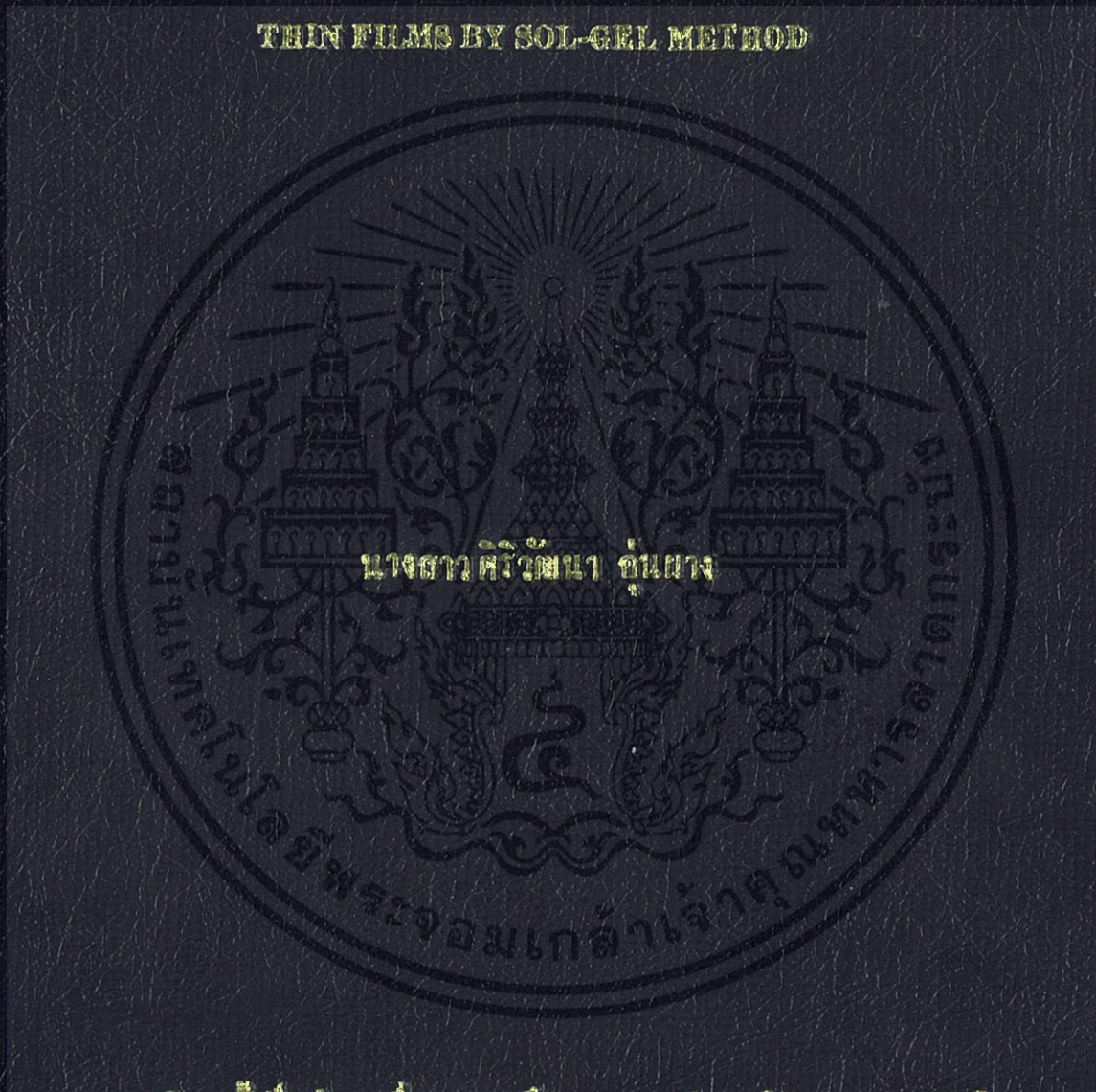


การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มบางของออกไซด์ของสังกะสี
(ZnO:Cu) โดยเตรียมด้วยกระบวนการโซล-เจล

PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Cu
THIN FILMS BY SOL-GEL METHOD



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของงานที่ศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2555

การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง
(ZnO:Cu) โดยเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจล
PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Cu
THIN FILMS BY SOL-GEL METHOD



นางสาวศิริวัฒนา อุ่นผาง

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาฟิสิกส์ประยุกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
คณะวิทยาศาสตร์

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2555

**PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Cu
THIN FILMS BY SOL-GEL METHOD**



**A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIRMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE**

IN APPLIED PHYSICS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FACULTY OF SCIENCE

KINGMONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2012

หัวข้อโครงการ การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง โดยเตรียมด้วยกระบวนการโซลเจล
PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Cu THIN FILMS BY SOL-GEL METHOD

