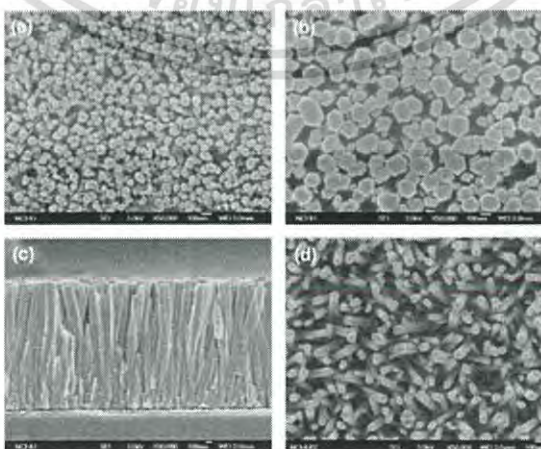
1. กลุ่มอะตอมมิติศูนย์ (zero-dimensional atom clusters)
2. โครงสร้างเนื้อเยื่อหลายชั้น 1 มิติ (one dimensional modulated multilayers)
3. โครงสร้างเนื้อเยื่อละเอียดหลายชั้น 2 มิติ (two-dimensional ultrafine-grained overlayers)
4. โครงสร้างผลึกนาโน 3 มิติ (three-dimensional Nanocrystalline structure) วัสดุผลึกนาโนอาจประกอบไปด้วยผลึก กึ่งผลึก (quasi-crystalline) และสถานะอสัณฐาน (amorphous phase) หรือแก้วนาโน (nanoglasses) วัสดุผลึกนาโนอาจจะเป็นโลหะ กึ่งโลหะ (intermetallics) เซรามิกซ์ หรือวัสดุประกอบ (composites) วัสดุผลึกนาโนยังสามารถแบ่งออกเป็น 12 กลุ่มตามรูปร่าง (มิติ) และองค์ประกอบทางเคมีของธาตุที่ประกอบเป็นโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.1 เส้นใยนาโน (nanofiber) [11,17]

เส้นใยนาโน หมายถึงวัสดุนาโนที่มีมิติภายนอกที่คล้ายกันสองมิติมีขนาดนาโน แต่อีกหนึ่งมิติมีขนาดยาวกว่ามาก ซึ่งอาจแบ่งเป็น 1. แท่งนาโน หมายถึงเส้นใยนาโนที่ไม่กลวง 2. ท่อนาโน (nanotube) หมายถึงเส้นใยนาโนกลวงหรือเส้นใยนาโนที่เป็นของแข็ง 3. ลวดนาโน (nanowire) หมายถึงเส้นใยนาโนที่เป็นตัวนำไฟฟ้าหรือเป็นสารกึ่งตัวนำ

เส้นใยนาโน เป็นโครงสร้างนาโนของวัสดุสังเคราะห์ที่มีลักษณะเป็นเส้นใยของของแข็งที่อยู่ในกลุ่มของสารอินทรีย์ และมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร โดยเส้นใยนาโนนี้ต้องเป็นเส้นใยที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วงระหว่าง 1 - 100 นาโนเมตร (เส้นใยนาโนที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 นาโนเมตรจะประกอบไปด้วยโมเลกุลของธาตุประมาณ 40 โมเลกุล และประมาณ 20 โมเลกุลนั้นเป็นส่วนที่เป็นพื้นผิวของเส้นใยนาโน) โดยมากแล้วโครงสร้างวัสดุต่างๆที่อยู่ในลักษณะของเส้นใยจะเป็นลักษณะของโครงสร้างพื้นฐาน ที่ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีพื้นที่ผิวที่มีความจำเพาะสูง คือเป็นพื้นผิวที่ทำปฏิกิริยากับหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ได้เป็นอย่างดี อย่างเช่น เป็นโครงสร้างที่มีความสามารถในการยึดหยุ่นได้ดี มีความแข็งแรงและความทนทานที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถที่จะนำมาประยุกต์ใช้งานได้อย่างหลากหลายด้าน เส้นใยนาโนสังเคราะห์ที่มีการสังเคราะห์ขึ้นมานั้น โดยมากจะถูกสังเคราะห์เพื่อนำมาใช้งานด้วยคุณสมบัติพิเศษทางด้าน การนำไฟฟ้า และคุณสมบัติเชิงกลของโครงสร้างนี้ เช่น การสังเคราะห์เส้นใยนาโนพอลิเมอร์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อนำมาใช้ในการผลิตและสร้างอุปกรณ์ระดับนาโนทางอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เช่น การใช้เป็นตัวนำไฟฟ้า สร้างตัวเก็บประจุ ทหรานซิสเตอร์ ไดโอด และนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีการเก็บข้อมูล หรือใช้ในระบบการส่งผ่านข้อมูล เช่น การสร้างหน่วยความจำและชิพสำหรับคอมพิวเตอร์ และการสังเคราะห์เส้นใยวัสดุผสมระดับนาโน เพื่อนำมาใช้เตรียมหน่วยโครงสร้างพื้นฐานสำหรับการสร้างอุปกรณ์ และโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มีคุณสมบัติพิเศษ ที่สามารถตอบสนองความต้องการในการใช้งานของมนุษย์ได้ เช่น การนำมาใช้งานทางด้านเทคโนโลยีทางด้าน การแปลงรูปพลังงานและการกักเก็บพลังงาน

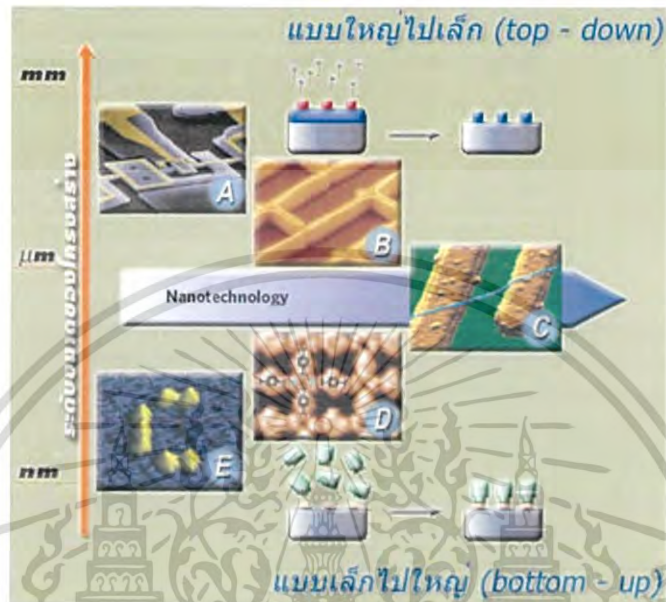


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
รูปที่ 2.12 แสดงภาพของแท่งนาโนที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ห้ามส่ง อีเมลที่มีเนื้อหาเปลี่ยนแปลงแก้ไข และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 การผลิตระดับนาโน (nanofabrication) [35]

การผลิตระดับนาโน จำเป็นต้องใช้วิธีการหรือเครื่องมือชนิดพิเศษในกระบวนการผลิต โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แนวทาง ได้แก่ การผลิตจากใหญ่ไปเล็ก (top-down) และ การผลิตจากเล็กไปใหญ่ (bottom-up)



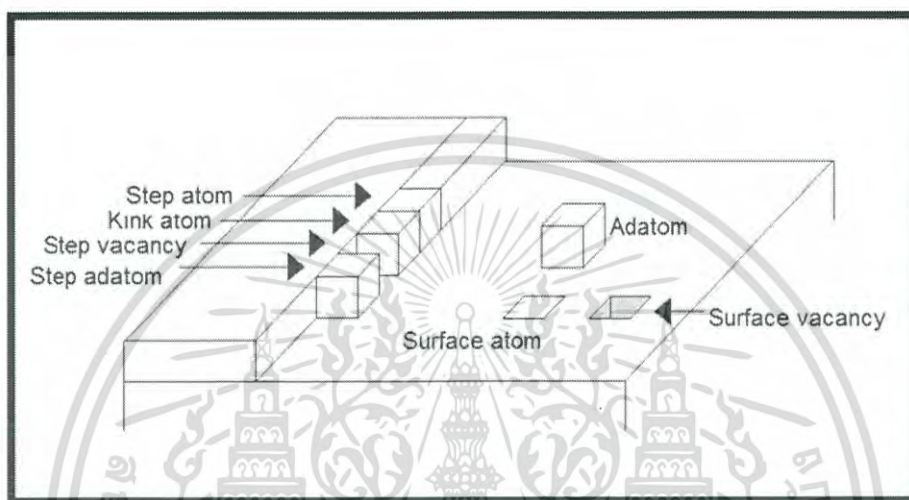
รูปที่ 2.13 การผลิตโครงสร้างระดับนาโนภาพด้านบนเป็นภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน โดย [ภาพ A] เป็น nanomechanical electrometer ที่ได้จากวิธีการ EBL และ [ภาพ B] เป็น patterned film ของท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยว และ [ภาพ C] เป็นท่อนาโนคาร์บอนผนังเดี่ยวที่เชื่อมต่อระหว่างขั้วไฟฟ้า และ [ภาพ D] เป็นโครงสร้างเครือข่ายอันเป็นระเบียบร่วมกันของนาโนและอะตอมของเหล็ก ส่วน [ภาพ E] เป็นลักษณะการจัดเรียงโมเลกุลของคาร์บอนมอนอกไซด์ (carbon monoxide) เป็นอักษรรูปตัว C โดยใช้เครื่อง STM (Scanning Tunneling Microscope)

จากภาพด้านบน แสดงให้เห็นถึง 2 แนวทางในการผลิตโครงสร้างระดับนาโน คือ วิธีการจากใหญ่ไปเล็ก (top-down) อย่างเช่น นาโนลิโทกราฟี (Nanolithography) ซึ่งเป็นการเขียนหรือการประทับเพื่อกำหนดลักษณะโครงสร้างที่ต้องการ ส่วนวิธีการจากเล็กไปใหญ่ (bottom-up) สามารถทำได้ทั้งกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นเองได้ เช่น ลำดับการเกิดเป็นมหโมเลกุล (supramolecule) หรือเป็นการออกแบบการสร้างจากความเล็กระดับอะตอมไปสู่ระดับใหญ่มากขึ้น อย่างเช่น การสังเคราะห์โดยจัดวางโมเลกุลอย่างเป็นระเบียบได้ด้วยตนเอง (Self-assembly) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ปัจจัยการเกิดแท่งนาโน (Nanorods Factor)

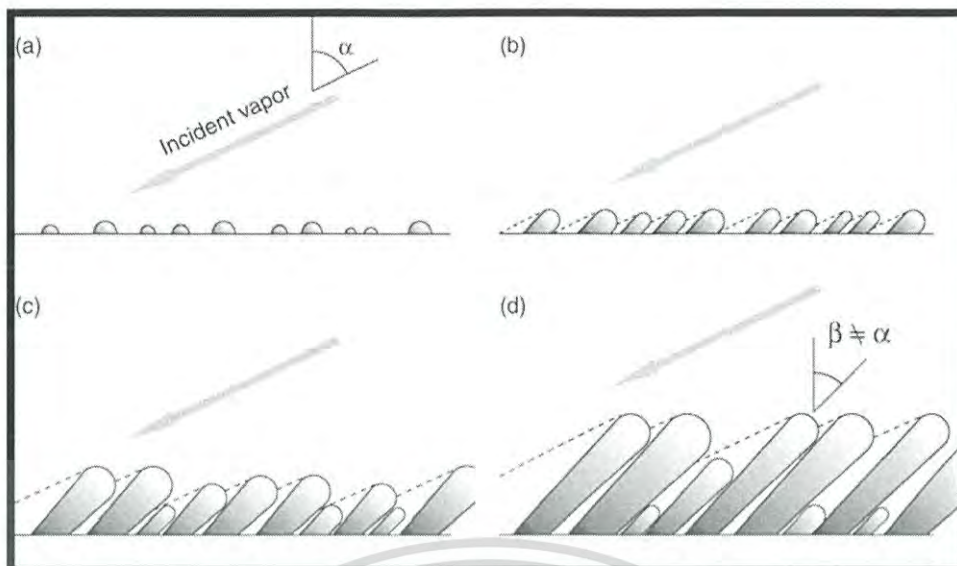
- adatom คือ อะตอมที่ตกลงบนพื้นผิวของผลึกและสามารถเคลื่อนที่ผ่านบริเวณที่เป็นที่ว่างบนผลึกได้ เมื่ออะตอมมีการรวมตัวบนผลึกมากขึ้นถ้าอุณหภูมิของผลึกหรือบริเวณที่อะตอมตกลงบนพื้นผิวนั้นมีค่าต่ำอะตอมจะเกาะกันจนเกิดเป็นแท่งนาโน เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า limited adatom แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นอะตอมจะเกิดการไหลหรือแยกออกจากกันทำให้โอกาสที่จะได้แท่งนาโนมีน้อยลง [36]



รูปที่ 2.14 ภาพแสดงการเกิด Adatom บนพื้นผิวผลึก

- GLAD การปรับมุมฐานรองไปในตำแหน่งๆ ในขณะเคลือบฟิล์มซึ่งได้รับการสนใจอย่างกว้างขวางเพราะด้วยเทคนิคดังกล่าวจะก่อให้เกิดคุณสมบัติใหม่ของฟิล์มที่มีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งความสามารถดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับ ballistic shadowing และการก่อตัวของคอลัมน์ระหว่างการเคลือบฟิล์ม โดยกระบวนการที่ปรับมุมของฐานรองที่ใช้เคลือบฟิล์มแล้วเกิดเป็นแท่งนาโนมีขั้นตอนดังภาพ (a) แสดงกระบวนการเริ่มต้นที่ปลูกฟิล์มโดยใช้ Glancing (b) เมื่อไอของสารที่ใช้เคลือบตกลงบนฐานรองและเกิดการก่อตัวของนิวเคลียสด้วยกระบวนการสุ่ม นิวเคลียสจะเติบโตกลายเป็นคอลัมน์แล้วพัฒนาเป็นเงา (shadows) ทั้งคอลัมน์และ shadows มีขนาดที่แตกต่างกัน (c) คอลัมน์บางคอลัมน์จะหยุดการโตเนื่องจากผลของ shadows (d) คอลัมน์จะโตขึ้นด้วยมุมเอียงจนมีขนาดใหญ่ที่สุดส่งผลให้คอลัมน์ข้างเคียงที่โดนผลของ shadows ก่อนหน้านั้นหยุดการโตถาวร [37]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 แผนภาพแสดงการโตของแท่งนาโนด้วย Glancing a) อะตอมของสารที่ระเหยมาตกลงบนฟิล์ม b) เกิดการจัดตัวเป็นนิวคลีโอ c) คอลลิ้นบางคอลลิ้นจะหยุดการโต d) คอลลิ้นโตขึ้นที่มุมเอียงและบางคอลลิ้นหยุดโตถาวร

2.6 การอบ

การอบชุบเหล็กด้วยความร้อน คือกระบวนการให้ความร้อนและลดความร้อนแก่เหล็กเพื่อเปลี่ยนแปลงและปรับปรุง คุณสมบัติของเหล็กนั้นให้เหมาะสมกับสภาพที่จะนำไปใช้งาน เช่น ทำให้มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น เหนียวขึ้น ด้านทานต่อการสึกหรอ แข็งขึ้น ด้านทานต่อแรงกระแทก เป็นต้น บางครั้งการอบชุบเหล็กด้วยความร้อนจะทำให้เหล็กนั้นอ่อนลงเพื่อง่ายต่อการตบแต่งไสกลึง การอบชุบเหล็กด้วยความร้อนจึงเป็นกรรมวิธีที่มีความสำคัญกรรมวิธีหนึ่งและใช้กันอย่างกว้างขวางในงานอุตสาหกรรมโลหะ และเนื่องจากเหล็กกล้าเป็นโลหะที่ใช้กันมากในงานอุตสาหกรรมโลหะซึ่งใช้ทำชิ้นส่วนของเครื่องจักร เครื่องยนต์ เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ

การอบเป็นการควบคุมกระบวนการทำความเย็นของโลหะที่กำลังร้อนแดงและทำการลดขนาดอุณหภูมิให้เย็นอย่างช้าๆ โดยกระบวนการลดอุณหภูมินี้ชิ้นงานจะยังอยู่ภายในเตาอบ หรือเตาหลอม [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 รูปชิ้นงานโลหะที่ถูกทำการอบในเตาหลอม

ในการทำการอบโลหะถูกให้ความร้อนเหนือ แนวเส้นอุณหภูมิของการเปลี่ยนรูปด้านสูง (ซึ่งกลายเป็นออสเตนไนต์) หรืออุณหภูมิสูงกว่านั้นโดยที่โลหะไม่เสียรูปร่าง เมื่อได้อุณหภูมิในการอบโลหะแล้ว ในช่วงเวลาหนึ่งจะหยุดจ่ายความร้อน ชิ้นงานยังคงให้อยู่ในเตาไม่ได้ถูกนำออกมา เพื่อทำการอบซึ่งอุณหภูมิจะลดลงต่ำอย่างช้าๆ ภายในเตาจนวัสดุเย็นตัว กระบวนการนี้จะสำเร็จก็ต่อเมื่อโลหะเย็นตัวจนถึงอุณหภูมิห้อง การอบบางครั้งมีระยะเวลาที่ยาวนาน เพื่อที่จะทำให้วัสดุมีความอ่อนนุ่มเท่าที่จะเป็นไปได้ ซึ่งอาจใช้เวลาหลายชั่วโมงหรือหลายวันก็แล้วแต่ขนาดของชิ้นงาน [32]

การอบมีวัตถุประสงค์ที่สำคัญ 3 ประการ คือ

- 1) เพื่อลดความเครียดที่เกิดขึ้นภายในเนื้อโลหะที่ผ่านกรรมวิธีหล่อขึ้นรูปด้วยวิธี Hot และ Cold working
- 2) เพื่อเปลี่ยนคุณสมบัติของโลหะให้สม่ำเสมอ
- 3) เพื่อลดแก๊สที่ปนอยู่ในเนื้อโลหะให้น้อยลงเพราะแก๊สที่ปนอยู่นี้จะทำให้โลหะมีความเหนียวต่ำ

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปลูกแท่งนาโนฟิล์ม ITO โดยเทคนิคการเคลือบด้วยเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD ในอัตราการเคลือบที่แตกต่างกันโดยโครงสร้างนาโนจะเคลือบลงบนฐานรองที่เป็น ITO ฟิล์มโดยโครงสร้างทางกายภาพจะถูกวัดด้วย GIXRD กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (HR-TEM) คุณสมบัติทางไฟฟ้า การส่องผ่านแสงและการไม่ชอบน้ำจะถูกวัดด้วยเทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด ยูวี-วิส สเปกโทรโฟโตมิเตอร์ และ เครื่องวัดมุมสัมผัส ผลลัพธ์จากวิธีการวัดต่างๆที่ได้จะบ่งบอกถึงโครงสร้างทางกายภาพและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน นอกจากนี้อัตราการเคลือบยังมีเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า อธิปไตยอย่างมากต่อโครงสร้างของแท่งนาโนโดยมีปัจจัยมาจาก อุณหภูมิการแพร่ของอะตอมผ่านไมวากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิว ความเป็นผลึกของแท่งนาโน จากการตรวจวัดทางแสงที่เคลือบลงบน ITO บนกระจกซึ่งมีคุณสมบัติเป็นขั้วไฟฟ้าโปร่งแสงจะช่วยปรับปรุงคุณภาพการส่งผ่านแสงได้ โดยอ้างอิงจากฟิล์มอินเดียมออกไซด์ ในงานวิจัยนี้แท่งนาโนฟิล์มที่เตรียมโดยวิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD มีความเป็นไปได้สูงที่จะมาประยุกต์ใช้กับโซลาร์เซลล์และอุปกรณ์ทางแสง [33]

ในงานวิจัยอุณหภูมิจากการอบมีอิทธิพลต่อโครงสร้างและคุณสมบัติทางแสงของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ที่เคลือบด้วยเทคนิคระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในที่ที่มีออกซิเจนเมื่อเคลือบฟิล์มแล้วจะถูกนำไป annealed ตั้งแต่ 350 ถึง 550 °C ในอากาศ ลำดับต่อมาจะตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของฟิล์มอินเดียมออกไซด์ ด้วย X-ray photoelectron spectroscopy (XPS) ตรวจสอบโครงสร้างฟิล์มและลักษณะพื้นผิวหลังจากผ่านการอบด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม จากโครงสร้างที่วัดด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงให้เห็นว่าฟิล์มมีความพิเศษสอดคล้องกับระนาบ (222) ในส่วนของดัชนีหักเหแสง (n) ความเป็นเนื้อเดียวกันและรูพรุนของฟิล์มเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการส่งผ่านแสงที่วัดด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ดังนั้นจึงพบว่าช่องว่างพลังงานของฟิล์มอินเดียมออกไซด์จะมีค่าตั้งแต่ 3.67 ถึง 3.85 eV โดยแปรตามอุณหภูมิจากการอบ [34]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