ชื่อนักศึกษา นางสาวศิริวัฒนา อุ่นผาง

ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.วิชาญ เตชิตธีระ

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อาจารย์กฤษณะ ช่องศรี

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ประจำปีการศึกษา 2555

คณะกรรมการการสอบ	ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วราวุฒิ เถาดีดดา	
ดร.วรการ นียากร	
อ.ธนภรณ์ ลีลาพัฒนานนท์	
รศ.วิชาญ เตชิตธีระ	
รศ.ดร.วิษณุ เพชรภา	
อ.กฤษณะ ช่องศรี	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงชื่อของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	การเตรียมและการวิเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง เตรียมด้วยกระบวนการ โคลเจล
ชื่อนักศึกษา	นางสาวศิริวัฒนา อุ่นผาง
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2555
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.วิชาญ เตชดิธีระ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รศ.ดร.วิญญู เพชรภา
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ.กฤษณะ ช่องศรี

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (ZnO:Cu) ที่เตรียมด้วยวิธีการหมุนเคลือบจากสารที่เตรียมจากซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรต (zinc acetate dihydrate $\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) กับคอปเปอร์อะซิเตรทไดไฮเดรต (Copper acetate dihydrate $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{COO})_4\cdot \text{H}_2\text{O}$) และ 2-เมททอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) กับไดเอทานอลเอมาค (Diethanalamine ,DEA, $(\text{HN}(\text{CH}_2\text{OH})_2$) เป็นตัวทำละลายที่ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ สารละลายที่เตรียมขึ้นจะเตรียมด้วยปริมาณการเจือทองแดงที่ต่างกันคือ 2% 5% 8% 10% และ 20% ฟิล์มบางที่เตรียมได้จากวิธีการหมุนเคลือบบนกระจกโบโรซิลิเกตจำนวน 3 4 5 ครั้ง และแอนนัลที่อุณหภูมิต่างกันคือ 400 °C 500 °C 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ จากนั้นทำการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างและพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ลักษณะแบบเฮกซะโกนอลเวอริไซต์ (Hexagonal wurtzite) เท่านั้นโดยไม่พบโครงสร้างอื่น เช่น CuO และพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการก่อตัวเป็นผลึกได้ดีขึ้นเมื่อเจือทองแดงด้วยปริมาณที่เหมาะสม การศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดค่าการทะลุผ่านของแสงในย่านตามองเห็นของฟิล์มบางด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิล

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกโตรสโกปี (UV-Visible Spectroscopy) พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความโปร่งสูงในย่านแสงที่ตามองเห็นประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ และขอรับการดูแลคืนแสงเดือนมาทางด้านความยาวคลื่นสั้นลงเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือด้วยทองแดงเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามอยู่ระหว่าง 3.17 - 3.36 อิเล็กตรอน โวลต์

คำสำคัญ : ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง, ขบวนการหมุนเคลือบ, ฟิล์มบาง, โซลเจล



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	PREPARATION AND CHARACTERIZATION OF ZnO:Cu THIN FILMS BY SOL-GEL METHOD
Student	Miss. Siriwattana Aunpang
Degree	Bachelor of Science
Major Program	Applied Physics
Academic year	2012
Advisor	Assoc. Prof. Wichan Techitdheera
Co-Advisor	Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa
Co-Advisor	Mr. Kisana Chongsri

ABSTRACT

In this work, ZnO:Cu thin films were prepared by spin-coating method using zinc acetate dihydrate $\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ and copper acetate dehydrate $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{COO})_4\cdot \text{H}_2\text{O}$ as starting precursors of Zn and Cu respectively. (2-methoxyethanol $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) with diethanolamine DEA, $(\text{HN}(\text{CH}_2\text{OH})_2)$ are employed as solvent reagents. The starting precursor with concentration 0.5 M was prepared with different copper doping concentration of 2%, 5%, 8%, 10% and 20%. Thin films deposition carried out by the spin coating on glass substrates was repeated for 3,4,5 times, followed by annealing at different temperatures of 400 °C , 500 °C and 550°C for 4 h in an ambient air. The physical structure and surface morphologies of as-prepared ZnO:Cu thin films were characterized by X-ray diffraction (XRD) and scanning electron microscope (SEM). The corresponding results indicate that as-prepared thin films possess hexagonal wurtzite of ZnO without any impurity phase such as CuO due to small Cu doping contents and their crystallinity tends to increase with specific Cu doping composition. Meanwhile, optical properties of as-prepared thin films were investigated via UV-Vis spectroscopy and the relevant results exhibit that thin films have high transparency in the visible light approximately 80-90% transparency.

It is additionally observed that the absorption edge of the film shift to shorter wavelength as the

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ ใช้นิตยสารการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

doping content increases. The energy band gap calculated from its transmission spectra is found to be in the vicinity of 3.17 to 3.36 eV.