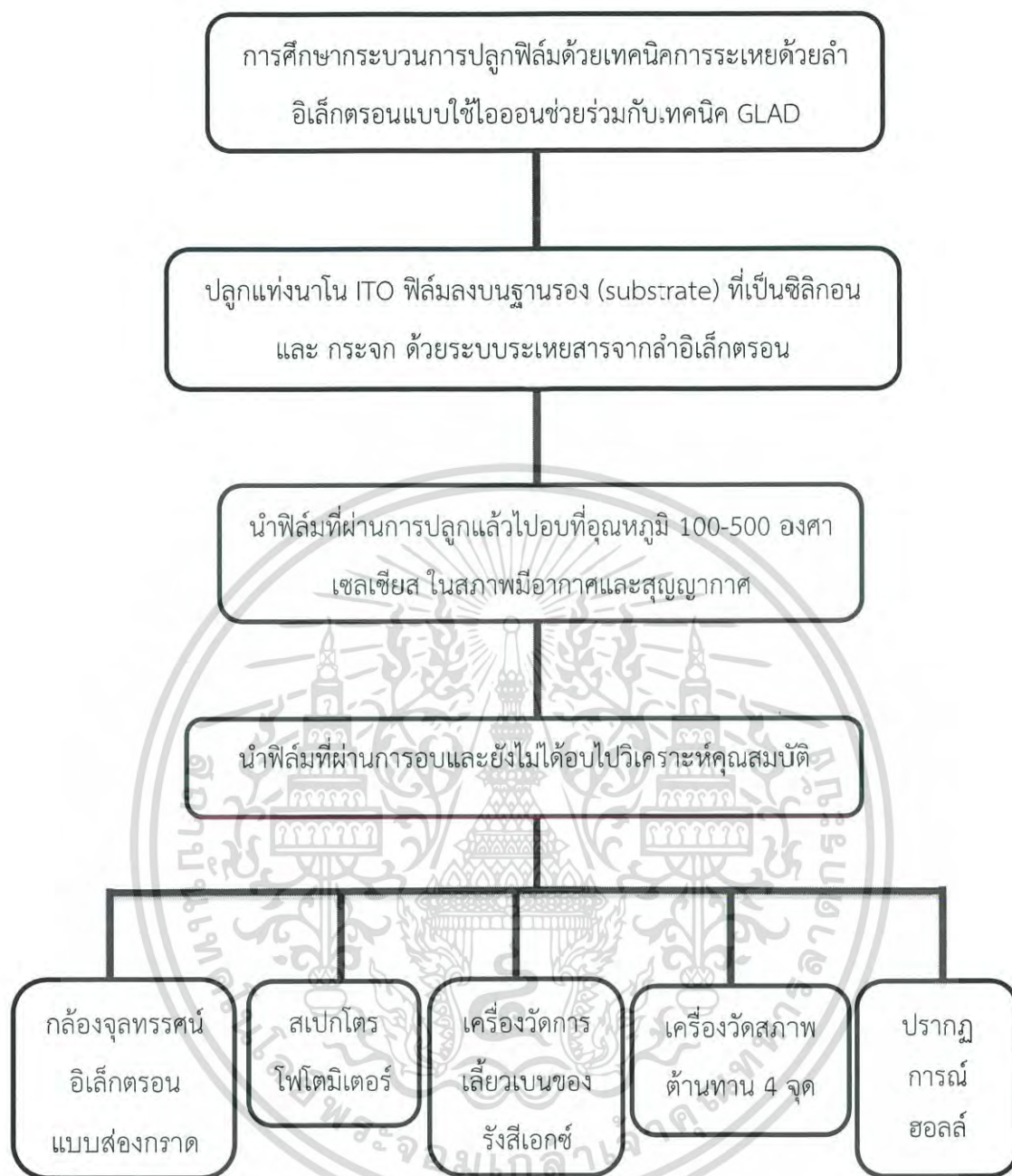
วิธีการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงานวิจัยของการเตรียมแท่งนาโน ITO พิล์มโดยวิธีเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนโดยมี GLAD และไอออนช่วยซึ่งแสดงขั้นตอนการดำเนินงานตามตารางที่ 3.1 และไดอะแกรมในรูปที่ 3.1 โดยขั้นตอนแรกของงานวิจัย เป็นการศึกษากระบวนการปลูกฟิล์มด้วยระบบการระเหยสารจากลำอิเล็กตรอนจากนั้นเมื่อมีความเข้าใจในส่วนประกอบต่างๆของระบบดีแล้ว ในขั้นตอนต่อมาจะทำการเคลือบแท่งนาโน ITO พิล์มลงบนฐานรองที่เป็นซิลิกอนและเคลือบแท่งนาโน ITO พิล์มลงบน ITO ที่ฐานรองที่เป็นกระจก (ITO NRs/ITO-TF/Glass) ด้วยระบบการระเหยสารจากลำอิเล็กตรอนจากนั้นนำฟิล์มที่ผ่านการปลูกแล้ววิเคราะห์คุณสมบัติด้วยเครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เทคนิคการวัดค่าสภาพต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด เครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์ โดยขั้นตอนการดำเนินงานส่วนต่างๆจะกล่าวรายละเอียดไว้ในบทนี้

ตารางที่ 3.1 แสดงระยะเวลาในการดำเนินการ

การดำเนินงาน	ระยะเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาโครงสร้างของแท่งนาโน ITO พิล์ม									
ศึกษากระบวนการเตรียมฟิล์ม									
เคลือบ ITO ให้เป็นแท่งนาโน และวิเคราะห์พื้นผิว									
นำฟิล์มไปอบที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.1 ไตอะแกรมขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 การเตรียมแท่งนาโน ITO พิล์ม

ในการเตรียมแท่งนาโน ITO พิล์มจะใช้ฐานรองเป็น ซิลิกอน และ กระจกที่เคลือบ ITO นำ กระจกที่เคลือบด้วย ITO มาทำความสะอาดก่อนที่จะนำไปเคลือบ ใช้เป่าอินเดียมออกไซด์และทิน ออกไซด์ ในอัตราส่วนน้ำหนัก 90/10% ใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) ในการทำความสะอาดฐานรอง โดย ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซด้วย gas controller ซึ่งมีเงื่อนไขในการทำคือปล่อยก๊าซ อาร์กอนเข้าระบบ 13 sccm ความดันต่ำกว่า 5×10^{-6} ทอร์ ปืนไอออน (Ion-gun) ค่าทางไฟฟ้า 1 แอมป์ 120 โวลต์ กำหนดเวลาในการปล่อยก๊าซเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นเคลือบฟิล์มให้เกิดเป็นแท่ง นาโน ITO พิล์มโดยปล่อยก๊าซออกซิเจนเข้าระบบ ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 50°C ปริมาณแก๊ส 8 sccm แล้วปรับเพิ่มเป็น 14 sccm เพื่อให้จุดพลาสมาติด ก่อนจะปรับลงมา 8 sccm จากนั้นเปิดชัตเตอร์โดย ทำการปรับกระแสของลำอิเล็กตรอนให้ rate การเคลือบอยู่ที่ 7.5 A/sec Ion-gun ค่าทางไฟฟ้า 1 แอมป์ 120 โวลต์ ความเร็วรอบมอเตอร์ 30 rpm GLAD 85 องศา แบ่งการเคลือบเป็นความหนา 100 nm และ 500 nm

ชิ้นงานถูกเคลือบด้วยเครื่อง ระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งติดตั้ง ณ ห้องปฏิบัติการฟิล์มบางเชิงแสง ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และ คอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

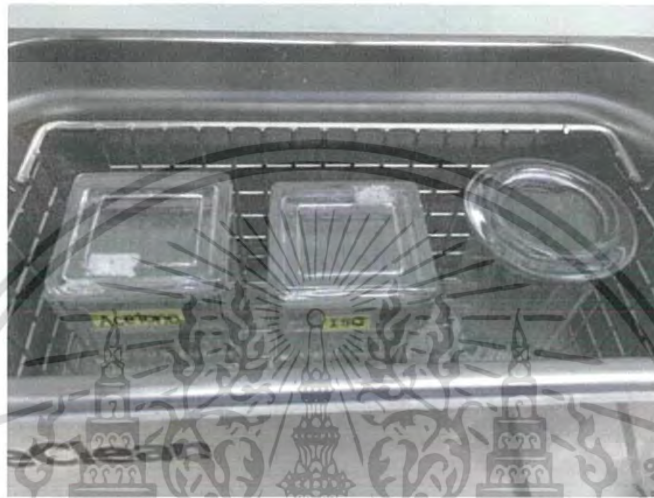


รูปที่ 3.2 เครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD ที่ใช้สำหรับการ ทดลองเคลือบ ITO พิล์มเพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างนาโนแบบแท่งโดยใช้ลำอิเล็กตรอนใน การทำให้อะตอมของสารที่จะเคลือบระเหยไปตกบนฐานรองฟิล์มแล้วก่อตัวเป็นแท่งนาโน เอกสารนี้เป็นเอกสารลับ เนื่องจากอุณหภูมิ และ GLAD ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1 ขั้นตอนเตรียมแท่งนาโน ITO พิล์ม

1) ทำความสะอาดแผ่นกระจกที่เคลือบด้วย ITO เพื่อใช้ในการเคลือบฟิล์มโดยมีขั้นตอนดังนี้

1.1) นำกระจกไปล้างด้วยเครื่องล้างแบบใช้อัลตราโซนิกโดยผ่านกระบวนการล้าง 2 รอบด้วย ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ กับ น้ำ DI แต่สำหรับกรณีกระจกธรรมดา จะต้องแช่อะซิโตนด้วย



รูปที่ 3.3 เครื่องล้างความถี่สูง (Ultrasonic Cleaner)

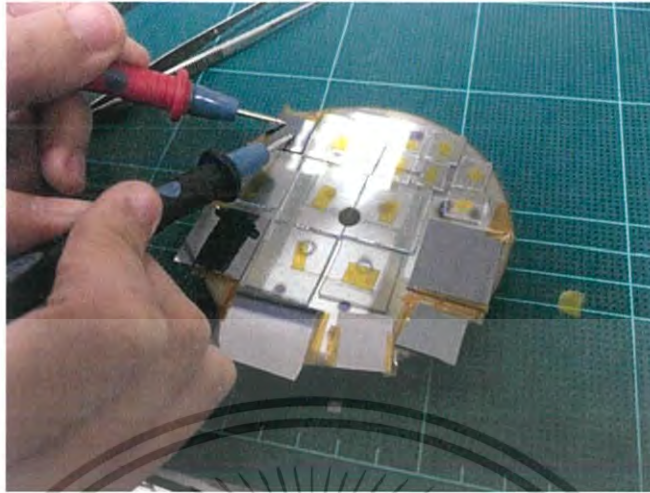
1.2) กระจกที่ผ่านทั้ง 3 ขั้นตอนแล้วจะนำไปเป่าให้แห้งด้วยไนโตรเจน



รูปที่ 3.4 นำกระจกไปเป่าด้วยไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) นำกระจกและซิลิกอนมาติดบนฐานรองโดยกระจกจะใช้ด้านที่เป็นกระจกธรรมดาติดด้วยเทปสติกและต้องนำกระจกมาวัดค่าความต้านทานเพื่อหาด้านที่เป็นฟิล์ม



รูปที่ 3.5 วัดค่าความต้านทานของซิลิกอนและกระจก ITO

- 3) นำแผ่นฐานรองเข้าไปภายในภาชนะสุญญากาศ
4) ทำความสะอาดหัว ion-gun โดยใช้ กระดาษทรายเบอร์ 400 และทำความสะอาดถ้วยใส่สาร อินเดียมทินออกไซด์รวมถึงบริเวณรอบๆ



รูปที่ 3.6 เครื่องสำหรับทำความสะอาดหัวของปืนไอออน

- 5) วอร์มโครโอเจนิคส์ปั๊มโดยเปิดแม่คานิคอลปั๊มให้ความดันต่ำกว่า 100 มิลลิทอร์ แล้วเปิดรีเจนวาล์ว (Regen valve) ความดันต่ำกว่า 100 มิลลิทอร์ จากนั้นเปิดปั๊มโครโอเจนิคส์โดยให้อุณหภูมิอยู่ที่ 10 องศาเซลวิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ที่วัดอุณหภูมิของปั๊มโครโอเจนิคส์

- 6) ทำให้ภายในภาชนะสุญญากาศเป็นสุญญากาศโดยใช้แม็คคานิคอลปั๊มซึ่งต้องเปิดลาฟร์วาล์ว (Rough valve) และ โครโอเจนิคส์ปั๊มเปิดวาล์วสุญญากาศแบบพิเศษ (Hivac valve)
- 7) ความดันต่ำกว่า 5×10^{-6} ทอร์ เปิดก๊าซอาร์กอนเพื่อทำความสะอาดฐานรอกจากนั้นเริ่มเคลือบฟิล์มให้เป็นแท่งนาโน ITO โดยปรับลำอิเล็กตรอนให้ได้ตำแหน่งที่ต้องการแล้วทำการปิดชัตเตอร์ (Shutter) และปล่อยก๊าซออกซิเจนผ่านเข้ามาในภาชนะสุญญากาศเพื่อช่วยให้ฟิล์มไม่ดำ
- 8) รอดูอุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส ปิดวาล์วสุญญากาศแบบพิเศษ เปิดช่องระบายอากาศ (Vent) ให้อากาศเข้าไปภายในภาชนะสุญญากาศเพื่อสามารถจะเปิดภาชนะสุญญากาศได้
- 9) นำชิ้นงานที่ผ่านการเคลือบแล้วออกมาจากภายในภาชนะสุญญากาศ

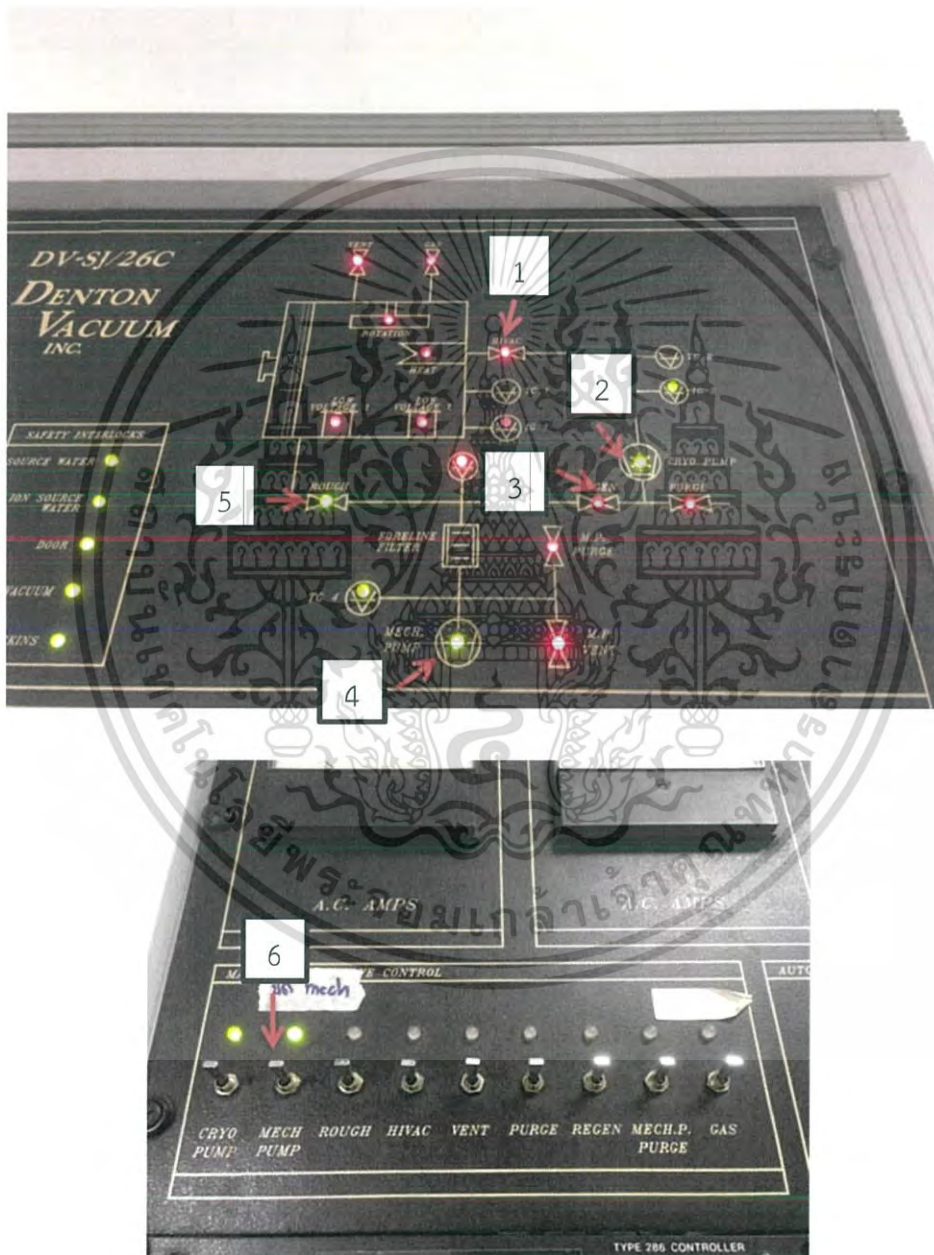


รูปที่ 3.8 แสดงฟิล์มบางที่ผ่านการเคลือบ ความหนา 500 nm

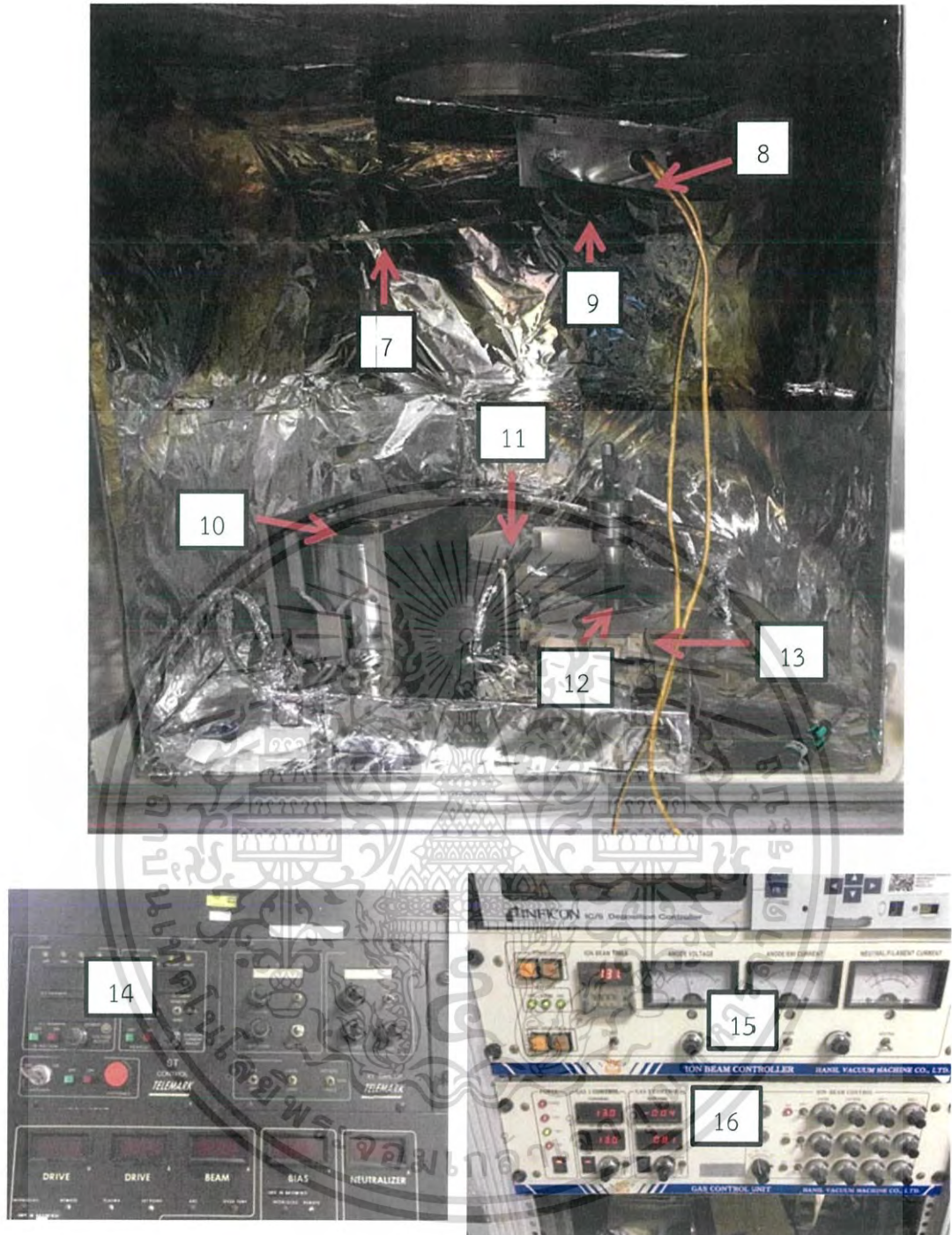
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ส่วนประกอบของเครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD

ระบบของเครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD ที่ใช้สำหรับเคลือบแผ่นนาโน ITO พิล์มจะประกอบด้วยส่วนสำคัญหลายอย่างโดยแบ่งออกเป็นส่วนที่ใช้ควบคุมการทำงานของปั๊มสำหรับลดความดันให้เป็นสุญญากาศ ที่ควบคุมกระแสและแรงดันของลำอิเล็กตรอนกับ Ion-gun และอุปกรณ์ภายในภาชนะสุญญากาศ ซึ่งจะแสดงดังภาพที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ส่วนประกอบหลักที่ใช้สำหรับควบคุมการทำงานของปั๊มสุญญากาศ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบหลักของเครื่องระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพที่ 3.9 และ 3.10 มีส่วนประกอบที่สำคัญในการควบคุมป้อนและการเคลือบฟิล์มโดยมีรายละเอียดดังนี้

1. วาล์วสุญญากาศแบบพิเศษ
2. ไครโอจินิกส์ป้อน
3. รีเจนวาล์ว
4. แม็คคานิคอลป้อน
5. ลาฟร์วาล์ว
6. สวิทช์เปิด-ปิดสำหรับป้อน
7. เซนเซอร์วัดความหนาฟิล์ม
8. GLAD
9. ฐานรองชิ้นงาน
10. ปืนไอออน
11. ชัตเตอร์
12. เป้าสำหรับเคลือบฟิล์ม
13. ลำอิเล็กตรอน
14. ตัวควบคุมกระแสและแรงดันของลำอิเล็กตรอน
15. ปรับกระแสและแรงดันของปืนไอออน
16. สวิทช์เปิด-ปิดและควบคุมการไหลของก๊าซ

3.3 เครื่องวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของฟิล์มบาง

แท่งนาโน ITO ฟิล์มที่เตรียมได้จากเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD โดยจะมีการวิเคราะห์โครงสร้างและสมบัติของฟิล์มบางที่สภาวะต่างกัน เครื่องมือตรวจสอบมีดังนี้

1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
2. สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
3. เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
4. เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด
5. เครื่องวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

ในการศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มที่ถูกเคลือบด้วยกระบวนการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD ครั้งนี้ต้องใช้เครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์ผลหลายชนิด ในที่นี้แสดงรายละเอียดของเครื่องมือพอสังเขป โดยแบ่งรายละเอียดเป็นดังนี้

3.2.1 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดถูกใช้สำหรับตรวจสอบแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่เงื่อนไขในการเคลือบแตกต่างกัน โดยดูความเป็นแท่งนาโนในแนว top-view กับ cross-section และ ความหนาของฟิล์มที่ 100 nm และ 500 nm ในแนว กับ cross-sectional ซึ่งผลที่ได้จะสามารถระบุลักษณะการเปลี่ยนแปลงของแท่งนาโนก่อนกับหลังการอบในสภาวะมีอากาศกับสุญญากาศและที่อุณหภูมิต่างๆ

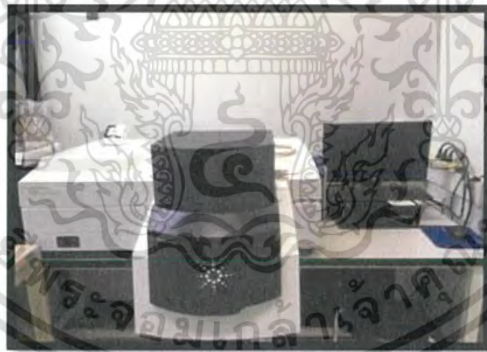
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดติดตั้งที่อาคารกลุ่มนวัตกรรม 2 สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.)

3.2.2 สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

เป็นการวิเคราะห์ผลการส่องผ่านแสงบนกระจกที่ผ่านกระบวนการเคลือบให้เป็นแท่งนาโน ITO फिल्मก่อนและหลังอบ โดยจะอบที่อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีอากาศและสุญญากาศ



รูปที่ 3.12 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์การส่องผ่านและการดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

เป็นเครื่องมือวิเคราะห์วัสดุชั้นพื้นฐานซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบไม่ทำลายตัวอย่าง (non-destructive analysis) ใช้วิเคราะห์รูปแบบความเป็นโครงสร้างผลึกที่ความหนาของฟิล์มและอนุหภูมิในการอบแตกต่างกัน ผลที่ได้จะออกมาเป็นปริมาณความเข้มแสงสูงที่สุดซึ่งเป็นการบ่งบอกว่าระนาบนั้นๆ มีความเป็นผลึกสูง



รูปที่ 3.13 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ติดตั้งที่ศูนย์เครื่องมือจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.4 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุด

เมื่อทำการเคลือบฟิล์มโดยเงื่อนไขที่แตกต่างกันจะทำการวัดความต้านทานเชิงแผ่นของฟิล์มเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติในการนำไฟฟ้า



รูปที่ 3.14 เครื่องวัดสภาพต้านทาน 4 จุดติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ภายนอก (NECTEC) ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 เครื่องมือวัดปรากฏการณ์ฮอลล์

เป็นเครื่องมือที่สามารถตรวจสอบปริมาณพาหะภายในฟิล์ม การนำไฟฟ้า และสภาพคล่องของพาหะ สภาพต้านทานไฟฟ้าเพื่อใช้เปรียบเทียบประสิทธิภาพก่อนและหลังจากการอบกับความหนาของฟิล์มที่แตกต่างกัน

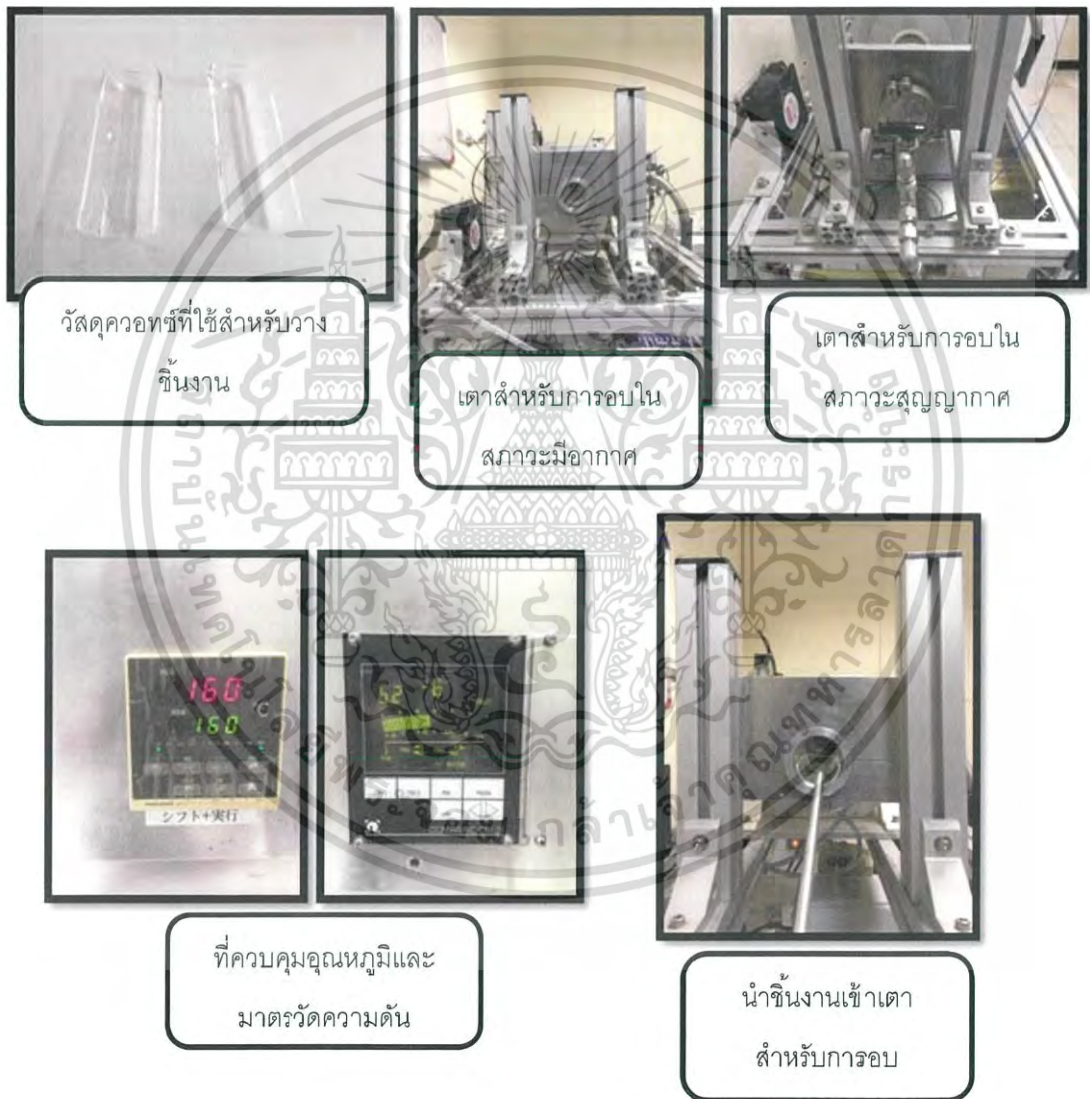


รูปที่ 3.15 เครื่องมือวัดฮอลล์เอฟเฟกต์ถูกติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 การเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของฟิล์มด้วยวิธีการอบ

เมื่อทำการเคลือบฟิล์มให้เกิดเป็นแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์แล้ววัดคุณสมบัติความเป็นผลึก การส่งผ่านแสง ลักษณะทางไฟฟ้าจากนั้นจะนำฟิล์มไปผ่านกระบวนการปรับสภาพทางความร้อนโดยการอบด้วยวิธีการเคลือบผิวด้วยไอเคมี (Chemical Vapor Deposition (CVD)) ที่อุณหภูมิต่างๆ ซึ่งในแต่ละอุณหภูมิจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแท่งนาโนขึ้นโดยที่เปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติดังกล่าวว่ามีประสิทธิภาพมากขึ้นหรือลดลง แสดงอุปกรณ์และเงื่อนไขในการอบดังนี้



รูปที่ 3.16 แสดงอุปกรณ์สำหรับการอบในสภาวะมีอากาศกับสุญญากาศติดตั้งที่ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 แสดงเงื่อนไขสำหรับการอบในสภาวะมีอากาศกับสุญญากาศ

การอบ			
ในอากาศ		ในสุญญากาศ	
อุณหภูมิ	100-50 องศาเซลเซียส	อุณหภูมิ	100-500 องศาเซลเซียส
ความหนาฟิล์ม	100,500 nm	ความหนาฟิล์ม	100,500 nm
เวลา	2 ชั่วโมง	เวลา	2 ชั่วโมง
		ความดัน	6.7×10^{-6} มิลลิบาร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดำเนินงานวิจัยและผลการดำเนินการวิจัย

ในบทที่ 4 กล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลของแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ ก่อนและหลังการอบที่เตรียมด้วยวิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD

4.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวแท่งนาโน ITO ฟิล์มก่อนการอบ

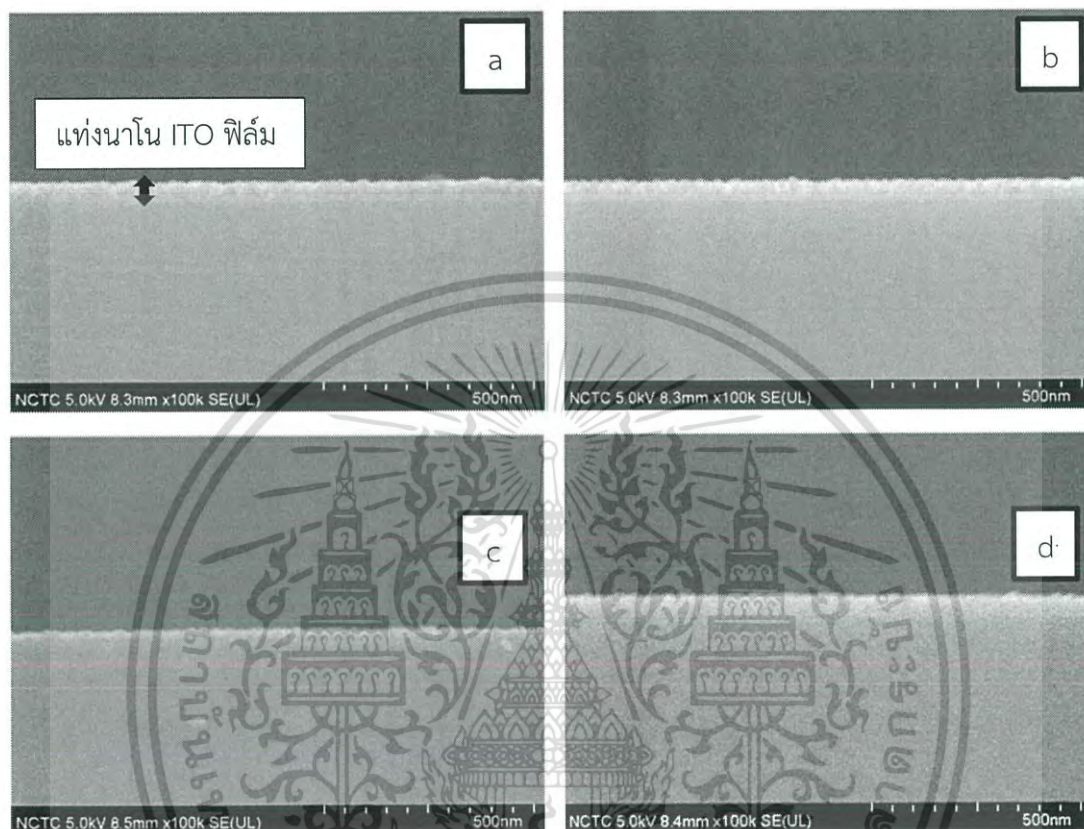
การศึกษาฟิล์ม ITO ก่อนการอบที่พอร์มตัวเป็นแท่งนาโนหลังจากผ่านการเคลือบที่ความหนา 100 nm และ 500 nm จำนวน 4 ชุดการเคลือบ ในอัตราการเคลือบฟิล์มเท่ากันที่ 7.5 \AA/s ซึ่งตัวแปรที่ทำให้ฟิล์มที่ถูกเคลือบแล้วได้ความหนาตามต้องการจะพิจารณาที่ความสัมพันธ์ระหว่างเวลากับ อุณหภูมิและตัวตรวจวัดการระเหยของสารต่อพื้นที่ (quartz crystal microbalance : QCM) ภายในภาชนะสุญญากาศ

เมื่อทำการสังเกตแท่งนาโน ITO ฟิล์มก่อนการอบที่ความหนาต่างกันและหลังการอบอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ในอากาศและสุญญากาศที่ความหนาแตกต่างกันพบว่าสามารถแยกฟิล์มได้ด้วยสีแต่ก็มีปัจจัยของตัวตรวจวัดการระเหยของสารต่อพื้นที่ การควบคุมกระแสกับแรงดันซึ่งเป็นผลให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลงไป 50 เปอร์เซ็นต์ ในส่วนของหัว ion-gun ที่ผ่านการใช้งานมาหลายครั้งทำให้พื้นผิวของวัสดุสึกกร่อนไปมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความหนาฟิล์มเพียงเล็กน้อยเท่านั้น สีของฟิล์มสามารถแยกฟิล์มได้แต่ไม่สามารถบอกได้ถึงความหนารวมและขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ดังนั้นจึงต้องนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

4.1.1 การวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

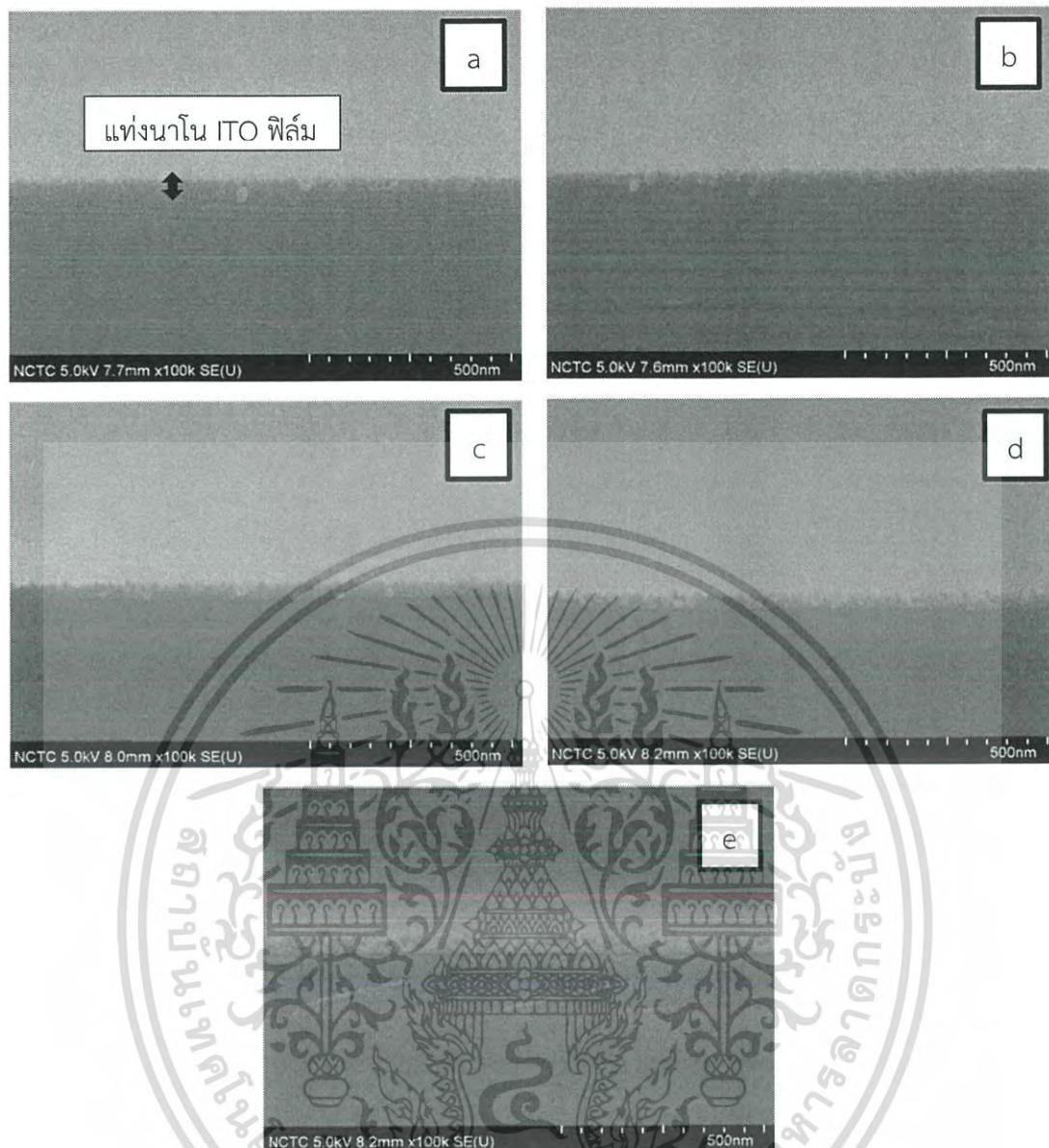
ในการวิเคราะห์โครงสร้างของแท่งนาโนบนซิลิกอนจะถูกแบ่งออกเป็น (1) ภาพตัดขวาง ซึ่งผลที่ได้จะแสดงออกมาเป็นความหนา (2) ภาพพื้นผิวผลที่ได้จะแสดงออกมาเป็นขนาดของแท่งนาโนโดยการวิเคราะห์ทั้ง 2 กรณี จะใช้กำลังขยาย 100 เท่า หลังจากนั้นจะนำผลทางโครงสร้างมาใช้สำหรับพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงต่อไป

การเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 100 nm และ 500 nm เมื่อผ่านกระบวนการเคลือบฟิล์มแล้วความหนาจะลดลงไปประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาที่ตั้งเนื่องจากตัวตรวจวัดการระเหยของสารตั้งนั้นจึงเป็นปัจจัยซึ่งส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงหลังกระบวนการอบที่ทำให้ความหนาต่างกันดังแสดงตามรูปที่ 4.1-4.3



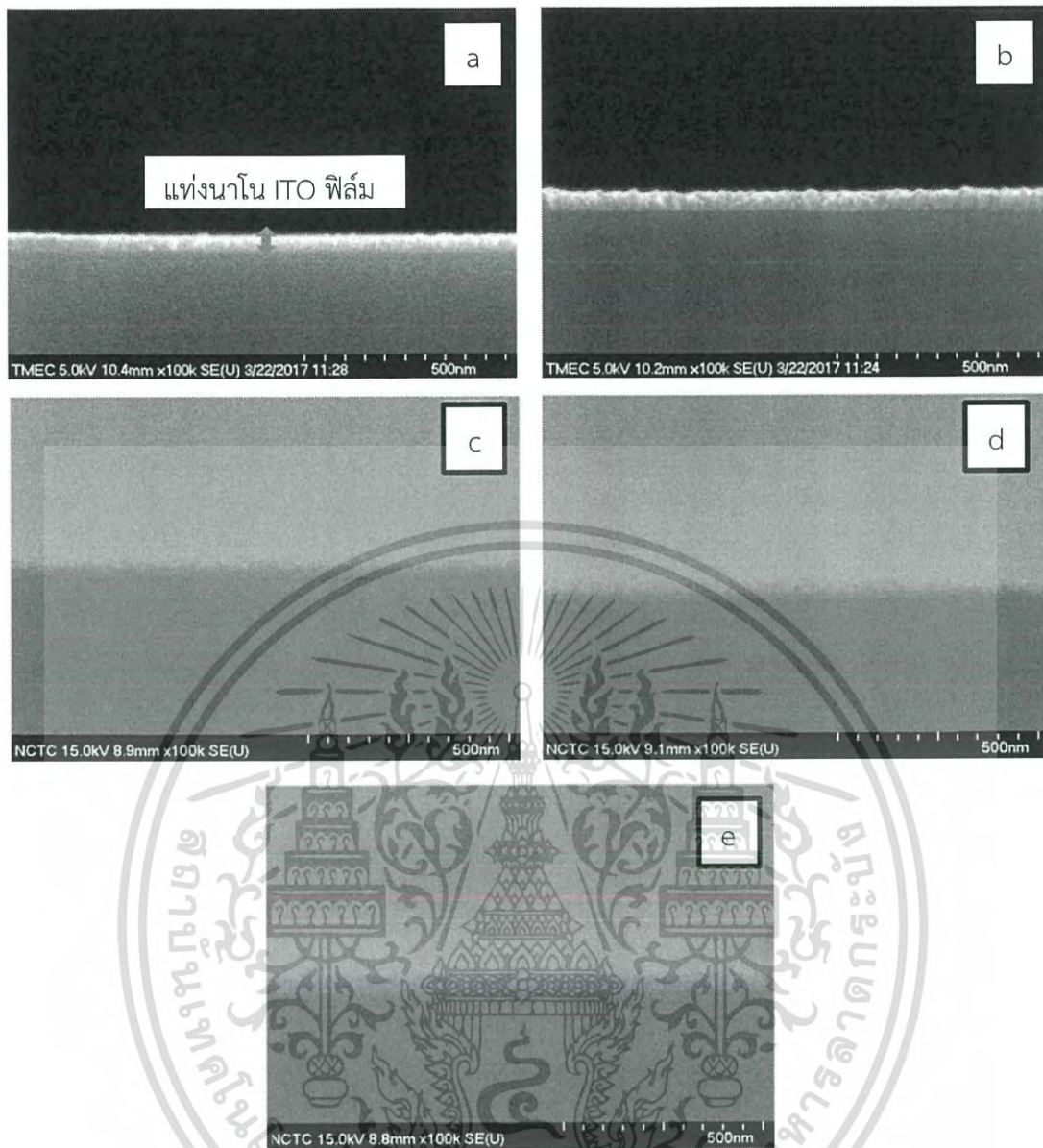
รูปที่ 4.1 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO ฟิล์มความหนา 100 nm ก่อนการอบ a) ครั้งที่ 1 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 51.23 nm b) ครั้งที่ 2 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 52.92 nm c) ครั้งที่ 3 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 48.00 nm d) ครั้งที่ 4 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 55.15 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์มที่ความหนา 100 nm หลังการอบในอากาศ a) 100 องศาเซลเซียส ความหนา 40.20 nm b) 200 องศาเซลเซียส ความหนา 38.96 nm c) 300 องศาเซลเซียส ความหนา 38.17 nm d) 400 องศาเซลเซียส ความหนา 41.42 nm e) 500 องศาเซลเซียส ความหนา 40.82 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

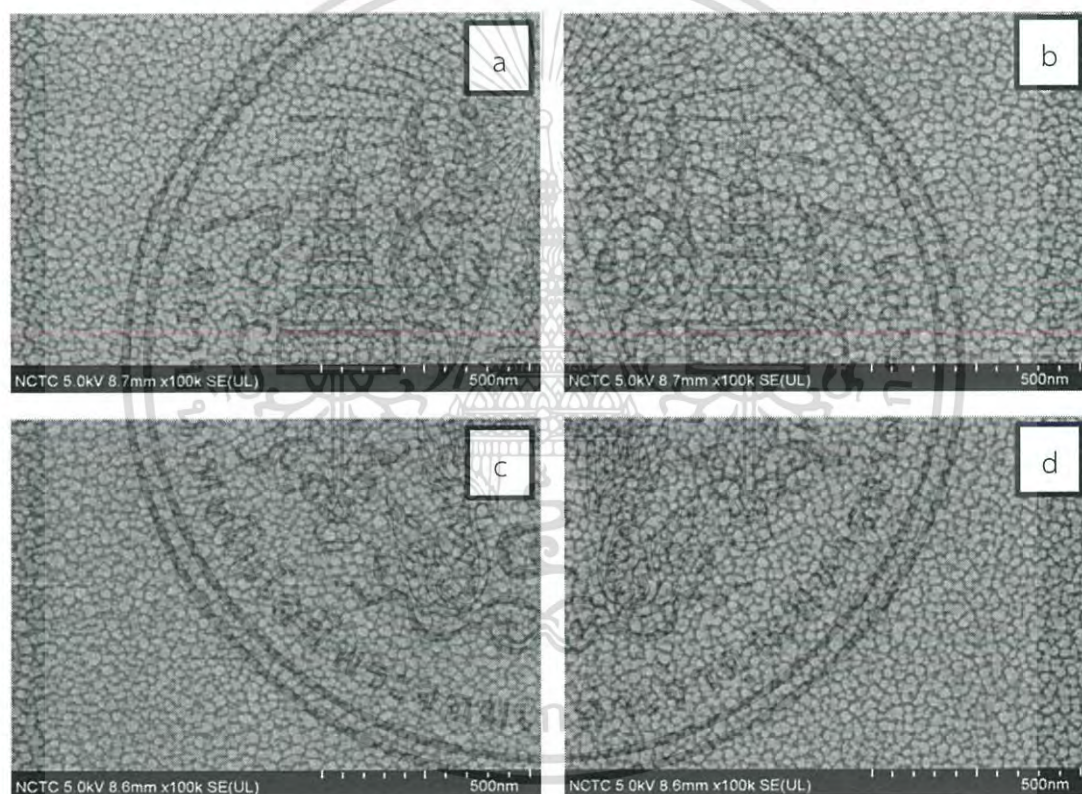


รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์มที่ความหนา 100 nm หลังการอบในสุญญากาศ a) 100 องศาเซลเซียส ความหนา 44.59 nm b) 200 องศาเซลเซียส ความหนา 45.08 nm c) 300 องศาเซลเซียส ความหนา 39.58 nm d) 400 องศาเซลเซียส ความหนา 39.27 nm e) 500 องศาเซลเซียส ความหนา 38.50 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