Keyword : ZnO:Cu, Spin coating, thin film, Cu-doping, Sol-gel



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีฉบับนี้ ข้าพเจ้าต้องขอขอบพระคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ อาจารย์ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัย ที่ได้ให้คำแนะนำให้คำปรึกษาอย่างใกล้ชิดและเสนอแนวทางแก้ไขปัญหา

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร.วิญญู เพชรภา อาจารย์วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีที่คอยให้ความรู้ แนะนำข้อบกพร่องต่างๆเพื่อที่จะนำไปแก้ไขให้ดีขึ้นและขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีที่ได้ให้ยืมอุปกรณ์เครื่องมือและสถานที่ในการทำงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบพระคุณอาจารย์กฤษณะ ช่องศรี อาจารย์มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่ให้คำปรึกษาในงานวิจัยและให้ความช่วยเหลือในการตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อยของรูปเล่มงานวิจัยให้เป็นไปตามแบบฟอร์มที่ถูกต้อง

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการ เจ้าหน้าที่ห้องธุรการ ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความร่วมมือและอำนวยความสะดวกในการทำงานวิจัยเล่มนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอขอบคุณพี่ๆในวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีที่ให้คำปรึกษา ตลอดจนการช่วยเหลือในด้านต่างๆที่ทำให้เกิดความสะดวก รวดเร็วในการใช้เครื่องมือต่างๆ

ขอขอบคุณผลงานวิจัยและเอกสารอ้างอิงต่างๆที่ข้าพเจ้าใช้เป็นเอกสารอ้างอิงและทำการศึกษา จนทำให้เกิดความสนใจในการทำงานวิจัยครั้งนี้ ซึ่งคาดว่ารายงาน โครงการพิเศษนี้จะ เป็นประโยชน์ต่อผู้ที่สนใจในทางด้านการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีโซลเจล

สุดท้ายขออนุญาตชื่นชมจิตใจที่เกิดจากงานวิจัยฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่บิดา นายสาคร อุ้นผาง และมารดา นางนิตยา อุ้นผาง ที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ ถ่ายทอดและประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ข้าพเจ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศิริวัฒนา อุ้นผาง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	III
กิตติกรรมประกาศ	V
สารบัญ	VI
สารบัญตาราง	X
สารบัญรูป	XI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตงานวิจัย	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	4
2.1 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์	4
2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์อะซิเตรท	4
2.3 สมบัติของคอปเปอร์ออกไซด์	7
2.4 สมบัติของคอปเปอร์อะซิเตรท	8
2.5 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	10
2.5.1 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีทางเคมี	10
2.5.2 การเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยสารด้วยวิธีทางเคมี	10
2.5.3 อิเล็กโตรพเลตติง	10
2.5.4 อิเล็กโตรสโตนเพลตติง	10
2.5.5 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีทางฟิสิกส์	10
2.5.6 การทำให้เป็นไอโดยความร้อน	11
2.5.7 สเปตเตอริง	11
2.5.8 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและเป่าสารเคลือบ	13
2.5.9 วิธีการเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก	14
2.5.10 กระบวนการโกลด์ดิซซาร์จ	15
2.5.11 วิธีระเหยสาร	17
2.5.12 วิธีระเหยสารด้วยอัลตราโซนิก	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.5.13 วิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสารละลายโซลเจล	17
2.6 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง	18
2.7 เครื่องมือการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	20
2.7.1 เครื่องซังสารแบบละเอียด	20
2.7.2 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน	21
2.7.3 เครื่องหมุนเคลือบ	21
2.8 เครื่องมือวิเคราะห์	23
2.8.1 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	23
2.8.2 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	24
2.8.3 การวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี	27
2.8.4 การวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด	28
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	32
3.1 การเตรียมสารละลายซิงค์อะซิเตรทและคอปเปอร์อะซิเตรท	32
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	33
3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	34
3.4 อุปกรณ์ในการทดลอง	35
3.5 การเตรียมกระจกสไลด์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบาง	35
3.6 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบ	36
3.7 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง	37
3.7.1 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	37
3.7.2 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	38
3.7.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านของฟิล์มบาง	38
3.7.4 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง	41
4.1 ผลการทดลองการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	41
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายโซลเจลซิงค์ออกไซด์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