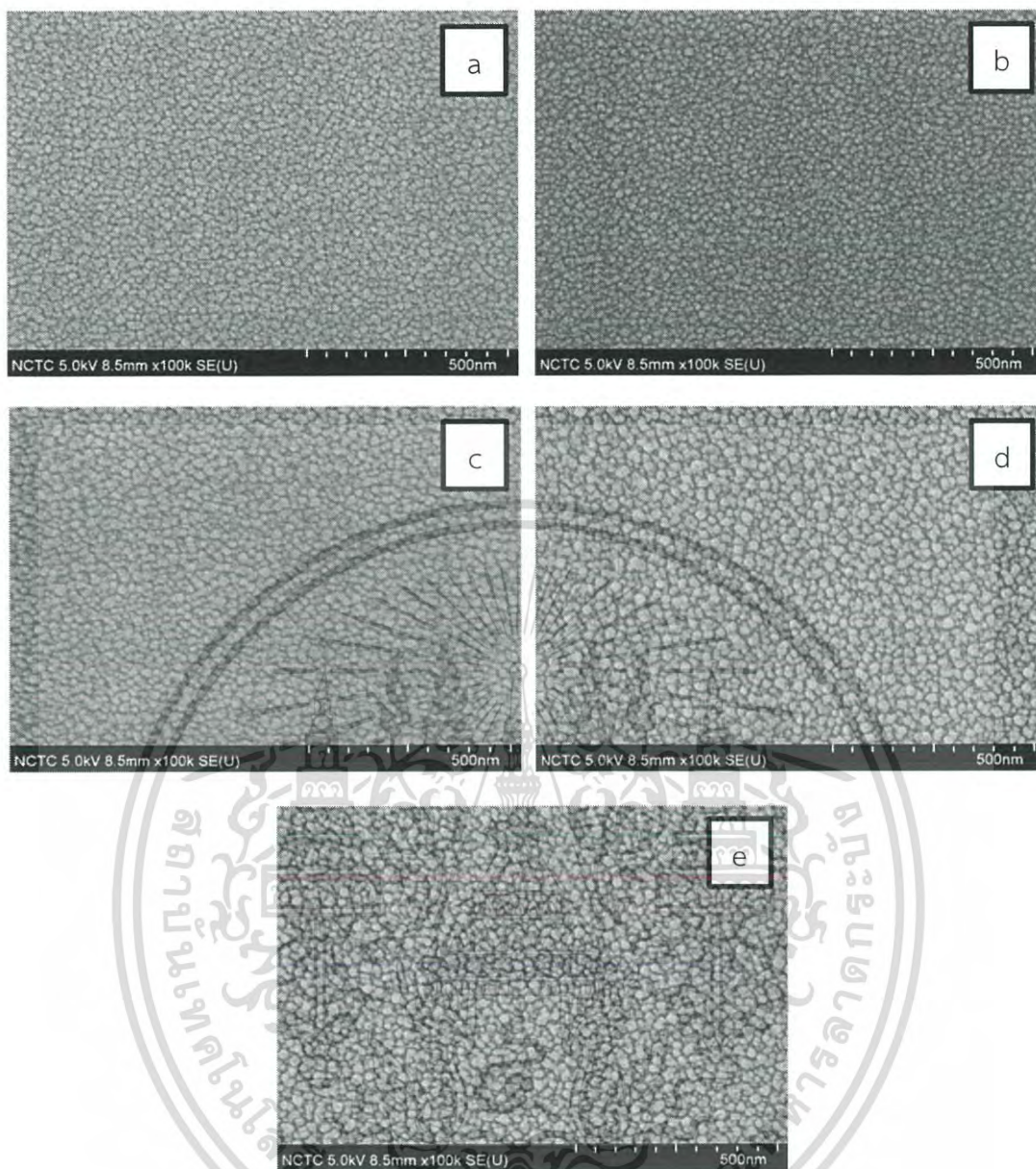
จากผลของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่วัดได้จะเห็นว่าความหนาที่แสดงออกมา 100nm ระบุความเป็นแท่งนาโนได้ยากเนื่องจากตอนเคลือบฟิล์มอัตราการเคลือบเกิดความคลาดเคลื่อนขณะที่ทำการปรับเนื่องจากปัจจัย ความสะอาดของเป้า ตัวตรวจวัดการระเหยของสาร และการปรับกระแสแสงกับแรงดัน ดังนั้นความหนาที่เคลือบบนฟิล์มจริงๆจะลดทอนไปประมาณครึ่งหนึ่งของความหนาที่กำหนด โดยที่ความหนาฟิล์ม 500nm ก็ถูกลดทอนไปเช่นเดียวกันดังนั้นการแก้ปัญหาคือตั้งความหนาที่จะเคลือบฟิล์มเพิ่มเป็น 2 เท่าแต่จะมีผลเสียคืออุณหภูมิที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลต่อโครงสร้างของแท่งนาโน

จากผลการทดลองที่แสดงถึงความหนาของแท่งนาโนฟิล์มก่อนและหลังอบที่ความหนาต่างกันและจะมีการแสดงขนาดของแท่งนาโนควบคู่กันเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง ดังรูปที่ 4.4-4.6



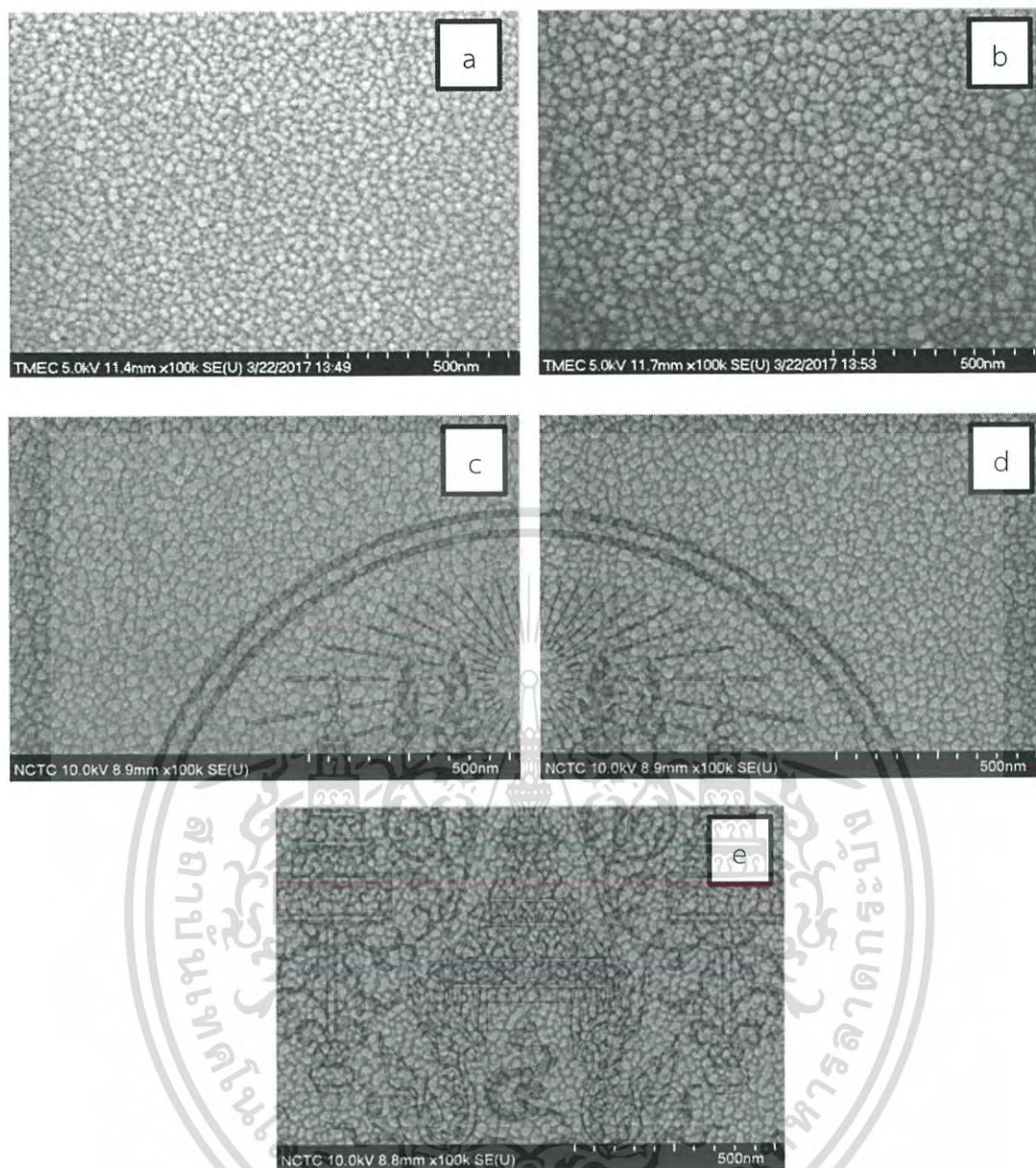
รูปที่ 4.4 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO ฟิล์มก่อนการอบที่ความหนา 100 nm a) ครั้งที่ 1 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.05 nm b) ครั้งที่ 2 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.76 nm c) ครั้งที่ 3 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.23 nm d) ครั้งที่ 4 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 24.44 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์มที่มีความหนา 100 nm หลังการการอบในอากาศ a) 100 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 18.13 nm b) 200 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 17.61 nm c) 300 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 18.31 nm d) 400 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 21.57 nm e) 500 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 21.46 nm

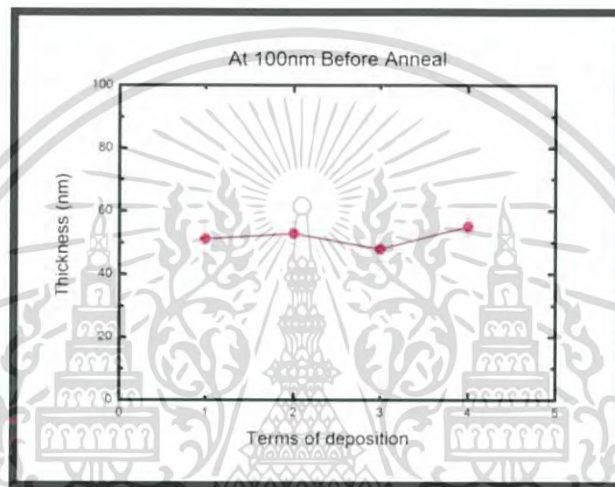
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



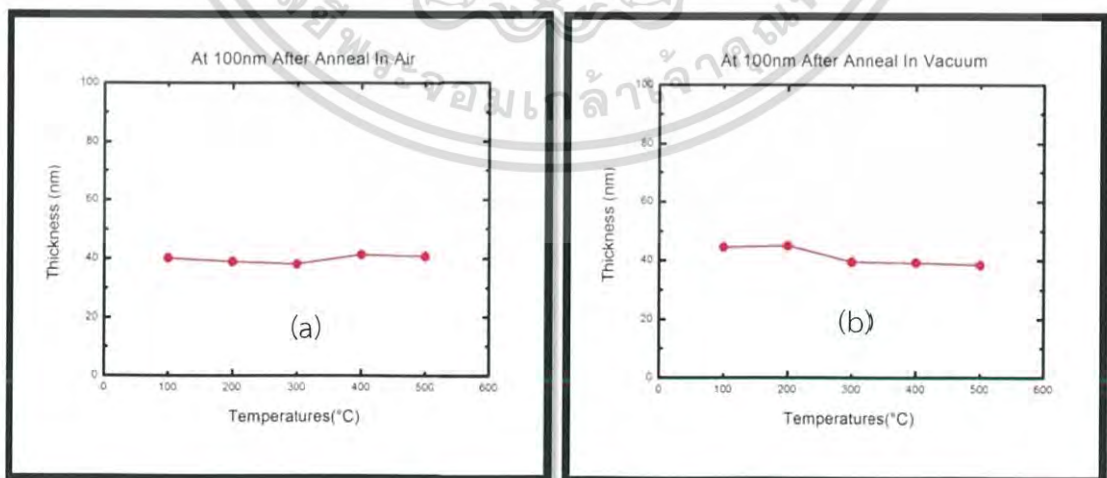
รูปที่ 4.6 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO ฟิล์มที่มีความหนา 100 nm หลังการการอบในสุญญากาศ a) 100 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 20.20 nm b) 200 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 22.64 nm c) 300 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 20.85 nm d) 400 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 19.62 nm e) 500 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 17.07 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

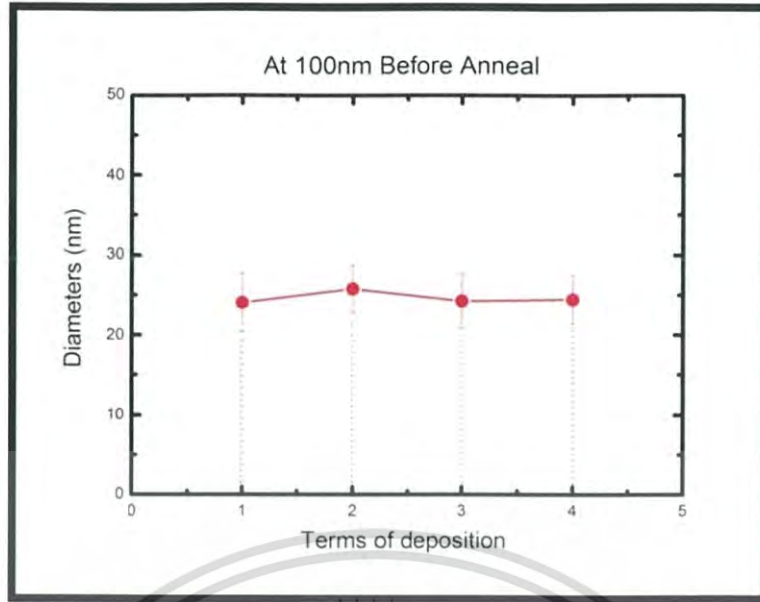
จากภาพตัดขวางและภาพพื้นผิวที่ได้ด้วยการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะนำมาพล็อตเป็นกราฟที่แสดงถึงความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนโดยเฉลี่ยทั้งหมด 70 ค่า สำหรับความหนา และ 50 ค่า สำหรับเส้นผ่านศูนย์กลางพร้อมทั้งหาค่าคลาดเคลื่อน จากภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่ความหนา 100 nm ก่อนและหลังการอบภายใต้บรรยากาศสภาวะที่มีอากาศและสุญญากาศ ณ อุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส โดยกราฟที่พล็อตออกมาใช้สำหรับเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างก่อนกับหลังการอบและสภาวะที่แตกต่างกันซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้สามารถนำมาอธิบายการเปลี่ยนแปลงของค่าการส่องผ่านแสง ค่าทางไฟฟ้าและความเป็นผลึกของแท่งนาโนฟิล์ม ดังรูปต่อไปนี้



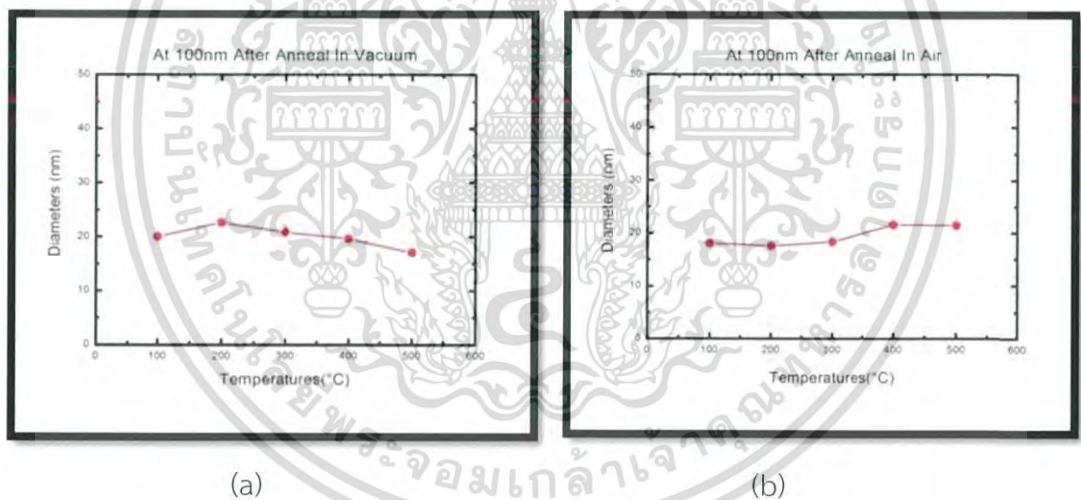
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่ความหนา 100 nm



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำอุณหภูมิที่ความหนา 100 nm a) หลังการอบในอากาศ b) หลังการอบในสุญญากาศ
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับอาจารย์งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



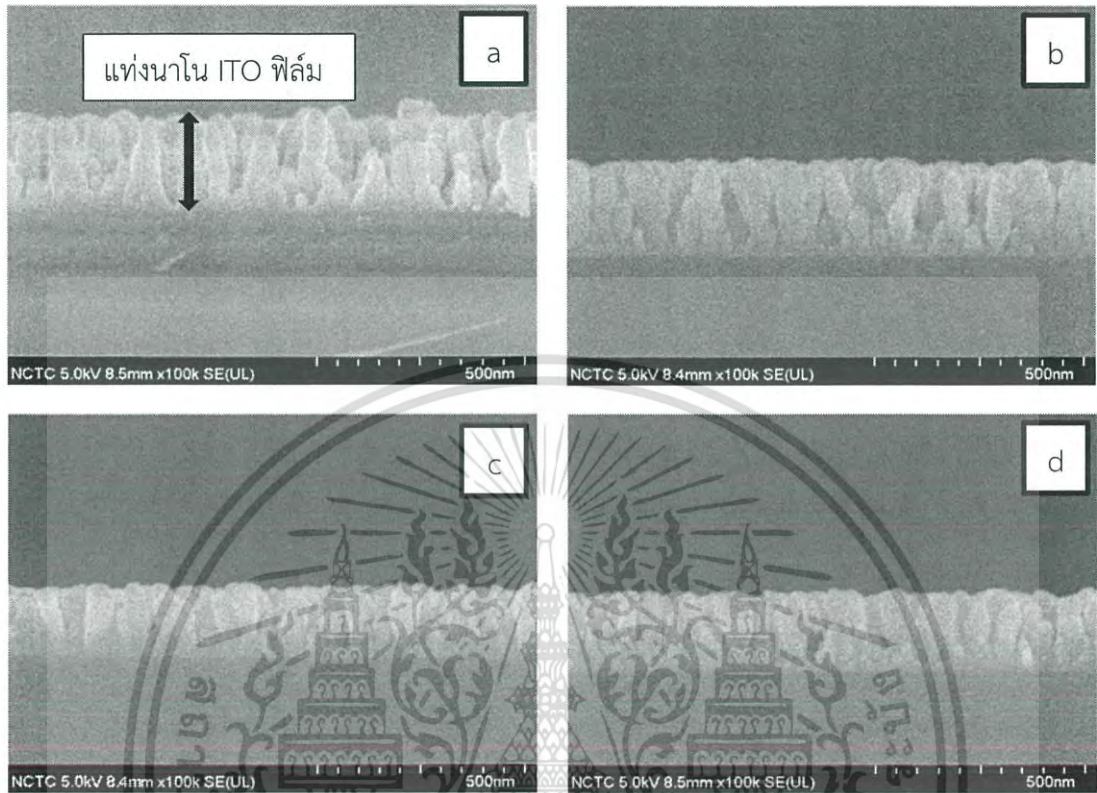
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO फिल्मกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 100 nm



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO फिल्मกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 100 nm a) หลังการอบในอากาศ b) หลังอบในสุญญากาศ

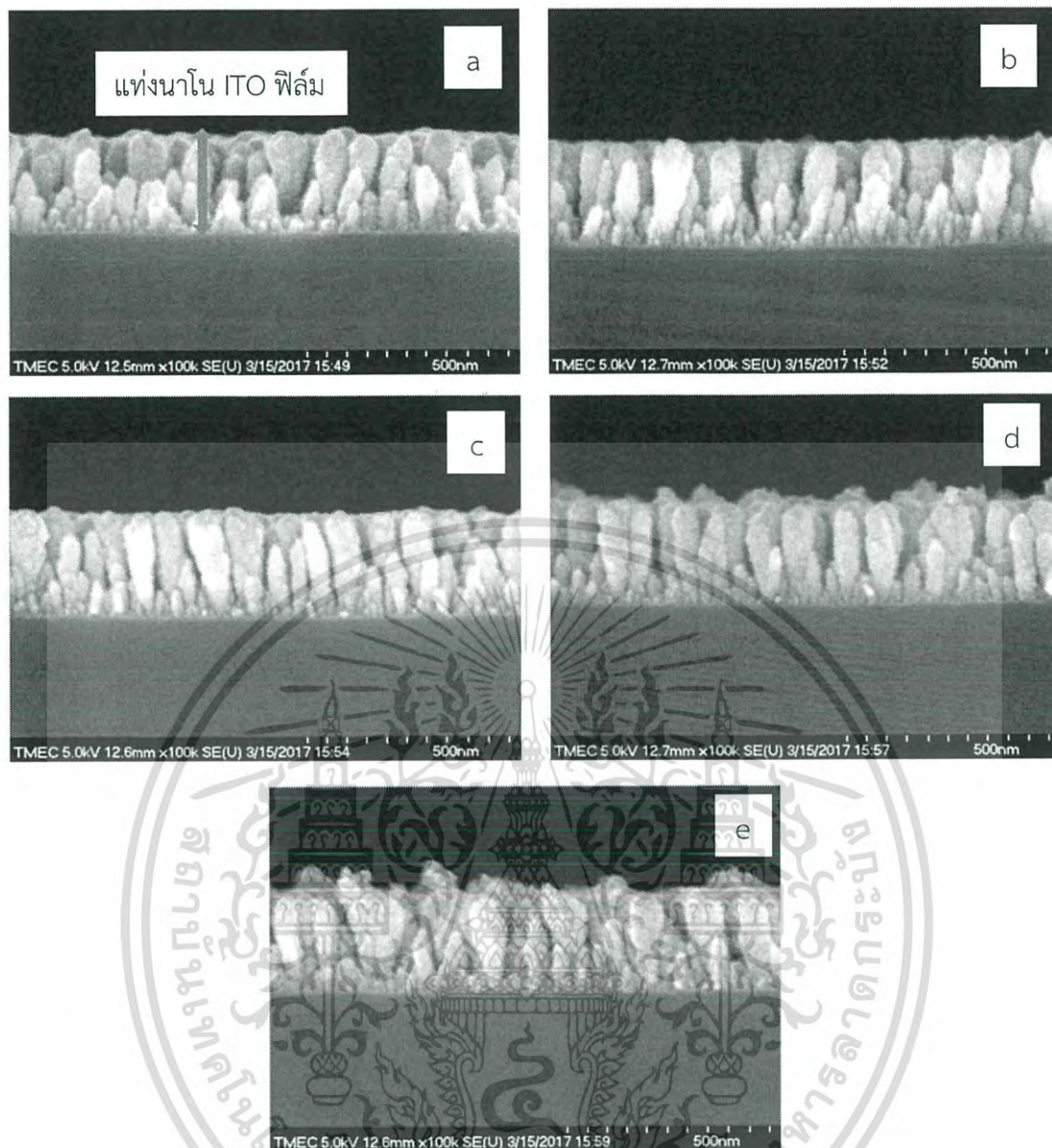
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลของภาพตัดขวางที่ความหนา 500 nm ก่อนการอบและหลังจากผ่านกระบวนการอบอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.11-4.13



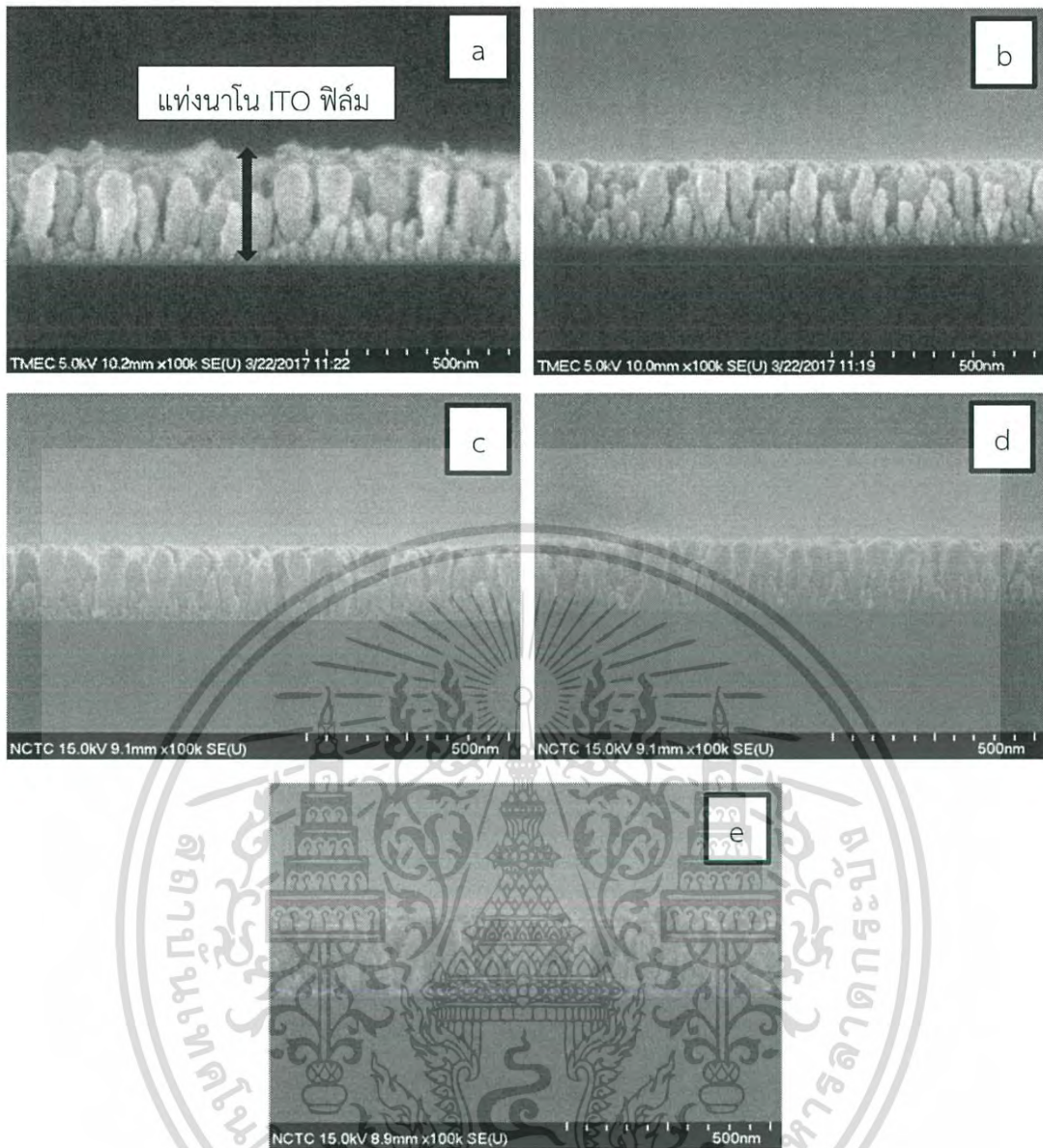
รูปที่ 4.11 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์มที่ความหนา 500 nm ก่อนการอบ a) ครั้งที่ 1 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 245.9 nm b) ครั้งที่ 2 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 243.84 nm c) ครั้งที่ 3 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 207.71 nm d) ครั้งที่ 4 ที่เคลือบฟิล์มความหนา 211.48 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์มที่ความหนา 500 nm หลังการอบในอากาศ a) 100 องศาเซลเซียส ความหนา 247.78 nm b) 200 องศาเซลเซียส ความหนา 249.71 nm c) 300 องศาเซลเซียส ความหนา 250.5 nm d) 400 องศาเซลเซียส ความหนา 248.5 nm e) 500 องศาเซลเซียส ความหนา 246.5 nm

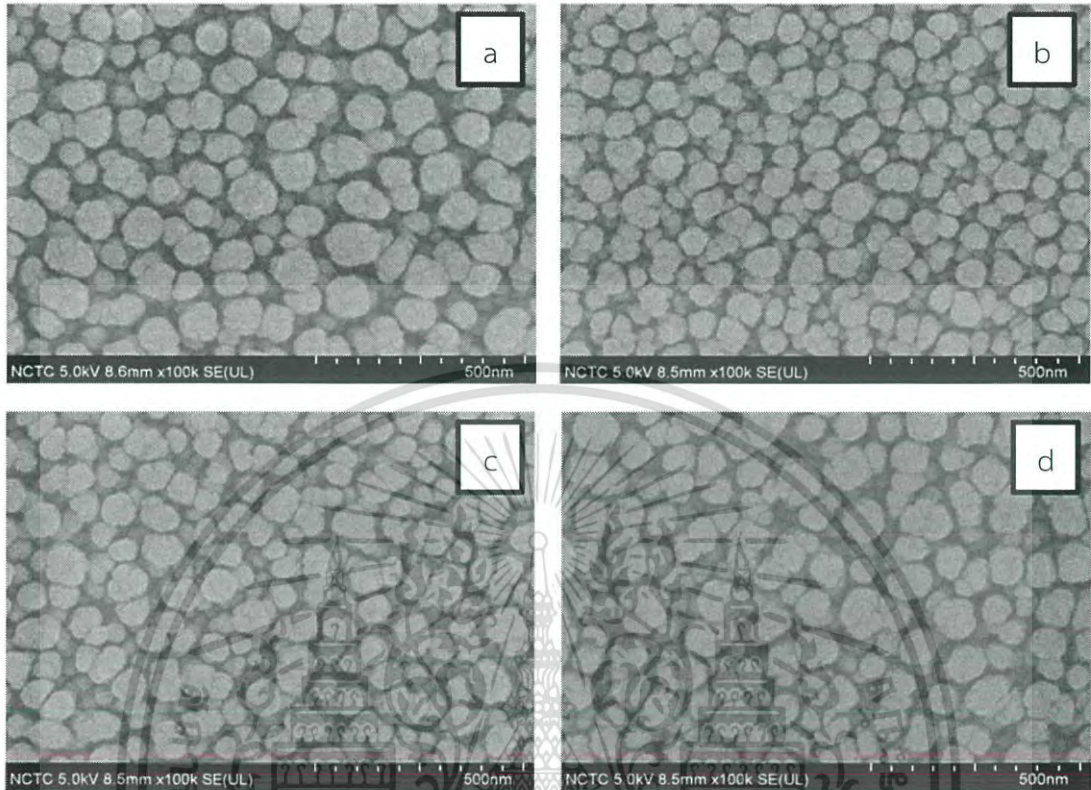
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 ภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์ม ความหนา 500 nm หลังการอบในสุญญากาศอากาศ a) 100 องศาเซลเซียส ความหนา 228.14 nm b) 200 องศาเซลเซียส ความหนา 208.39 nm c) 300 องศาเซลเซียส ความหนา 191.05 nm d) 400 องศาเซลเซียส ความหนา 177.26 nm e) 500 องศาเซลเซียส ความหนา 186.35 nm

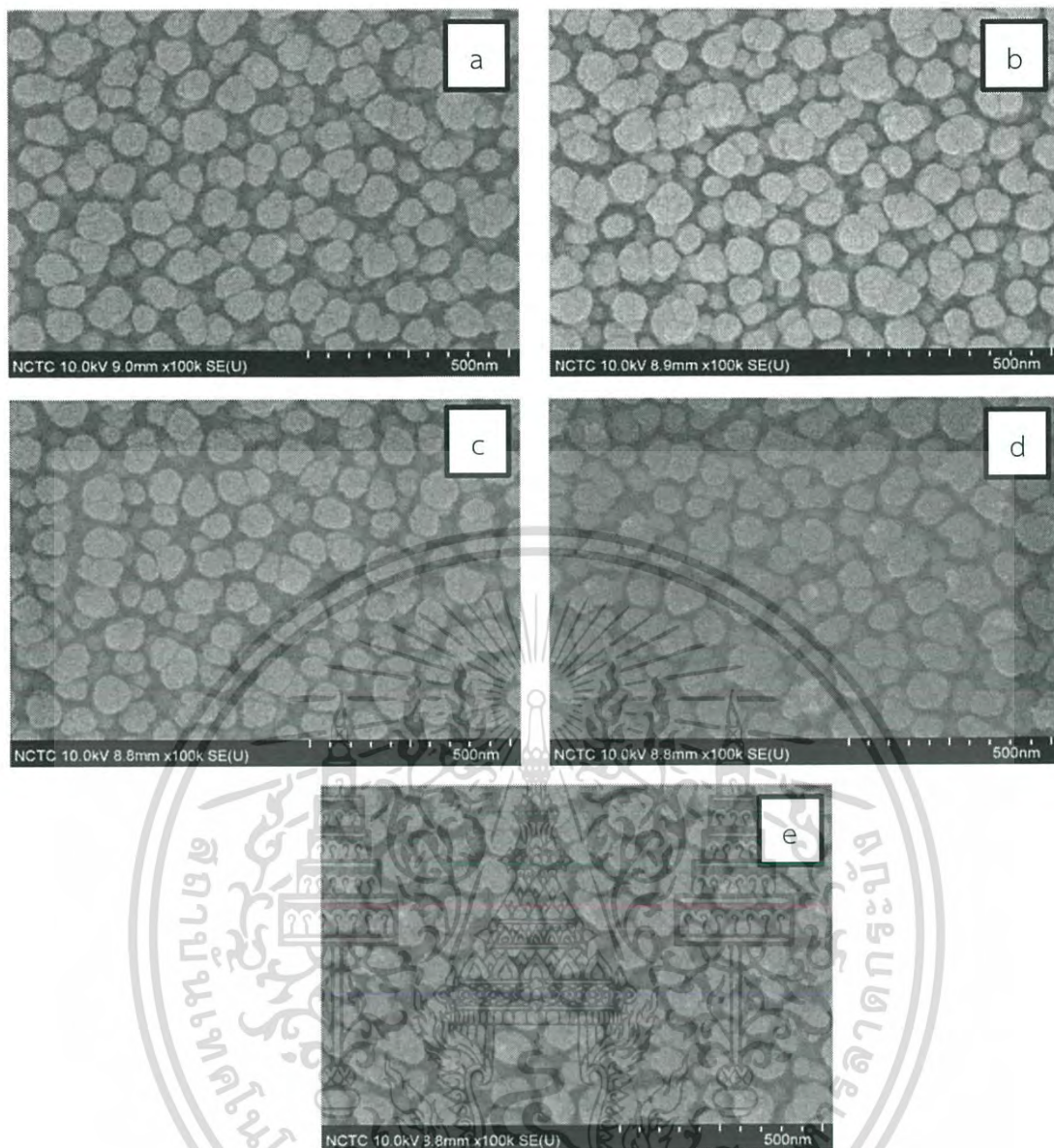
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงผลของภาพพื้นผิวที่ความหนา 500 nm ก่อนการอบและหลังจากผ่านกระบวนการอบอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.14-4.16



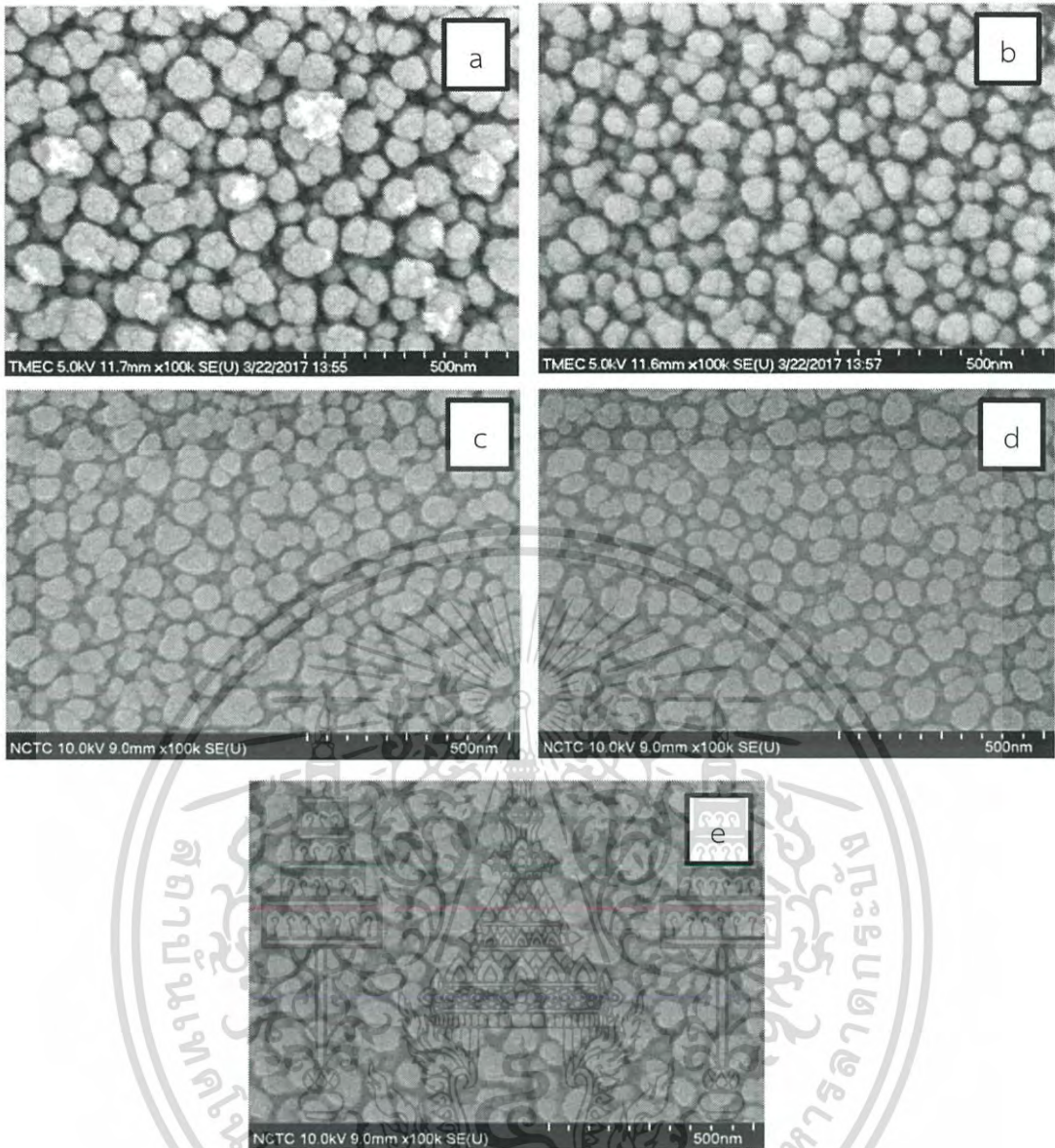
รูปที่ 4.14 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์มความหนา 500 nm ก่อนการอบ a) ครั้งที่ 1 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 86.03 nm b) ครั้งที่ 2 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 73.84 nm c) ครั้งที่ 3 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 75.72 nm d) ครั้งที่ 4 ที่เคลือบฟิล์มเส้นผ่านศูนย์กลาง 80.04 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์มความหนา 500nm หลังการอบในอากาศ a) 100 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 73.41 nm b) 200 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 74.08 nm c) 300 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 71.34 nm d) 400 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 73.70 nm e) 500 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 72.23 nm

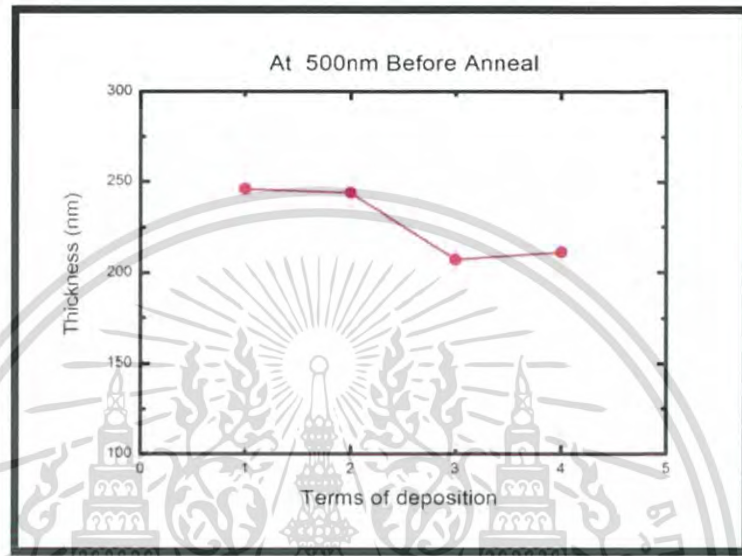
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



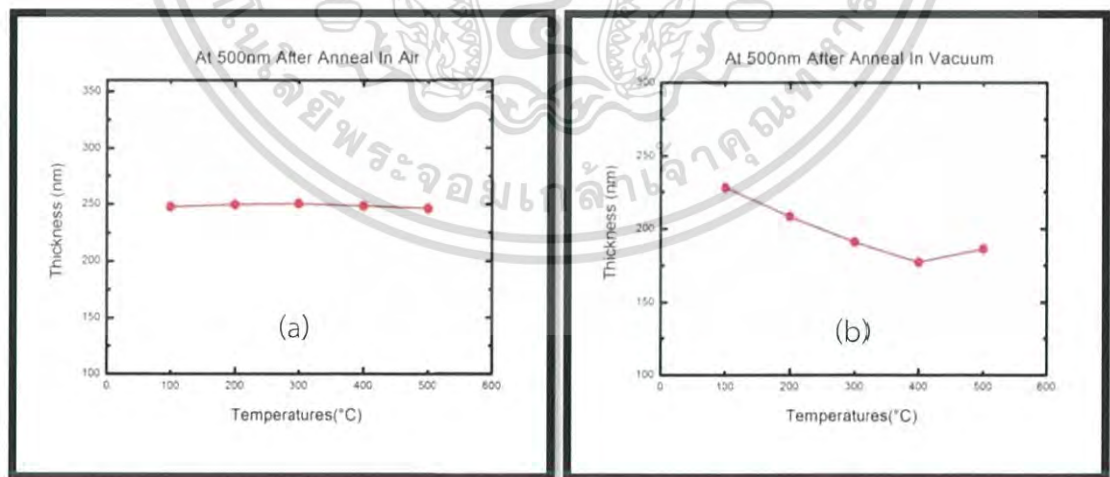
รูปที่ 4.16 ภาพพื้นผิวจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของแท่งนาโน ITO พิล์ม ความหนา 500 nm หลังการการอบในสุญญากาศ a) 100 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 76.06 nm b) 200 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 69.70 nm c) 300 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 63.6 nm d) 400 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 63.9 nm e) 500 องศาเซลเซียส เส้นผ่านศูนย์กลาง 70.06 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากภาพตัดขวางและภาพพื้นผิวที่ได้ด้วยการวิเคราะห์โดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องจะนำมาพล็อตเป็นกราฟที่แสดงถึงความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนที่ความหนา 500 nm ก่อนการอบและหลังอบดังรูปที่ 4.17-4.20 ซึ่งพบว่าความหนาเริ่มต้นของการเคลือบฟิล์มในครั้งที่ 3 มีค่าลดลงเป็นอย่างมากเนื่องมาจากความคลาดเคลื่อนจากตัวตรวจวัดการระเหยของสารจึงส่งผลต่อการควบคุมอัตราเคลือบทำให้หลังอบมีความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางที่แตกต่างกัน

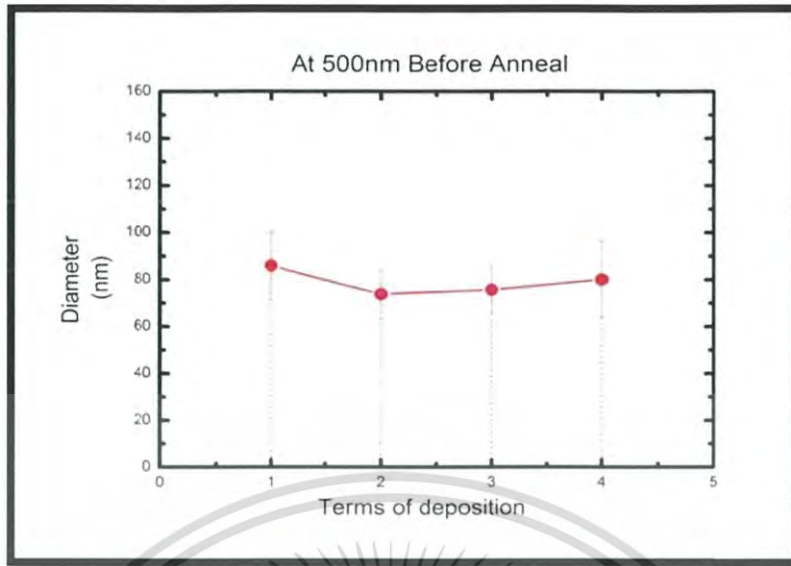


รูปที่ 4.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่ความหนา 500 nm ก่อนการอบ

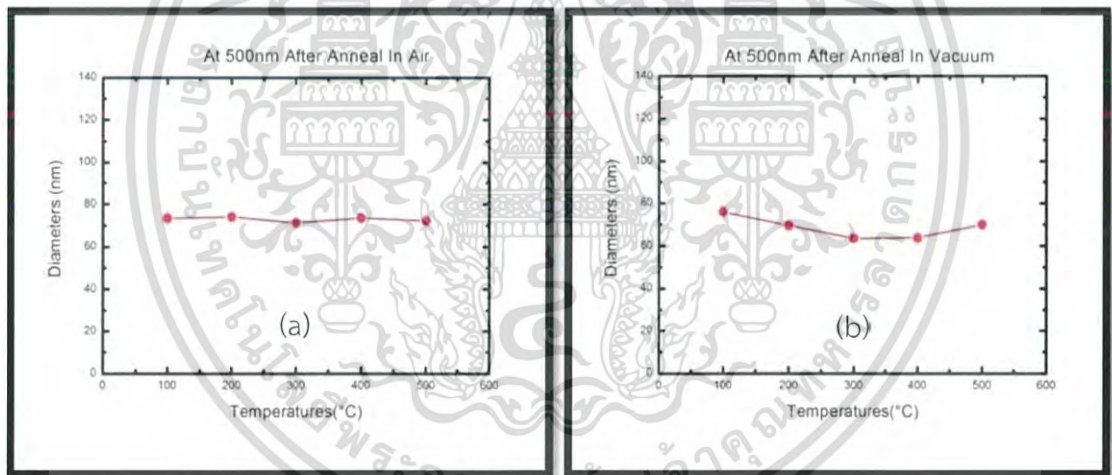


รูปที่ 4.18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความหนาของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับอุณหภูมิที่ความหนา 100 nm a) หลังการอบในอากาศ b) หลังการอบในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มที่มีความหนา 500 nm ก่อนการอบ