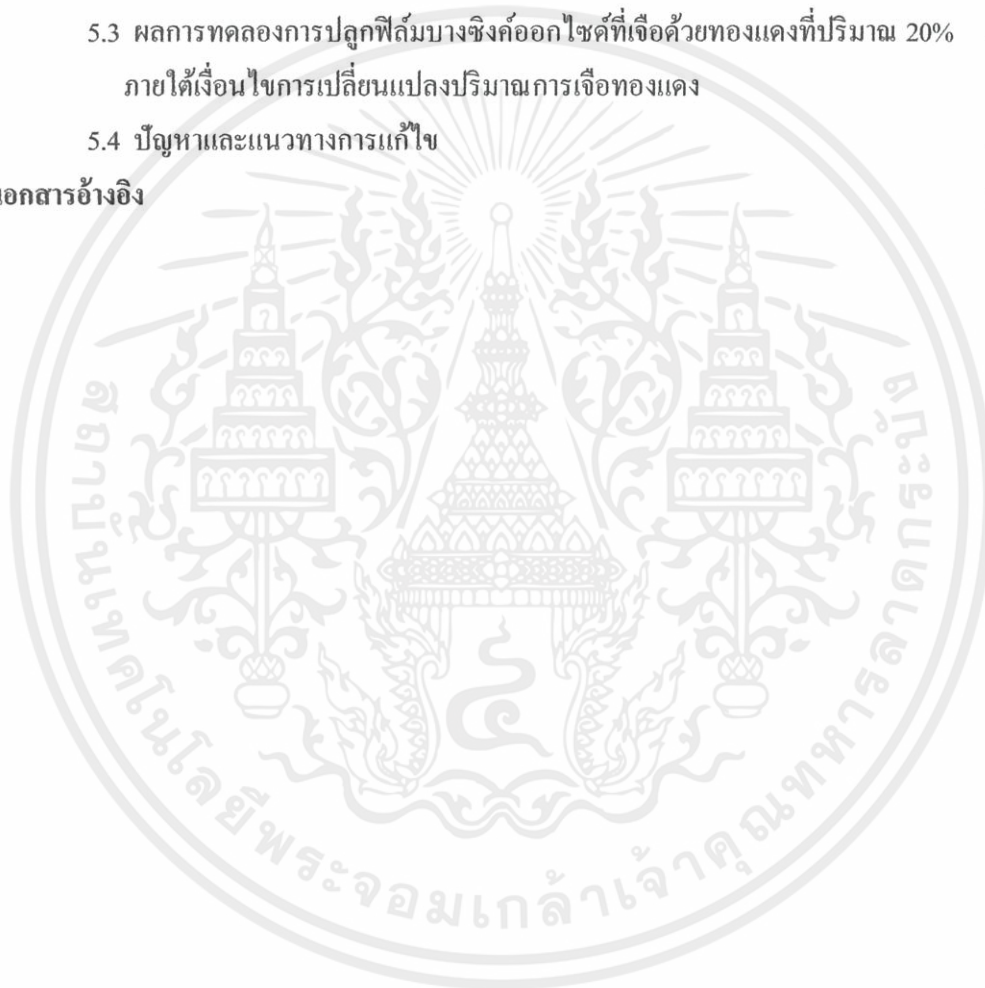
สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ที่เจือด้วยทองแดง	
4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์	43
4.4 ผลการทดลองการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางซึ่งค้ออกไซด์ที่เจือด้วย ทองแดงแบบภาคตัดขวางปริมาณ 20% ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด	44
4.5 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	45
4.6 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของ ฟิล์มบางซึ่งค้ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงปริมาณ 20% ที่อุณหภูมิ 550 °C	46
4.7 ผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของฟิล์มบางด้วยเทคนิค EDS	47
4.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบาง	47
4.8.1 ผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของฟิล์มบางซึ่งค้ออกไซด์ ที่เจือด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	47
4.8.2 ผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของฟิล์มบางซึ่งค้ออกไซด์ที่เจือด้วย ทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนชั้นการหมุนเคลือบ ที่แตกต่างกัน	48
4.8.3 ผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของฟิล์มบางซึ่งค้ออกไซด์ที่เจือด้วย ทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นการ เจือทองแดงที่แตกต่างกัน	49
4.9 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟ ดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง	50
4.9.1 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟ การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิที่แตกต่างกัน	50
4.9.2 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการ ดูดกลืนแสงของฟิล์มบางภายใต้เงื่อนไขจำนวนครั้งของการหมุน เคลือบที่แตกต่างกัน	52
4.9.3 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟ การดูดกลืนแสงของฟิล์มบางภายใต้เงื่อนไขปริมาณการเจือทองแดง	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
ที่แตกต่างกัน	
บทที่ 5 สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ	55
5.1 ผลการทดลองการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิแอนนัล	55
5.2 ผลการทดลองการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งในการหมุนเคลือบ	55
5.3 ผลการทดลองการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือทองแดง	56
5.4 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข	57
เอกสารอ้างอิง	58



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 แสดงสมบัติทางกายภาพบางประการของสารประกอบซิงค์ออกไซด์	5
2.2 แสดงสมบัติพื้นฐานของซิงค์อะซิเตรท	6
2.3 แสดงสมบัติบางประการของคอปเปอร์ออกไซด์	8
2.4 แสดงสมบัติทางกายภาพบางประการของคอปเปอร์อะซิเตรท	9
3.1 ปริมาณความเข้มข้นการเตรียมสารซิงค์อะซิเตรทและคอปเปอร์อะซิเตรท	32
4.1 แสดงค่าปริมาณธาตุของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ด้วยเทคนิค EDS	47
4.2 ตารางแสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่อุณหภูมิที่ต่างกัน	51
4.3 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของจำนวนครั้งการหมุนเคลือบที่ต่างกัน	52
4.4 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ปริมาณสารเจือทองแดงต่างกัน	54