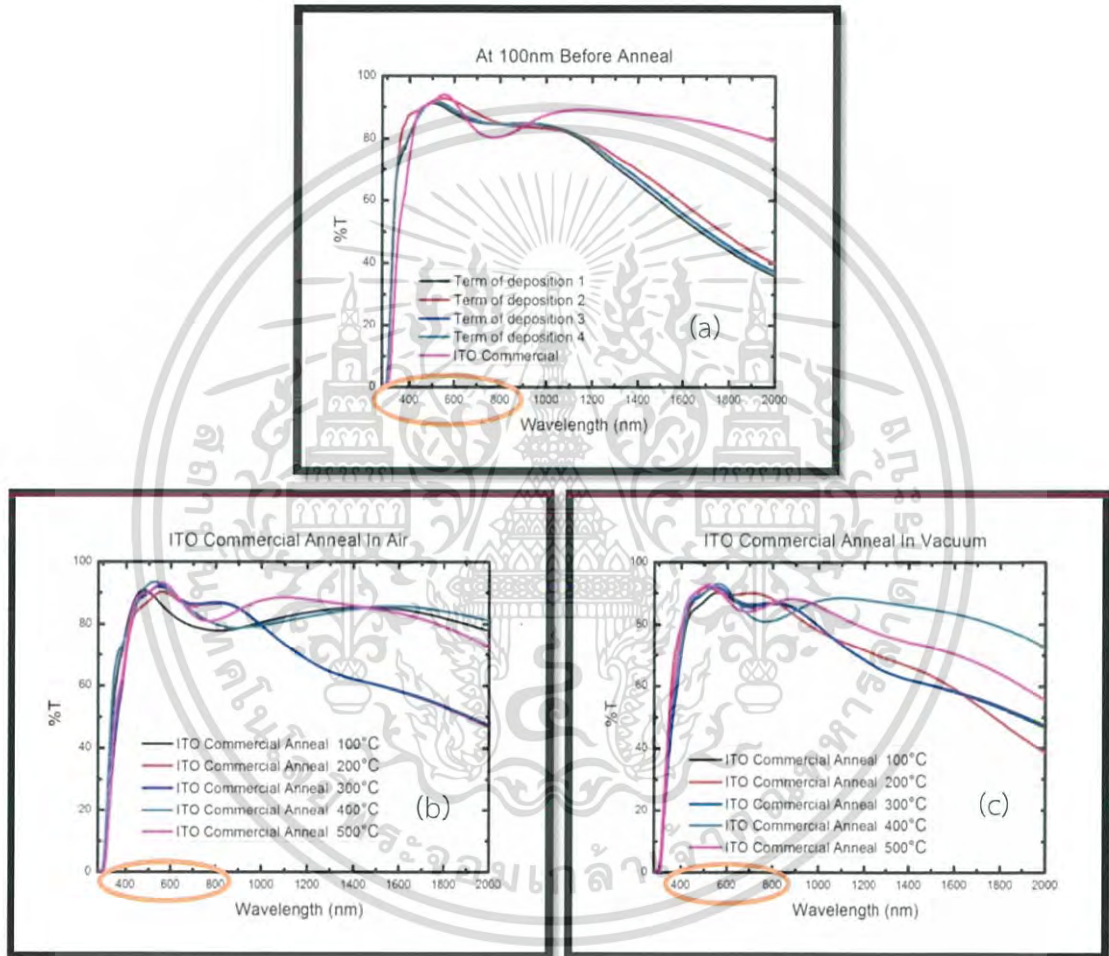


รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับอุณหภูมิที่มีความหนา 500 nm a) หลังการอบในอากาศ b) หลังการอบในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

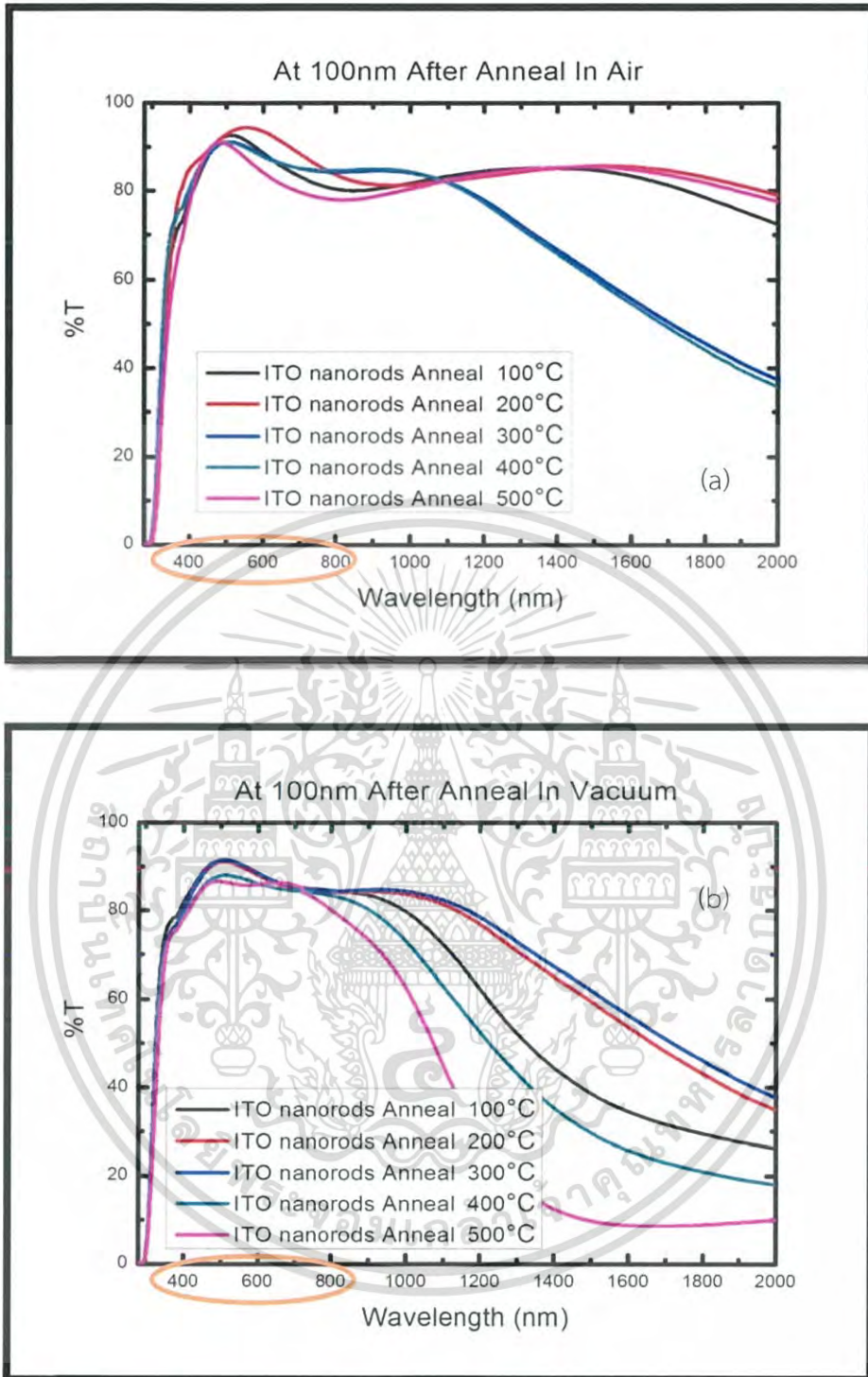
4.2 วิเคราะห์คุณสมบัติการส่งผ่านแสงบนแท่งนาโน ITO พิล์มก่อนและหลังอบ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางแสงจะถูกวิเคราะห์ด้วยสเปกโตรโฟโตมิเตอร์โดยจะศึกษาแสงที่ผ่านชั้นฟิล์มที่เป็นแท่งนาโนที่มีความหนา 100 nm และ 500 nm ก่อนการอบและหลังการอบภายใต้สภาวะที่มีอากาศกับสุญญากาศ ซึ่งแต่ละความหนาก็มีอัตราการส่งผ่านแสงและการตอบสนองต่อแสงที่ต่างกันเนื่องจากเมื่อความหนาต่างกันแล้วชั้นฟิล์มที่เป็นแท่งนาโนมีขนาดไม่เท่ากัน อีกทั้งผลของปริมาณพาหะและโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงเมื่อแท่งนาโนฟิล์มถูกนำไปอบดังนั้นจะส่งผลต่อการดูดกลืนและสะท้อนของแสง แสดงกราฟความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

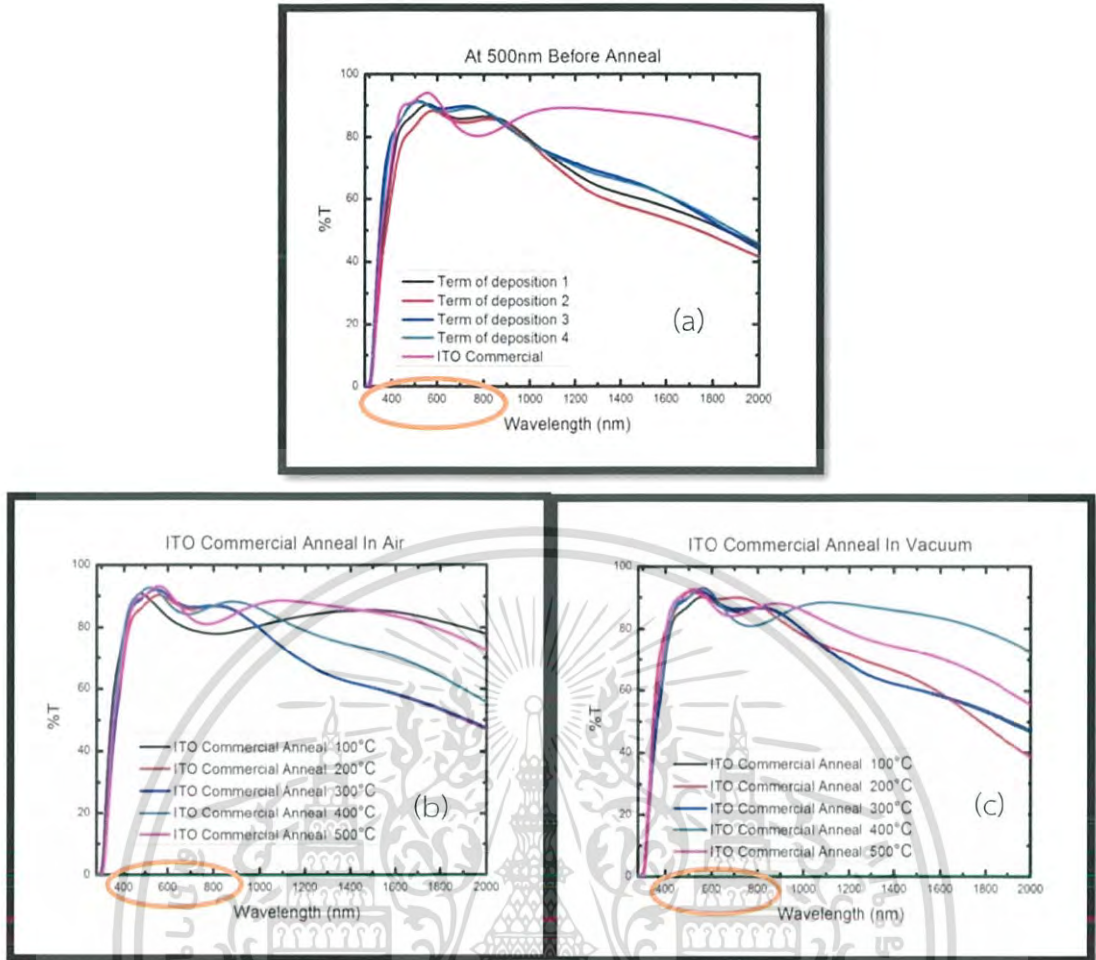


รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่งผ่านแสงกับความยาวคลื่น a) แท่งนาโน ITO พิล์มความหนา 100 nm ก่อนอบ b) ITO พิล์มอบในอากาศ c) ITO พิล์มอบในสุญญากาศ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

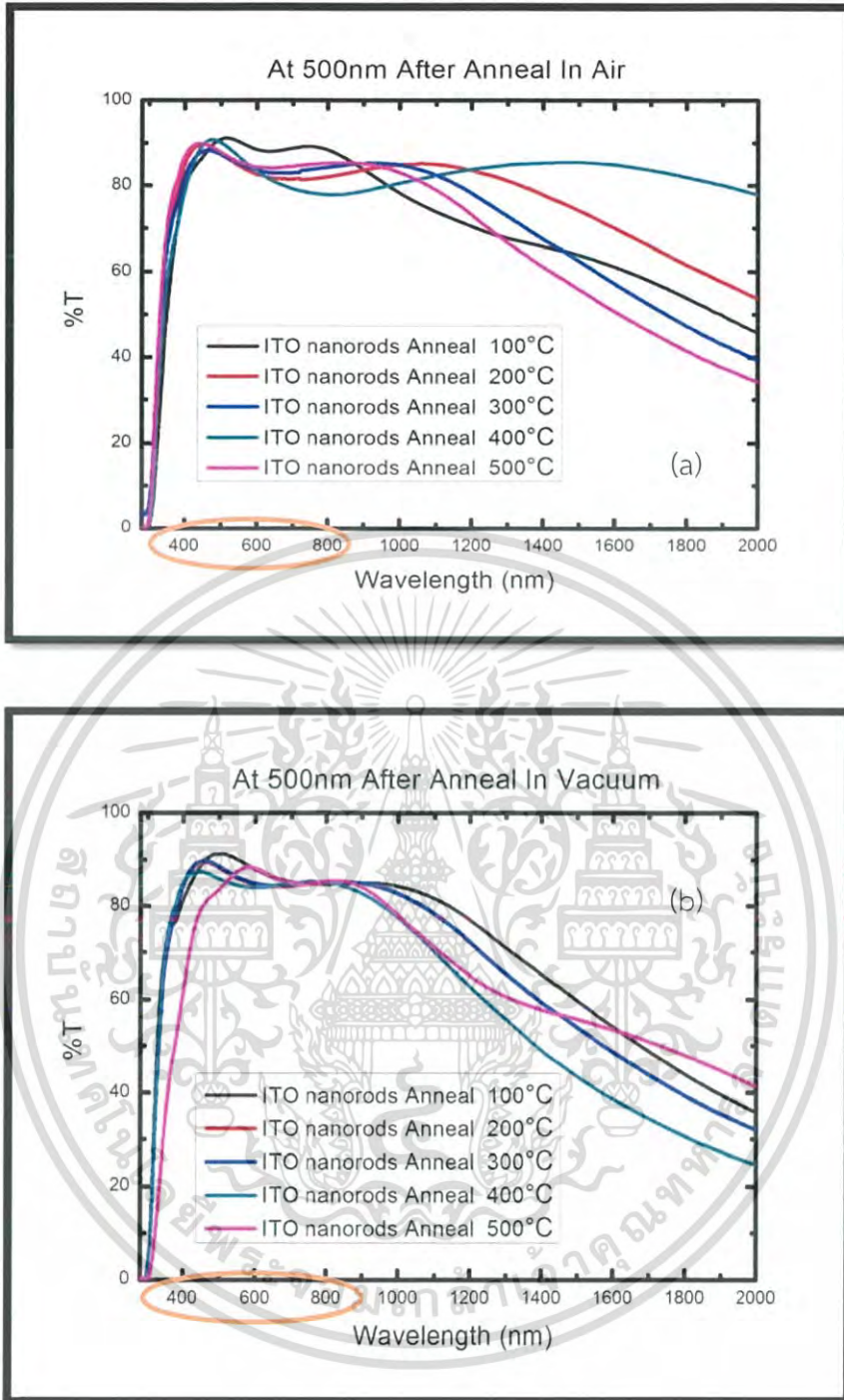


รูปที่ 4.22 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความยาวคลื่น a) แท่งนาโน ITO ฟิล์มความหนา 100 nm อบในอากาศ b) ITO ฟิล์มความหนา 100 nm อบในสุญญากาศ ซึ่งพบว่าช่วงที่แสงผ่านได้ดีสำหรับแท่งนาโนฟิล์มอุณหภูมิอยู่ที่ 100 องศาเซลเซียส สำหรับในอากาศ และ 100-300 องศาเซลเซียส สำหรับสุญญากาศ ในขณะที่ ITO ฟิล์มจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300-500 องศาเซลเซียส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความยาวคลื่น a) แท่งนาโน ITO-ฟิล์มความหนา 500 nm ก่อนอบ b) ITO-ฟิล์มอบในอากาศ c) ITO-ฟิล์มอบในสุญญากาศ

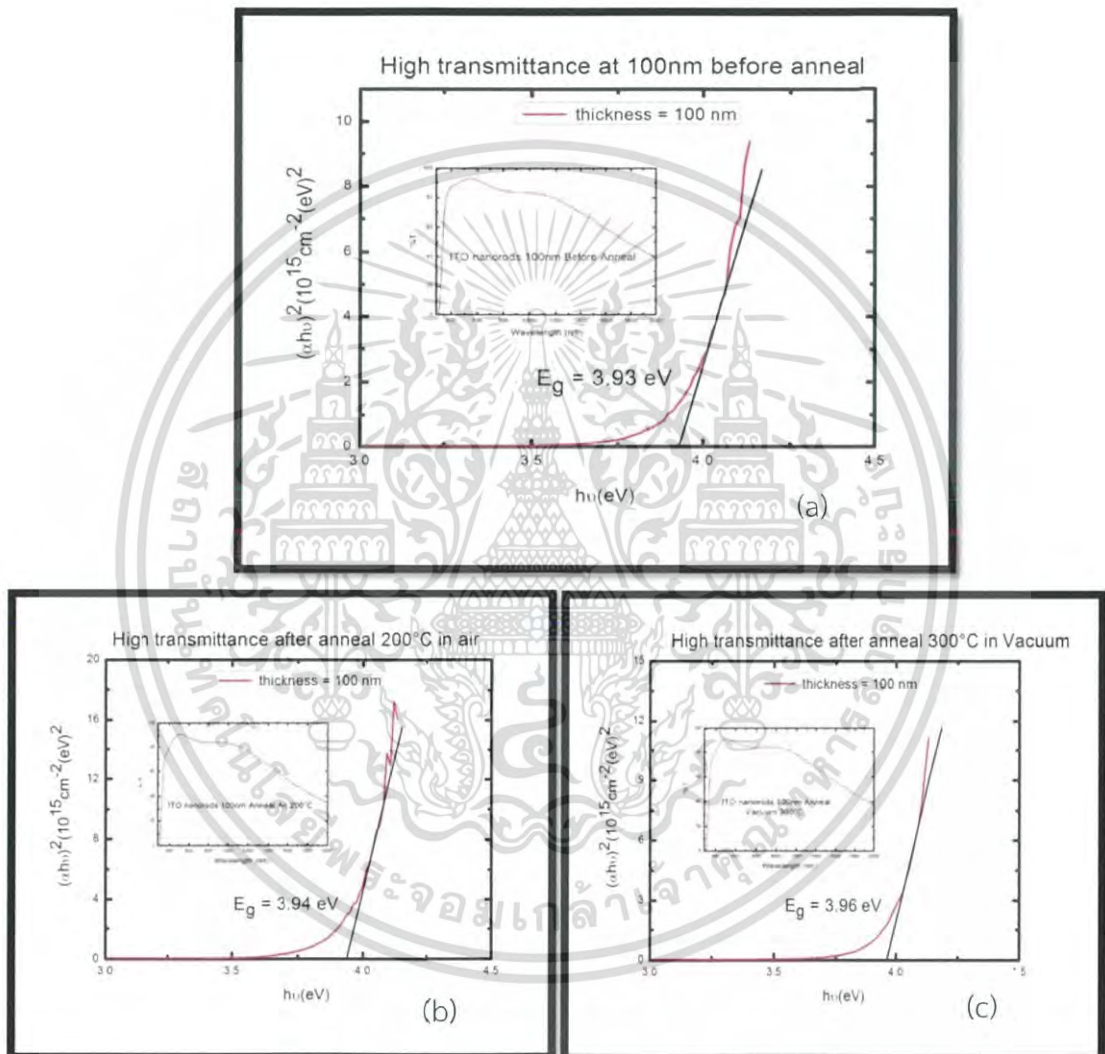
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การส่องผ่านแสงกับความยาวคลื่น a) แท่งนาโน ITO พิล์มความหนา 500 nm ออบในอากาศ b) ITO พิล์มความหนา 500 nm ออบในสุญญากาศ ซึ่งพบว่าช่วงที่แสงผ่านได้ดีสำหรับแท่งนาโนฟิล์มอุณหภูมิตั้งอยู่ที่ 100-200 องศาเซลเซียส สำหรับในอากาศ และ 100-300 องศาเซลเซียส สำหรับสุญญากาศ ในขณะที่ ITO พิล์มจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 300-500 องศาเซลเซียส

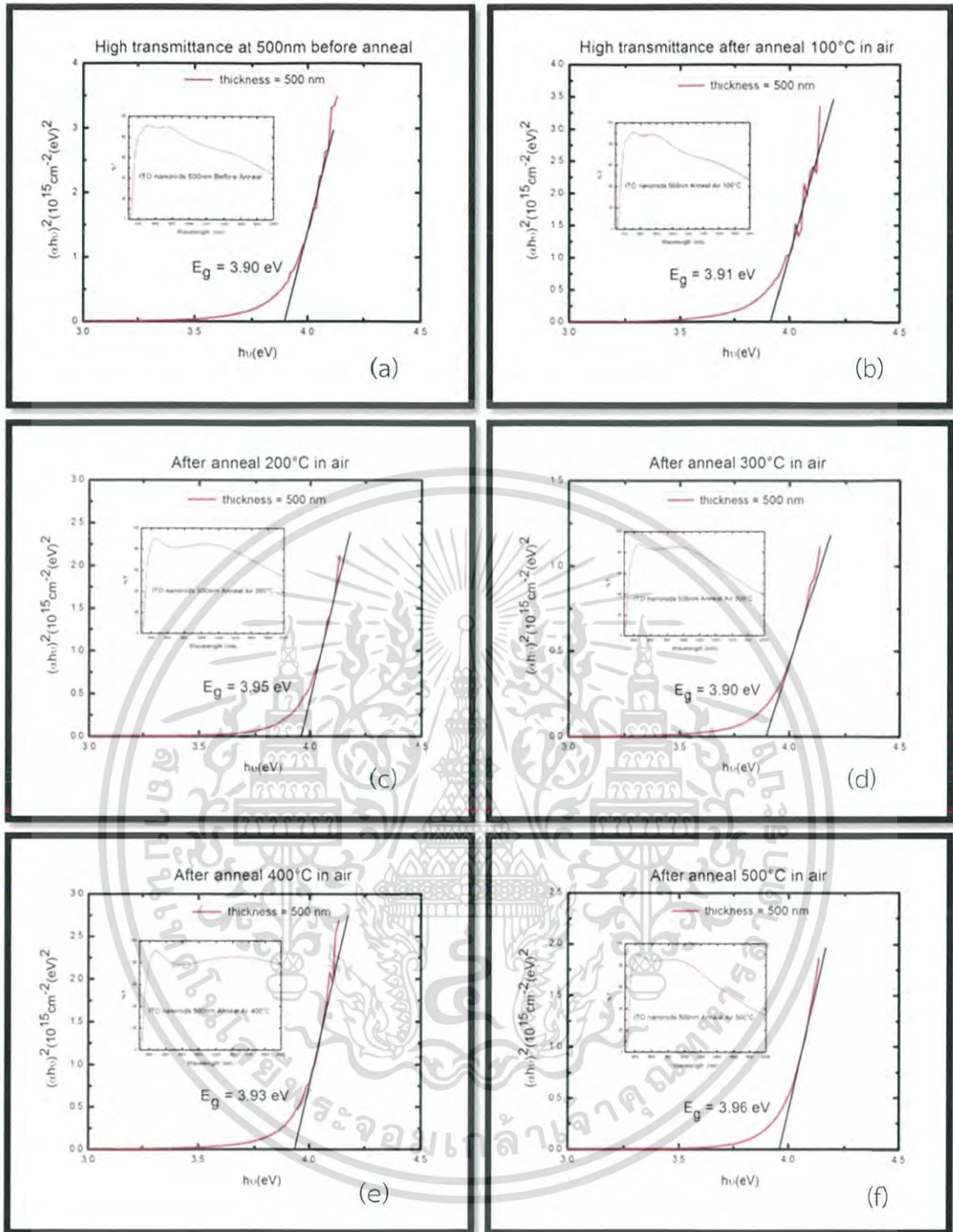
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากผลการส่องผ่านทางแสงสามารถนำช่วงความยาวคลื่นมาคำนวณหาช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) ซึ่ง ITO มีช่องว่างแถบพลังงานระหว่าง 3.5 ถึง 4.3 eV โดยเลือกช่วงความยาวคลื่นสำหรับหาช่องว่างแถบพลังงานตั้งแต่ 300-1000 nm และ แท่งนาโน ITO พิล์มที่การส่องผ่านแสงสูงที่สุดสำหรับความหนา 100 nm ส่วนที่ความหนา 500 nm จะแสดงผลเพิ่มเติมตั้งแต่ก่อนอบและหลังอบ 100-500 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่ความหนาสูงๆจะเห็นการเปลี่ยนแปลงได้ชัดเจนและเพื่อให้สอดคล้องกับผลเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์แสดงดังรูปที่ 4.25-4.26

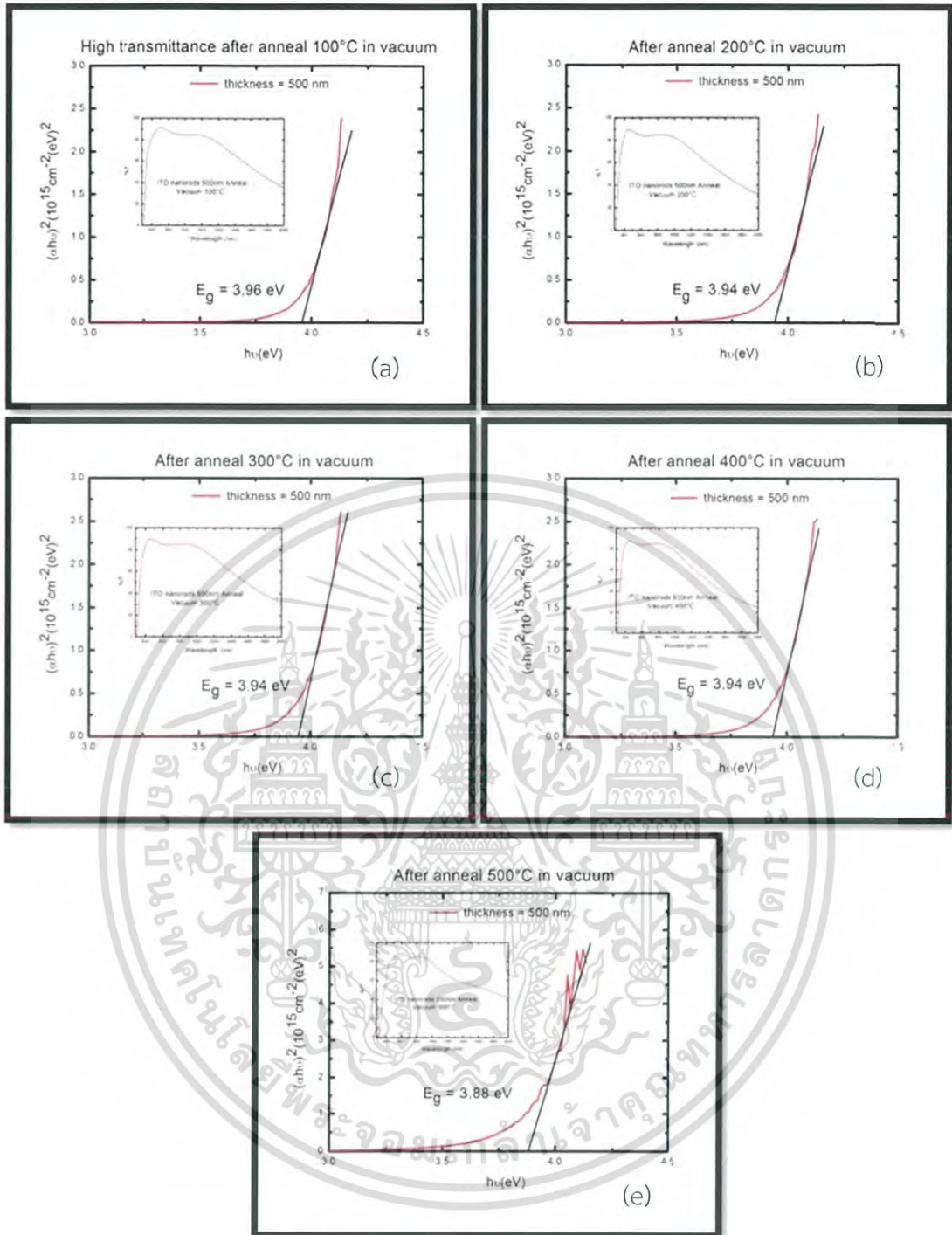


รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง αE กับ E a) แท่งนาโน ITO พิล์ม ความหนา 100 nm ก่อนอบมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.93 eV b) แท่งนาโน ITO พิล์มอบในอากาศ อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.94 eV c) แท่งนาโน ITO พิล์มอบในสุญญากาศอุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.96 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง αE กับ E a) ความหนา 500 nm ก่อนอบมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.90 eV b) แ่งนาโน ITO ฟิล์มอบในอากาศอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.91 eV c) อบในอากาศ 200 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.95 eV d) อบในอากาศ 300 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.90 eV e) อบในอากาศ 400 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.93 eV f) อบในอากาศ 500 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.96 eV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

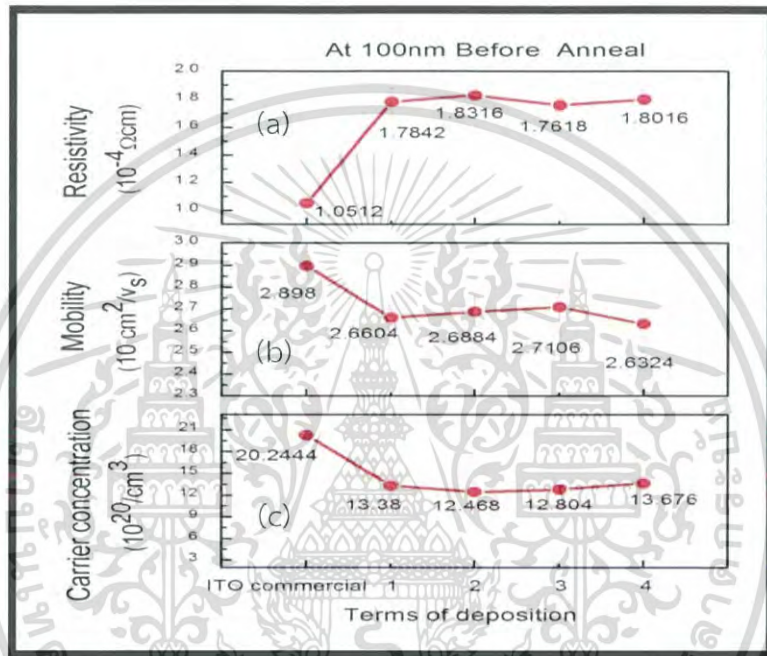


รูปที่ 4.27 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง αE กับ E a) อบในสุญญากาศ 100 องศาเซลเซียสมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.96 eV b) แท่งนาโน ITO ฟิล์มอบในสุญญากาศอุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.94 eV c) อบในสุญญากาศ 300 องศาเซลเซียสมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.94 eV d) อบในสุญญากาศ 400 องศาเซลเซียสมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.94 eV e) อบในสุญญากาศ 500 องศาเซลเซียส มีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 3.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

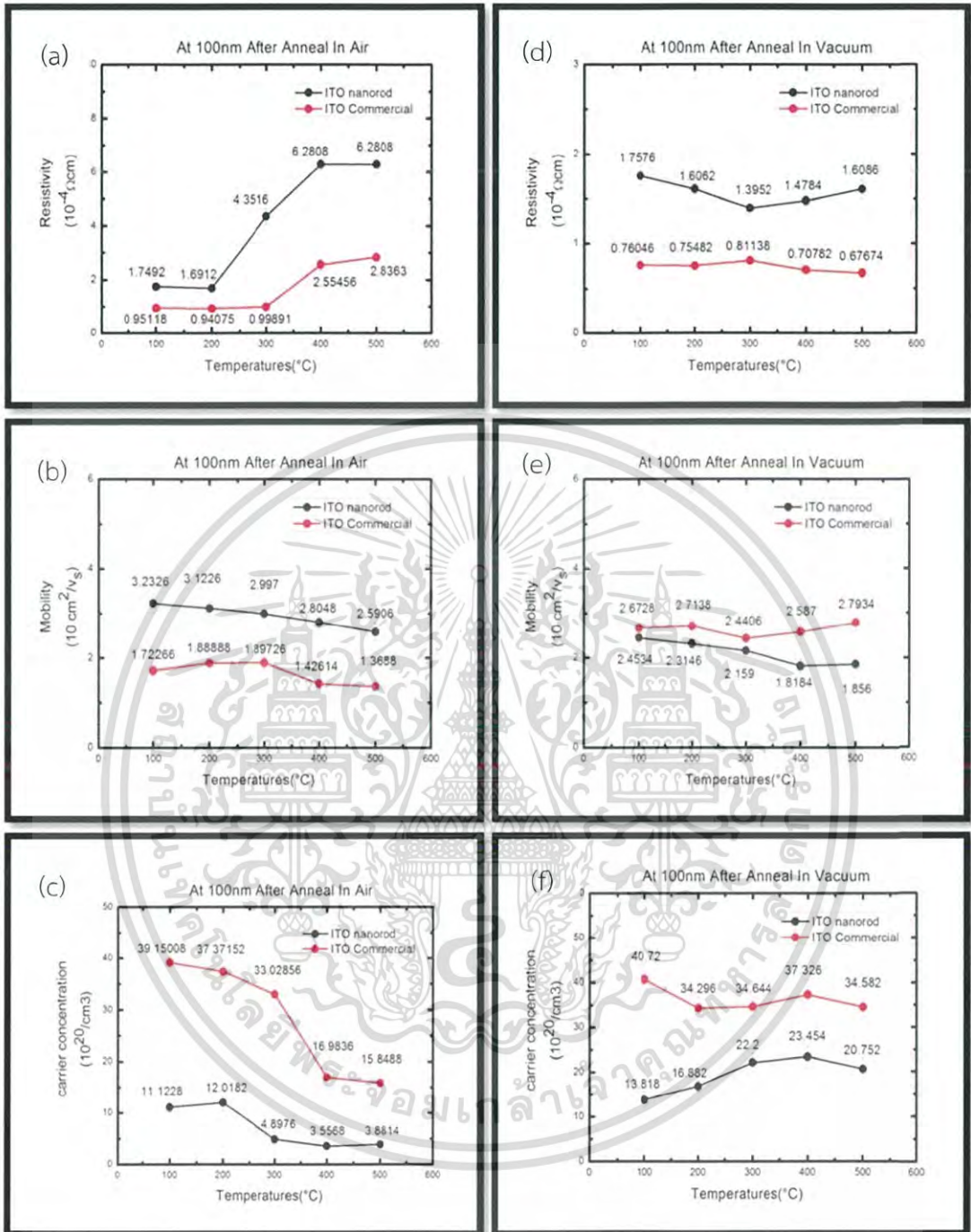
4.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติไฟฟ้าของแท่งนาโน ITO พิล์มก่อนและหลังการอบ

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของแท่งนาโน ITO พิล์มโดยจะแบ่งการวิเคราะห์ออกเป็นผลของความต้านทานเชิงแผ่นและผลของสภาพความต้านทาน สภาพคล่อง ปริมาณพาหะนำไฟฟ้าซึ่งทั้ง 4 ค่าจะมีความสัมพันธ์ขึ้นกับการชนกันของพาหะ ระยะทางในการเคลื่อนที่ของพาหะที่เพิ่มขึ้น และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีบนชั้นฟิล์มซึ่งจะวิเคราะห์ผลที่ความหนา 100 nm 500 nm ก่อนและหลังการอบโดยที่แต่ละความหนาจะเปรียบเทียบกับฟิล์ม ITO พิล์มเพื่อดูแนวโน้มการเพิ่มขึ้นหลังจากที่ฟิล์มฟอร์มตัวเป็นแท่งนาโน กราฟความสัมพันธ์ของผลทางไฟฟ้าแสดงดัง รูปที่ 4.26-4.33



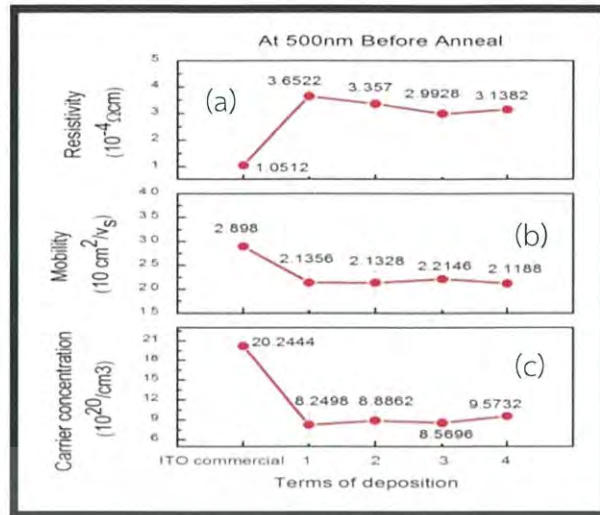
รูปที่ 4.28 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) สภาพความต้านทาน b) สภาพคล่อง c) ปริมาณพาหะนำไฟฟ้าของแท่งนาโน ITO พิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่มีความหนา 100 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

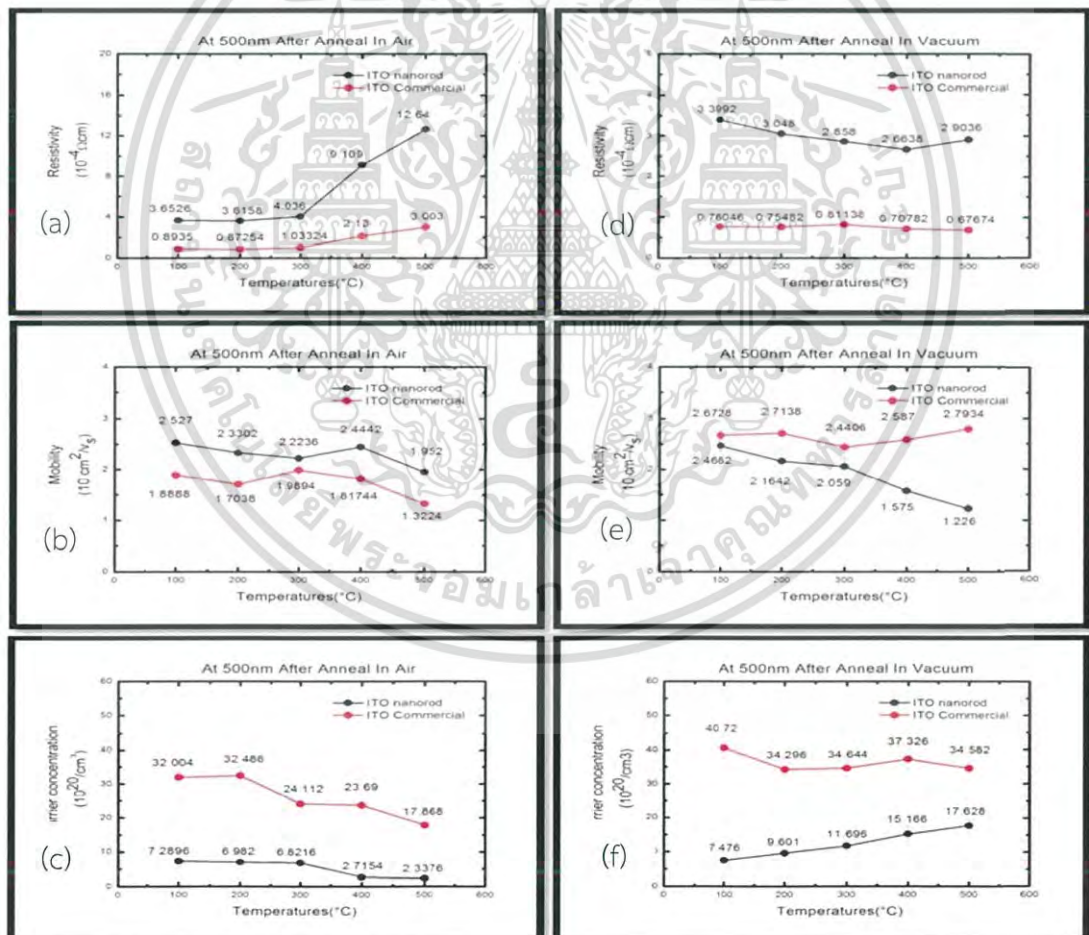


รูปที่ 4.29 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) สภาพความต้านทานอบในอากาศ b) สภาพคล่องอบในอากาศ c) ปริมาณพาหะนำไฟฟ้าอบในอากาศ d) สภาพความต้านทานอบในสุญญากาศ e) สภาพคล่องอบในสุญญากาศ f) ปริมาณพาหะนำไฟฟ้าอบในสุญญากาศของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับอุณหภูมิที่ความหนา 100 nm ซึ่งแต่ละอุณหภูมิความหนาจะต่างกันเล็กน้อย โดยวัดค่าผ่านกระจกที่เป็นแท่งนาโนฟิล์มเฉลี่ย 5 ครั้งต่อหนึ่งอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

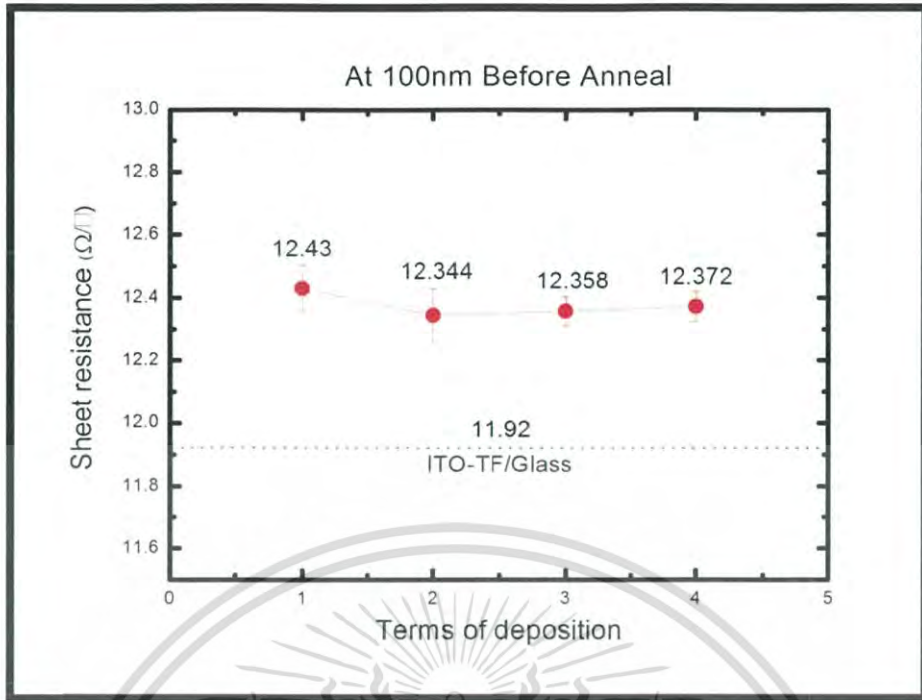


รูปที่ 4.30 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) สภาพความต้านทาน b) สภาพคล่อง c) ปริมาณพาหะนำไฟฟ้า ของแท่งนาโน ITO ฟิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่มีความหนา 500 nm

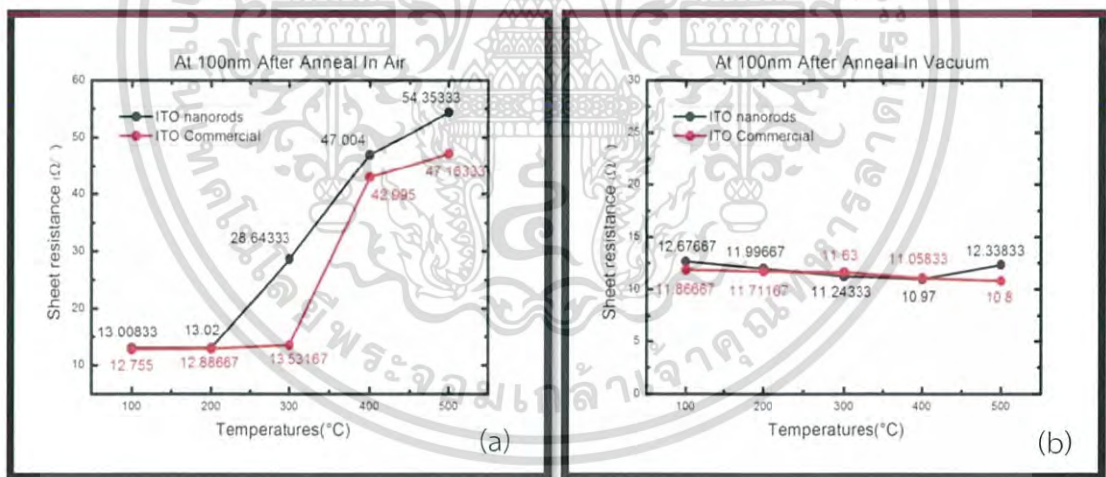


รูปที่ 4.31 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) สภาพความต้านทานอบในอากาศ b) สภาพคล่อง c) ปริมาณพาหะนำไฟฟ้า d) สภาพความต้านทานอบในสุญญากาศ e) สภาพคล่อง f) ปริมาณพาหะนำไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ปริมาณพาหะนำไฟฟ้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