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์	4
2.2 โครงสร้างของซิงค์อะซิเตรท	6
2.3 โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์แบบเฟสเซนเตอร์คิวบิก	7
2.4 โครงสร้างของคอปเปอร์อะซิเตรท	8
2.5 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง	11
2.6 กระบวนการสเปคโตริงเชิงฟิสิกส์	12
2.7 การกระบวนการเคลือบแบบสเปคโตริง	13
2.8 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ	14
2.9 ลักษณะการ โกลว์ดีสซาร์จระหว่างขั้วอิเล็กโทรด	16
2.10 วิธีการเตรียมสารละลายด้วยวิธีสารละลาย โซลเจล	17
2.11 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน	18
2.12 กราฟพลังงาน โฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงที่ค่า γ ต่างๆ	20
2.13 เครื่องซังสารแบบละเอียดชนิด 3 ตำแหน่ง	20
2.14 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน	21
2.15 เครื่องหมุนเคลือบฟิล์มบาง	22
2.16 โครงสร้างภายในของเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน	23
2.17 กฎของแบรกก์	24
2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	26
2.19 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	26
2.20 เครื่องยูวีวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี	28
2.21 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เป็นจุดกำเนิดภาพ	29
2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	31
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	33
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง	34
3.3 (a) เครื่องซังสาร (b) สารละลายโซลเจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่เตรียมได้	35
3.4 (a) เครื่องอัลตราโซนิก (b) ตู้อบเครื่องแก้ว	36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สงวนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 (a) เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นให้ความร้อน (b) เครื่องหมุนเคลือบ	36
3.6 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน	37
3.7 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	38
3.8 เครื่องยูวีวิติเบิลสเปกโตรสโกปี	39
3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	41
4.1 รูปถ่ายฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง โดยวิธีการเตรียม	41
สารละลายโซลเจล	
(a) ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงแอนนิตที่อุณหภูมิ 400 °C	
(b) ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงแอนนิตที่อุณหภูมิ 450 °C	
(c) ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงแอนนิตที่อุณหภูมิ 550 °C	
4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายโซล-เจลของ	42
ซิงค์อะซิเตตแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลสารในช่วงอุณหภูมิ 72-304 °C	
4.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือ	43
ด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% มีการหมุนเคลือบชั้นที่ต่างกันคือ 3 4 5 ครั้ง	
หมุนเคลือบลงบน โปโรซิลิกเกตและทำการแอนนิตที่อุณหภูมิ 550 °C	
4.4 (ก) แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ	44
20% เตรียมด้วยสารละลายโซลเจลซึ่งใช้เทคนิคหมุนเคลือบบนฐานรอง	
รับกระจุกโปโรซิลิกเกต 4 ครั้ง และทำการแอนนิตที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา	
4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ	
4.5 (ก) การวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มบาง	45
ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 10% ที่อุณหภูมิ 550 °C	
4.6 (ข) การวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์ม	46
บางฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ที่อุณหภูมิ 550 °C	
4.7 แสดงผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์	48
ที่เจือด้วยทองแดง 20% ที่อุณหภูมิ 400 °C 450 °C 550 °C	
4.8 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือทองแดง	49
ที่ปริมาณ 20% โดยจำนวนครั้งของการหมุนเคลือบต่างกัน คือ 3 4 5 ครั้ง	
ที่อุณหภูมิ 550 °C	
4.9 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณการเจือด้วยทองแดงต่างกัน	
4.10 กราฟความสัมพันธ์ของแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% เตรียมด้วยสารละลาย โซลเจลที่เคลือบบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกตและทำการแอนนัลที่ อุณหภูมิที่ต่างกัน	51
4.11 กราฟความสัมพันธ์ของแถบพลังงานต้องห้ามกับจำนวนครั้งการหมุนเคลือบ ที่ต่างกันของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% เตรียมด้วยสารละลายโซลเจล	52
4.12 กราฟความสัมพันธ์ของแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ที่ปริมาณการเจือทองแดงที่ต่างกัน คือ 2% 5% 8% 10% และ 20% โดย เตรียมด้วยสารละลายโซลเจลที่เคลือบ บนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกต	53