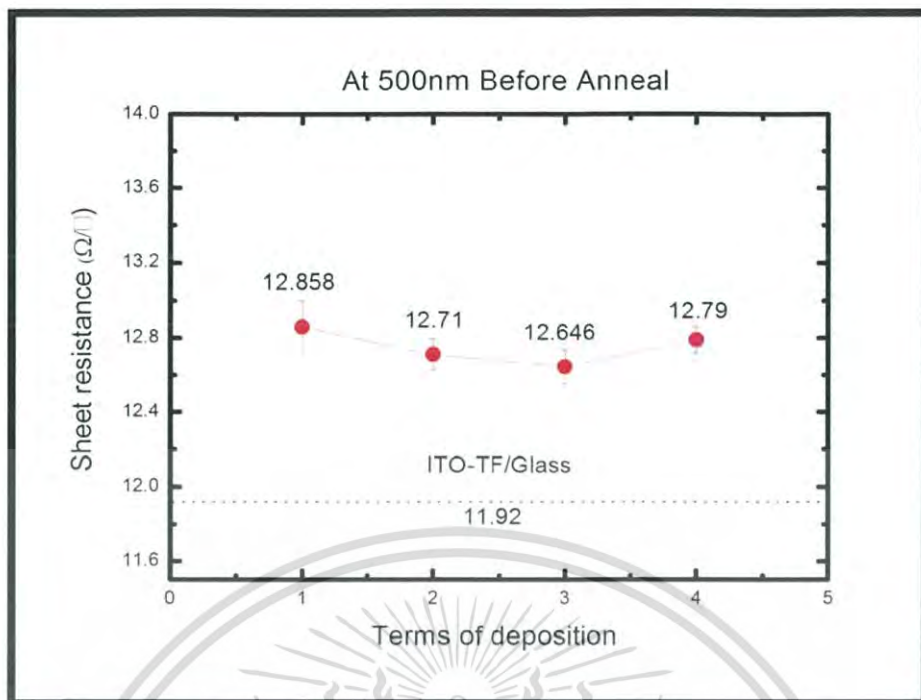


รูปที่ 4.32 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของแท่งนาโน ITO พิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่มีความหนา 100 nm

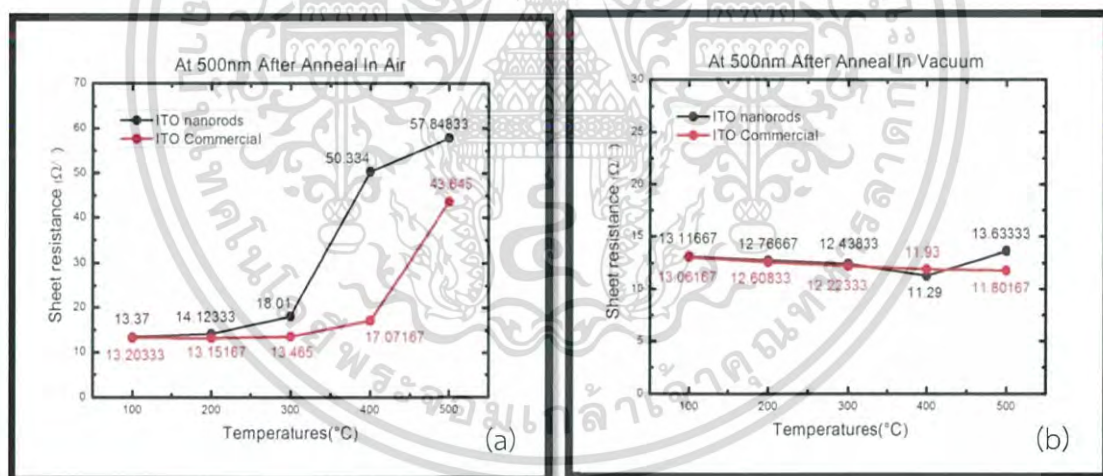


รูปที่ 4.33 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) ความต้านทานเชิงแผ่นอบในอากาศ b) ความต้านทานเชิงแผ่นอบในสุญญากาศของแท่งนาโน ITO พิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่มีความหนา 100 nm โดยวัดค่าผ่านกระจกที่เป็นแท่งนาโนฟิล์มขนาด 2x2 เซนติเมตรเฉลี่ย 5 ครั้งต่อหนึ่งอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.34 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความต้านทานเชิงแผ่นของแท่งนาโน ITO พิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่มีความหนา 500 nm



รูปที่ 4.35 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง a) ความต้านทานเชิงแผ่นอบในอากาศ b) ความต้านทานเชิงแผ่นอบในสุญญากาศ ของแท่งนาโน ITO พิล์มกับจำนวนครั้งที่เคลือบฟิล์มที่มีความหนา 500 nm โดยวัดค่าผ่านกระจกที่เป็นแท่งนาโนฟิล์มขนาด 2x2 เซนติเมตร เฉลี่ย 5 ครั้งต่อหนึ่งอุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

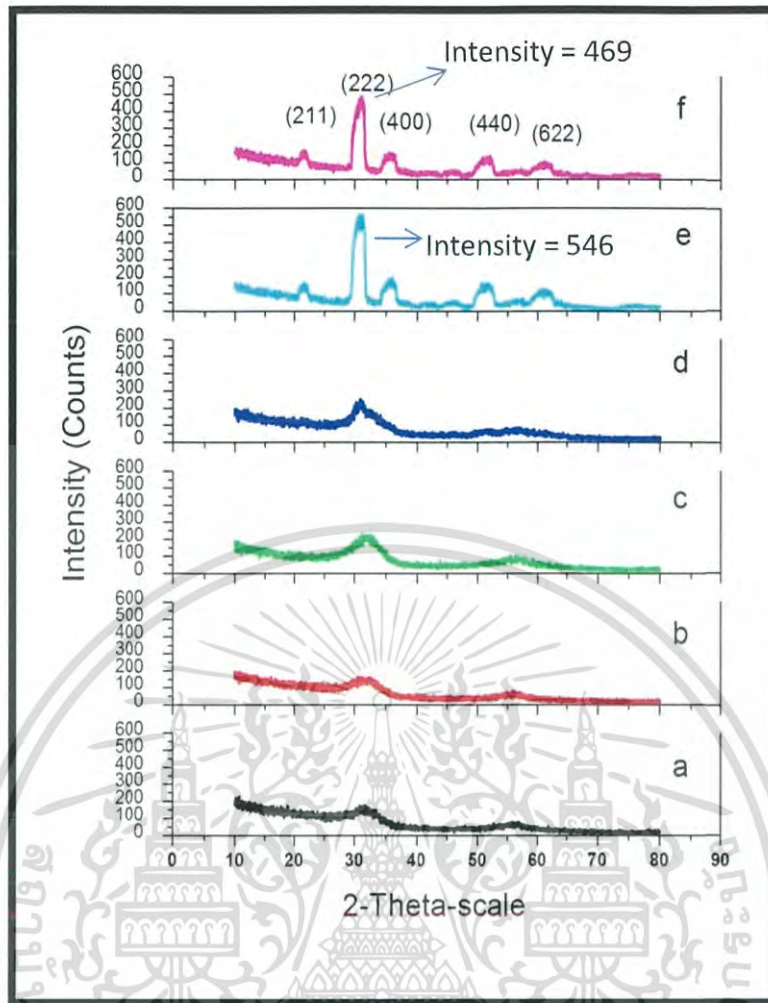
จากผลทางไฟฟ้าของแท่งนาโนฟิล์มหลังอบเมื่อเทียบกับแท่งนาโนที่ยังไม่ผ่านกระบวนการอบพบว่าความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้สภาพคล่องของแท่งนาโนฟิล์มนั้นต่ำลง เพราะอิเล็กตรอนต้องใช้ระยะทางเพิ่มขึ้นในขณะที่เคลื่อนที่ผ่านแท่งนาโนแต่ละแท่งบนชั้นฟิล์ม ส่วนปริมาณพาหะนำไฟฟ้า สภาพต้านทานและความต้านทานเชิงแผ่นถ้าเป็นการอบในอากาศพบว่าแท่งนาโนฟิล์มจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากในช่วงอุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส โดยมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากในอากาศมีอนุภาคของ ออกซิเจน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาขึ้นกับชั้นฟิล์มและปัจจัยจากการหลอมหลวมของแท่งนาโนเมื่ออุณหภูมิสูง สำหรับ ITO ฟิล์มมีแนวโน้มที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยแต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 500 องศาเซลเซียส การนำไฟฟ้าจะลดต่ำลงอย่างมาก ทำให้สภาพคล่องกับปริมาณพาหะนำไฟฟ้าลดลง

ในการเปรียบเทียบหลังกระบวนการอบในสุญญากาศและที่มีอากาศพบว่าสุญญากาศจะเปลี่ยนแปลงผลการนำไฟฟ้าเพียงเล็กน้อยเพราะเมื่ออยู่ในสภาวะนี้แล้วโอกาสที่จะเกิดการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซในสิ่งแวดล้อมกับฟิล์มมีน้อยลงรวมถึงสิ่งเจือปนต่างๆที่มากับอากาศ

4.4 การวิเคราะห์ความเป็นผลึกของแท่งนาโน ITO ฟิล์มก่อนและหลังการอบ

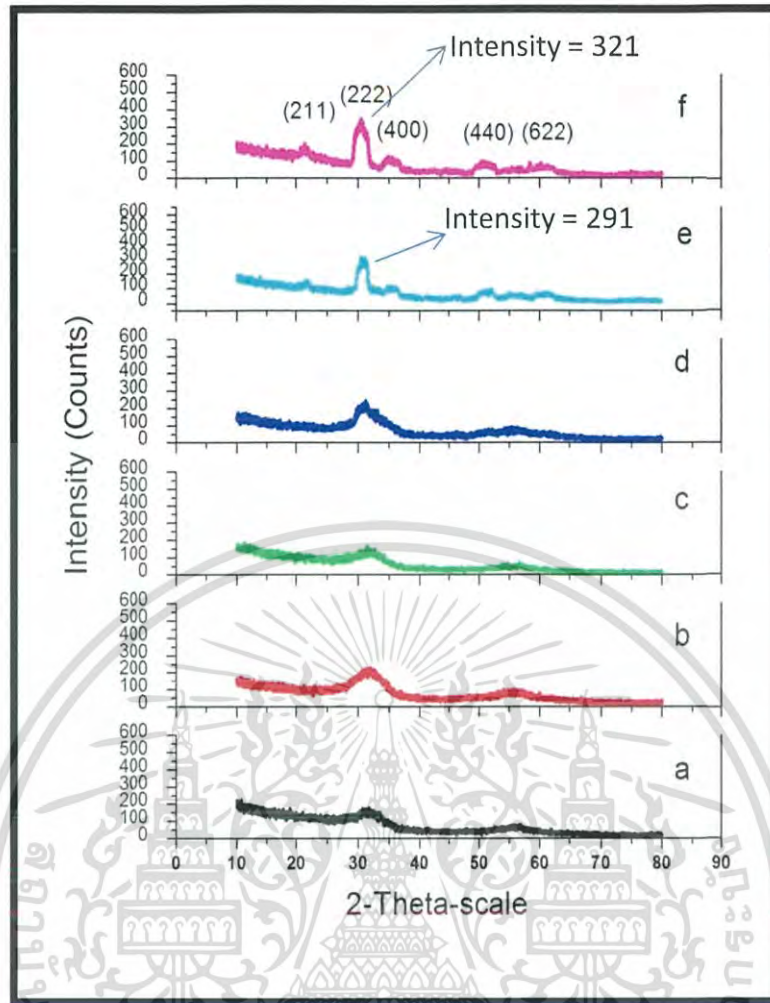
จากการวิเคราะห์ความเป็นผลึกด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์โดยใช้โหมดการวัดเป็น Grazing Incidence มุม 1 องศา คือการวัดโดยยิงรังสีเอกซ์ให้บริเวณชั้นของฟิล์มเท่านั้นเพื่อตรวจสอบโครงสร้างเฉพาะบริเวณฟิล์มบางดังนั้นผลที่ได้จะไม่แสดงพีคของซิลิกอน ในช่วงที่ยังไม่ผ่านการอบและหลังอบที่ 100-300 องศาเซลเซียส ภายใต้สภาวะที่มีอากาศและสุญญากาศจะมีการจัดเรียงตัวของผลึกที่ไร้ระเบียบทำให้มีรูปร่างที่ไม่แน่นอน ในขณะที่อุณหภูมิ 400-500 องศาเซลเซียส มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบของอนุภาคมากขึ้นทำให้แสดงคุณสมบัติความเป็นผลึกโดยกราฟจะมีลักษณะเป็นพีคขึ้นมาซึ่งแต่ละพีคจะเป็นการบ่งบอกว่าระนาบนั้นๆมีการจัดเรียงตัวเป็นผลึกมากน้อยแค่ไหน และเมื่อเปรียบเทียบ 2 สภาวะพบว่าภายใต้สภาวะที่มีอากาศจะมีความเป็นผลึกที่สูงกว่า แสดงดังรูปที่ 4.34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.36 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมมองของการเลี้ยวเบน a) ก่อนการอบ b) อบในอากาศอุณหภูมิต่ำ 100 องศาเซลเซียส c) อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส d) อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส e) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส f) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.37 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์กับมุมของการเลี้ยวเบน a) ก่อนการอบ b) อบในอากาศสูญญากาศ 100 องศาเซลเซียส c) อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส d) อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส e) อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส f) อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลงานวิจัย

จากงานวิจัยแท่งนาโนฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์ที่มีคุณสมบัติเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสง ผู้วิจัยได้ทำการเคลือบอินเดียมทินออกไซด์ลงบนซิลิกอนและกระจก ITO เพื่อให้เกิดเป็นแท่งนาโนขึ้นที่ความหนา 100 nm และ 500 nm ด้วยวิธีการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค glancing-angle พบว่าปัจจัยที่ทำให้เกิดเป็นแท่งนาโนประกอบไปด้วย มุมที่ใช้หมุนฐานรอง ความเร็วในการหมุน อุณหภูมิ ส่วนในด้านความหนาที่การเคลือบแต่ละครั้งจะได้ความหนาไม่เท่ากันเกิดจากผลของตัวตรวจวัดการระเหยของสาร การปรับกระกับแรงดันและสิ่งเจือปนภายในภาชนะสุญญากาศของเครื่อง หลังจากฟิล์มเกิดเป็นแท่งนาโนแล้วผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ผลทางโครงสร้าง การส่งผ่านแสงและคุณสมบัติทางไฟฟ้า พบว่ายิ่งความหนาของฟิล์มมากขึ้นจะทำให้ประสิทธิภาพทางไฟฟ้าและแสงลดลง

ผู้วิจัยได้นำฟิล์มไปผ่านกระบวนการอบอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ในสภาวะมีอากาศและสุญญากาศและเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการอบพบว่าที่ความหนาเดียวกันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความหนาและเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งนาโนนั้นลดลง ด้านผลของไฟฟ้าการนำไฟฟ้าลดลง สภาพคล่องลดลง สภาพต้านทานเพิ่มขึ้น ความต้านทานเชิงแผ่นสูงขึ้น

จากผลการส่งผ่านแสงจะเห็นว่าทั้งความหนา 100 nm และ 500 nm จะมีช่วงการส่งผ่านแสงที่ดีที่สุดช่วง 400-800 nm ในย่านตามองเห็นส่วนในย่าน UV (100-400nm) และ NIR (800-2500nm) เส้นกราฟมีลักษณะลดลงเพราะแสงจะถูกดูดกลืนและเกิดการสะท้อนกลับหมดในช่วงดังกล่าวและในส่วนของ ITO ฟิล์มที่ผ่านการอบจะมีแนวโน้มการส่งผ่านแสงเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในขณะที่แท่งนาโน ITO ฟิล์มจะลดลงเพราะเมื่ออุณหภูมิสูงแท่งนาโนจะเกิดการหลอมหลวมเป็นแท่งนาโนที่ใหญ่ขึ้นรวมไปถึงผลจากคุณสมบัติทางโครงสร้างของแท่งนาโนที่มีลักษณะเฉพาะ จากการคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงานพบว่าในกรณียังไม่ผ่านกระบวนการอบมีค่า 3.93 eV ที่ความหนา 100 nm กับ 3.90 eV ที่ความหนา 500 nm และเมื่อมีการอบอุณหภูมิ 100-500 องศาเซลเซียส ค่าช่องว่างแถบพลังงานแทบจะไม่มีเปลี่ยนแปลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ใช้ความหนาของฟิล์มเพียงความหนาแล้วเปรียบเทียบกับหลังอบ
2. เพิ่มระยะเวลาในการอบจาก 2 ชั่วโมงให้มากขึ้น
3. ศึกษาเทคนิคที่ทำให้เกิดแท่งนาโน ITO ฟิล์มเป็นสปีดเตอร์ริงแทนเทคนิคการระเหยด้วยลำอิเล็กตรอนแบบใช้ไอออนช่วยร่วมกับเทคนิค GLAD
4. เพิ่มความหนาของฟิล์มขึ้นเป็น 2 เท่า คือจาก 100 nm เป็น 200 nm และจาก 500 nm เป็น 1000nm เพื่อให้ได้ความหนาตามที่กำหนด
5. ควรติดตั้งระบบที่ควบคุมอัตราการเคลือบแบบอัตโนมัติเพื่อลดผลกระทบที่เกิดบนฟิล์ม
6. เทอร์โมคัปเปิลที่ใช้สำหรับขั้นตอนการอบต้องสามารถบอกอุณหภูมิให้คลาดเคลื่อนน้อยที่สุด
7. ลดระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิหลังอบเสร็จหรือมีระบบรองรับสำหรับอบในสุญญากาศซึ่งสามารถเปิดเครื่องทิ้งไว้ได้เป็นเวลานานๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] kruraviwan. 2011. ตัวกลางแสง. [Online]. Available :<https://kruraviwan.wordpress.com/2011/10/06/ตัวกลางของแสง>
- [2] โรงเรียนมหิตลวิทยาลัยนุสรณ์ งานวิจัยและห้องปฏิบัติการกลุ่มวิจัย. 2013. วัสดุเพื่อการเปลี่ยนแปลง. [Online]. Available : <http://www.kmutt.ac.th/hynae/วัสดุเพื่อการแปลง>
- [3] อินเดียม. [Online]. Available : <https://th.wikipedia.org/wiki/อินเดียม>
- [4] National University of Singapore. [Online]. Available : <http://scholarbank.nus.edu.sg/bitstream/handle/>
- [5] Thomas Wright. The Semiconductor in Equilibrium. [Online]. Available : <http://slideplayer.com/slide/4577616/>
- [6] Clare Morrison. ENERGY BANDS & CARRIER CONCENTRATION IN THERMAL CHAPTER. [Online]. Available : <http://slideplayer.com/slide/9329940/>
- [7] Dr.Enrico Gnecco. 2008. Growth of Thin Films. [Online]. Available : <http://nanolino.unibas.ch/pdf/surfacephysics/oberflaeche9.pdf>
- [8] Zotov Andrey V.,Saranin Alexander A. thin films growth modes. [Online]. Available: <http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article1807>
- [9] Nucleation of Nb on Cu. [Online]. Available : <http://www.slideshare.net/thinfilmsworkshop/anne-marie-valente-feliciano-nucleation-of-nb-films-on-cu-substrates>
- [10] Akapong Phunpueok. ฟิสิกส์สถานะของแข็ง. [Online]. Available : <https://rmutt.academia.edu/AkapongPhunpueok>
- [11] ความหมายของวัสดุนาโน. [Online]. Available : <http://nict.sc.chula.ac.th/site/index.php/technology/terminology?showall=&start=5>
- [12] เครื่องวัดสนามแม่เหล็ก. [Online]. Available : <http://web.ku.ac.th/schoolnet/snet3/saowalak/hall/hall.htm>
- [13] PVD Coating คืออะไร. [Online]. Available : http://www.nanoshieldpvd.com/pvd_thai.html
- [14] Dr. Thipwan Fangsuwannarak. “Crystal Growth and Doping.” Electrical Engineering SUT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] AkapongPhunpueok. เทคโนโลยีของวัสดุสารกึ่งตัวนำ. [Online]. Available : http://www.academia.edu/5206499/บทที่_8_เทคโนโลยีของวัสดุสารกึ่งตัวนำ
- [16] Sputter. [Online]. Available : <https://www.weizmann.ac.il/materials/igorl/sputter>
- [17] Hydrothermal Growth and Interface Correlation of Highly Aligned ZnO Nanorods Arrays on UV-Activated Sol-Gel Transparent Conducting Films”. [Online]. Available : <http://jes.ecsdl.org/content/156/11/K200.abstract>
- [18] Scanning Electron Microscope. [Online]. Available : <http://nanofabrication.unt.edu/jeol-jsm-7001f-scanning-electron-microscope>
- [19] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ.2557. “การวัดขนาดอนุภาคนาโนด้วยเทคนิค X-Ray Diffraction.” กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [20] ศันสนีย์ รักไทยเจริญชีพ.2558. “ประโยชน์จากเอกซเรย์ดิฟแฟรคชัน (XRD) ในงานทดสอบวัสดุ ดิบและผลิตภัณฑ์.” กรมวิทยาศาสตร์บริการ.
- [21] X-ray Diffractometer (XRD). [Online]. Available : <http://science.kmutt.ac.th/sic/index.php/physics/16-x-ray-diffraction>
- [22] การเลี้ยวเบนกับกฎของแบรกกส์. [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/virtualexperiment/bragg-law/bragglaw.htm>
- [23] กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน. [Online]. Available : <http://www.li.mahidol.ac.th/media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [24] How Scanning Electron Microscopes Work. [Online]. Available : <http://science.howstuffworks.com/scanning-electron-microscope2.htm>
- [25] Electron Microscope (กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอน). [Online]. Available: http://www.electron.rmutphysics.com/sciencenews/index.php?option=com_content&task=view&id=122
- [26] การตรวจสอบคุณสมบัติในการการดูดกลืนแสงของ. [Online]. Available : [http://ebook.ram.edu/e-book/f/FY473\(51\)/FY473-8.pdf](http://ebook.ram.edu/e-book/f/FY473(51)/FY473-8.pdf)
- [27] Four point probe. [Online]. Available : http://lnfwiki.eecs.umich.edu/wiki/Four_point_probe
- [28] การวัดค่าความต้านทานด้วยวิธีเข็มวัด 4 จุด. [Online]. Available : http://www2.mtec.or.th/th/emagazine/countfavor_article.asp?a=load&fileid=324&Run_no=dlkejlhph
- [29] ปรากฏการณ์ฮอลล์และตัวรับฮอลล์. [Online]. Available : http://www.nano.kmitl.ac.th/files/course/year_2_2/92536209_Nanomaterial_Laboratory_1/2557/Nanomaterial_Lab_1_02_Hall_Effect.pdf

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งหากมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [30] ดร. ณัฐพันธ์ ศุภกา ไชปริศนา...นาโนเทคโนโลยี. [Online]. Available : <http://www.rmutphysics.com/charud/oldnews/67/index67.htm>
- [31] 2015 การอบอ่อน และ การอบปกติ. [Online]. Available : http://www.tpa.or.th/writer/read_this_book_topic.php?bookID=1818&pageid=70&read=true&count=true
- [32] การอบชุบ. [Online]. Available : <http://tonanasia.com/wordpress/techniques/technique/technical-library/บทความ-heat-treatment-การอบชุบ/>
- [33] V. Senthilkumar and P. Vickraman.2009., Annealing temperature dependent on structural, optical and electrical properties of indium oxide thin films deposited by electron beam evaporation method, Current Applied Physics, vol. 10, pp. 880-885
- [34] P. Nuchuy^a and T. Chaikere^a, 2016., Engineered omnidirectional antireflection ITO nanorod films with super hydrophobic surface via glancing-angle ion-assisted electron-beam evaporation deposition, Current Applied Physics 17, (2017) pp.222-229
- [35] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนากระบวนการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดลเทคโนโลยีการผลิตระดับนาโน. [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/media/nano/Page/Unit2-3.html>
- [36] Adatom. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Adatom>
- [37] Michael T. Taschuk, Matthew M. Hawkeye and Michael J. Brett. Glancing Angle Deposition. [Online]. Available : <http://www.ece.ualberta.ca/~mtaschuk/documents/taschuk-2010-glad-book-chapter.pdf>
- [38] S. Mukherjee, D. Gall. Structure zone model for extreme shadowing conditions, Thin Solid Films, (2012)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