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ฟิล์มบาง (Thin film) คือ ชั้นอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบางๆ การระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” อาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (surface properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (bulk properties) จะเรียกฟิล์มนั้นว่า “ฟิล์มหนา” ทั้งนี้จากความหมายจะเห็นว่าฟิล์มเดียวกันอาจเป็น “ฟิล์มหนา” หรือ “ฟิล์มบาง” ก็ได้ขึ้นอยู่กับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตาม การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่มีวัตถุประสงค์เพื่อเปลี่ยนแปลงหรือปรับปรุงสมบัติของวัสดุที่เคลือบให้ดีขึ้น เช่น ให้มีความคงทน ทนทาน หรือสวยงามมากขึ้นรวมถึงเพื่อการใช้งานประโยชน์ในงานอื่นๆ โดยการเคลือบฟิล์มบางจะเป็นกระบวนการทำให้สารเคลือบตกเคลือบบนผิวของวัสดุที่ต้องการ โดยเริ่มจากการสร้างสารเคลือบในรูปแบบของอะตอม โมเลกุลหรืออนุภาค จากนั้นเป็นการเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ เมื่อสารเคลือบกระทบบนผิววัสดุรองรับก็เกิดการควบแน่นและพอกพูนเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับในที่สุด ลักษณะเฉพาะที่สำคัญอย่างหนึ่งของฟิล์ม คือ ความหนาของฟิล์มหลายด้านและการเปลี่ยนแปลงไปตามความหนาของฟิล์ม เช่น สมบัติทางแสง หรือ สมบัติทางไฟฟ้า ฯลฯ ดังนั้นความหนาของฟิล์มจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่จะต้องควบคุมระหว่างการผลิตอย่างใกล้ชิด ทั้งนี้ความหนาของฟิล์ม หมายถึง “ระยะตั้งฉากจากจุดใดๆ บนผิวหน้าของฟิล์มทะลุผ่านเนื้อฟิล์มไปยังอีกขอบหนึ่งของผิวหน้าฟิล์ม” ดังนั้นถ้าของผิวหน้าฟิล์มไม่ขนานหรือไม่เรียบ ความหนาของฟิล์มจะไม่ถูกต้องหรือมีความคลาดเคลื่อนสูง [24]

กระบวนการสารละลายโซลเจล (Solution-sol-gel process) ซึ่งมีมาตั้งแต่ช่วงปี ค.ศ. 1800 เพื่อการผลิตวัสดุจำพวกแก้วและเซรามิก การทำเซรามิกนี้ นอกจากจะใช้วัสดุที่เกิดจากการเผาดินเหนียวธรรมชาติและยังสามารถใช้กับวัสดุคล้ายแก้ว ซึ่งรวมถึงสิ่งที่เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหลอมสารอนินทรีย์ ได้แก่ ซิลิเกตออกไซด์ คาร์ไบด์ ไนไตรด์ และโบรไรด์ มีเซรามิกหลายประเภทถูกเตรียมโดยผ่านกระบวนการโซลเจล โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการหลอมเหลว ซึ่งเป็นประโยชน์หลักของกระบวนการนี้ในด้านของการใช้อุณหภูมิต่ำและให้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นเนื้อเดียวกัน กระบวนการสารละลายโซลเจลมักใช้กับออกไซด์ของเซรามิก [24]

ซิงค์ออกไซด์ [Zinc oxide ZnO] เป็นสารกึ่งตัวนำที่สำคัญมีแถบพลังงานเท่ากับ 3.37eV[3] จับกันด้วยพันธะไอออนิกขนาดใหญ่ถึง 60 meV[3]สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางด้านแสง เช่น ไลดอิมิตติงไดโอด Light-emitting diode (LEDs)[2] เลเซอร์ไดโอด Laser diode (LDS)[2] และอุลตราไวโอเล็ตไลดอิมิตติงไดโอด Ultraviolet Light-emitting diode (Uv LEDs)[3] ซิงค์ออกไซด์มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษานานับ ไม่นับรวมค่าให้ไปใช้ทำประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมบัติที่โดดเด่น คือ มีช่องว่างแถบพลังงานกว้างมีความโปร่งแสงที่ดีค่าอิเล็กตรอนมีความคล่องตัวสูง มีความเสถียรแม้จะอยู่ในอุณหภูมิห้อง ชิงค์ออกไซด์เป็นสารที่ไม่มีความเป็นพิษและยังมีสมบัติความเป็นสารเพียโซอิเล็กทริกส์ ทำให้โลหะทรานซิชันถูกแปรสภาพเมื่อเจือชิงค์ออกไซด์เพิ่มขึ้น[1][3][7]

ทองแดง [Copper (Cu)] เป็นสารประกอบที่มีความสำคัญในการกระตุ้นเพื่อทำให้เกิดการเรืองแสง[6]และเมื่อศึกษาในกรณีของชิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง เพื่อศึกษาสมบัติการนำไฟฟ้าสมบัติทางแสงและสมบัติการเป็นสารแม่เหล็ก[3]ทองแดงมีสมบัติทางกายภาพและสมบัติทางเคมีที่คล้ายคลึงกับชิงค์ออกไซด์หลายอย่าง โลหะทรานซิชันที่รวมตัวกับชิงค์ออกไซด์[2]เป็นที่สนใจของนักวิจัยเนื่องจากสามารถฟอร์มตัวเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดแม่เหล็กได้ระบบดิจิทัลมัลติเพล็กซ์ Digital Multiplex System (DMS)[1] ซึ่งสารประกอบนี้สามารถนำไปใช้ในการทำเครื่องมือสปีนทรอนิกส์ได้เพราะเป็นสาร โลหะกึ่งตัวนำชนิดโลหะทรานซิชัน ไอออนลบในสารกึ่งตัวนำชนิดแม่เหล็ก[2] นอกจากนั้นเมื่อเจือทองแดงลงไปชิงค์ออกไซด์ถูกใช้งานในด้านของแม่เหล็ก วิธีการเหล่านี้เป็นวิธีการที่ได้ผลอย่างมากทำได้ง่ายประหยัดและนำมาใช้ประโยชน์ได้มาก แม้จะมีการทดลองศึกษาเกี่ยวกับการเจือทองแดงลงไปฟิล์มบางมากมายแต่ก็ยังคงขาดผู้เชี่ยวชาญด้านแสงของฟิล์มชนิดนี้ฟิล์มจะเตรียมได้หลายสถานะ คือ ก๊าซ (Vapor)[1] ของเหลว (liquid)[1] ของแข็ง (Solid) (VLS)[1]มีกระบวนการเตรียมฟิล์มหลายแบบ เช่น สเปรย์ไพโรไลซิส (Spray pyrolysis)[2] อาร์เอฟสปีตเตอร์ริง (RF Sputtering)[2] เพาส์เลเซอร์ดีโพสิชัน Pulse laser deposition (PLD)[2] โซลเจล (Sol-gel) [2]

การศึกษาศสมบัติทางแสง มีความสำคัญมากสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ด้านแสง เช่น สวิตช์ (switches) ฟิลเตอร์ (filters) และมอดูเลเตอร์ (modulators) เป็นต้น ในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงผลที่เกิดจากผลกระทบของทองแดงต่อโครงสร้างและส่วนประกอบและสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง ดังนั้นความรู้นี้สามารถนำไปพัฒนาในงานวิจัยเกี่ยวกับสารประกอบที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางแสงและความแตกต่างของจุดเชื่อมต่อ โขลาเซลล์[4][6]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์งานวิจัย

1. เพื่อศึกษาการเตรียมสารละลายโซลเจลที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง
2. เพื่อศึกษาเงื่อนไขและผลกระทบของอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงต่อโครงสร้างและสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง
3. เพื่อศึกษาแถบพลังงานต้องห้ามที่มีผลต่อสมบัติของซิงค์ออกไซด์เมื่อเจือทองแดงลงบนกระจกโบโรซิลิเกต
4. เพื่อศึกษาเงื่อนไขของสารเจือที่มีผลกระทบต่อสมบัติทางฟิสิกส์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่เตรียมด้วยวิธีการหมุนเคลือบจากสารละลายโซลเจลลงบนกระจกโบโรซิลิเกต
5. เพื่อศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง ทางพื้นผิว ทางแสง ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่เตรียมด้วยวิธีการหมุนเคลือบจากสารละลายโซลเจล
6. เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่เตรียมด้วยวิธีการหมุนเคลือบจากสารละลายโซลเจล

1.3 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าการทำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงด้วยกระบวนการหมุนเคลือบเพื่อเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง
2. เตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่เตรียมด้วยวิธีการหมุนเคลือบจากสารละลายโซลเจลบนฐานรองกระจกโบโรซิลิเกตเพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีสมบัติทางกายภาพดีขึ้น
3. วิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง ทางพื้นผิว ทางแสง ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง
4. ศึกษาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงเตรียมจากกระบวนการหมุนเคลือบลงบนฐานรองกระจกโบโรซิลิเกต โดยตัวแปรที่ศึกษา
 - ก. ระยะเวลาในการให้ความร้อนระหว่างเคลือบ
 - ข. อุณหภูมิในการให้ความร้อนระหว่างเคลือบ
 - ค. จำนวนครั้งของการเคลือบ (ความหนา)
 - ง. ปริมาณสารเจือทองแดง

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงในสภาวะที่ดีที่สุดมาประยุกต์ใช้ด้านอุปกรณ์ทางแสง
2. สามารถนำข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยไปใช้เป็นแนวทางในการนำไปศึกษาต่อหรือพัฒนาให้ดียิ่งขึ้น

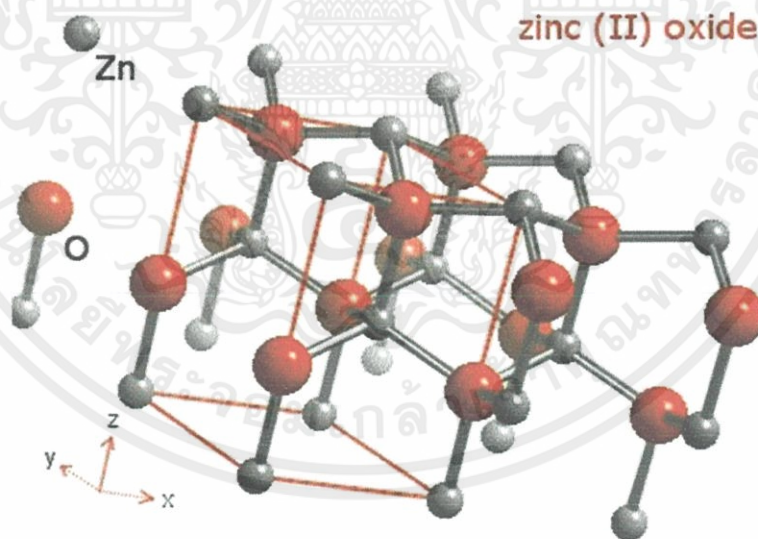
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

2.1 สมบัติพื้นฐานของซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide: ZnO)

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap) มีแถบพลังงาน 3.37 eV ที่อุณหภูมิห้องและ 3.44 eV ที่อุณหภูมิ 4 เคลวิน ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอไรต์ (Hexagonal wurtzite) หรือคิวบิกซิงค์เบลน (Cubic zinc blende) หรือร็อกซอลต์ (Cubic Rocksalt) แสดงดังรูปที่ 2.1 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอไรต์ มีค่าคงที่ผลึก $a=b=3.24 \text{ \AA}$ และ $c=5.20 \text{ \AA}$ มีค่ามวลยังผลพาหะ (carrier effective mass) ของอิเล็กตรอนกับโฮลคือ $0.24 m_0$ และ $0.59 m_0$ ตามลำดับ มีค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (electron mobility) ที่ผลึกเดี่ยวซิงค์ออกไซด์ (ZnO single crystal) ระหว่าง 100 ถึง $200 \text{ cm}^2/\text{V}$ และมีค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของโฮล (hole mobility) ประมาณ $180 \text{ cm}^2/\text{V}$ สมบัติอื่นๆของซิงค์ออกไซด์แสดงดังตารางที่ 2.1 หลายปีที่ผ่านมาซิงค์ออกไซด์จึงเป็นที่นิยมนำไปสร้างอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ เช่น ตัวเปล่งแสงย่านสีน้ำเงิน (light emitting diodes LED) [2] ไดโอดเลเซอร์ (laser diodes) [3] และตัวตรวจวัดแสงย่านอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet photodetector) [4] เป็นต้น



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

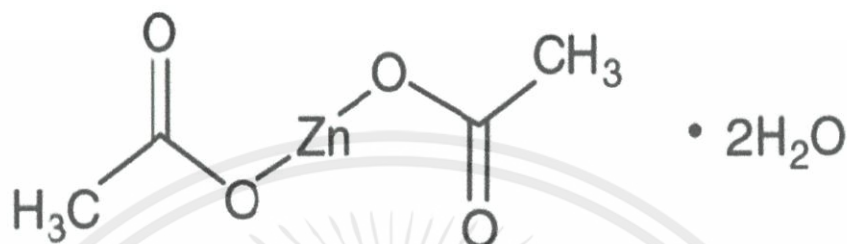
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงสมบัติกายภาพบางประการของสารซิงค์ออกไซด์

Properties of wurtzite ZnO	Value
Lattice parameters at 300 K	a_0 : 0.32495 nm C_0 : 0.52069 nm a_0 / C_0 1.602 (ideal hexagonal structure shows 1.633) u : 0.345
Density	5.606 g cm ⁻³
Stable phase at 300 K	Wurtzite
Melting point	1975 °C
Thermal conductivity	0.6, 1-1.2
Linear expansion coefficient (/C)	a_0 : 6.5×10^{-6}
Static dielectric constant	8.656
Refractive index	2.008, 2.029
Energy gap	3.37 eV, direct
Intrinsic carrier concentration	<106 cm ⁻³
Exciton binding energy	60 meV
Electron effective mass	0.24
Electron Hall mobility at 300 K for low n-type conductivity	200 cm ² V ⁻¹ s ⁻¹
Hall effective mass	0.59
Hole Hall mobility at 300 K for low p-type conductivity	5-50m2 V ⁻¹ s ⁻¹

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์อะซิเตท (Zinc acetate)

ซิงค์อะซิเตท มีสูตรโมเลกุล คือ $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ เตรียมได้จากกระทำของกรดอะซิติกในคาร์บอนेटสังกะสีหรือโลหะสังกะสี มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีมวลโมเลกุลประมาณ 219.50 g/mol (dihydrate) แบบมีน้ำ 183.48 g/mol (anhydrous) แบบไม่มีน้ำมีความหนาแน่นประมาณ 1.735 g/cm³ และมีโครงสร้างดังรูปที่ 2.2 ซึ่งจะจำแนกสมบัติดังตารางที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิงค์อะซิเตท

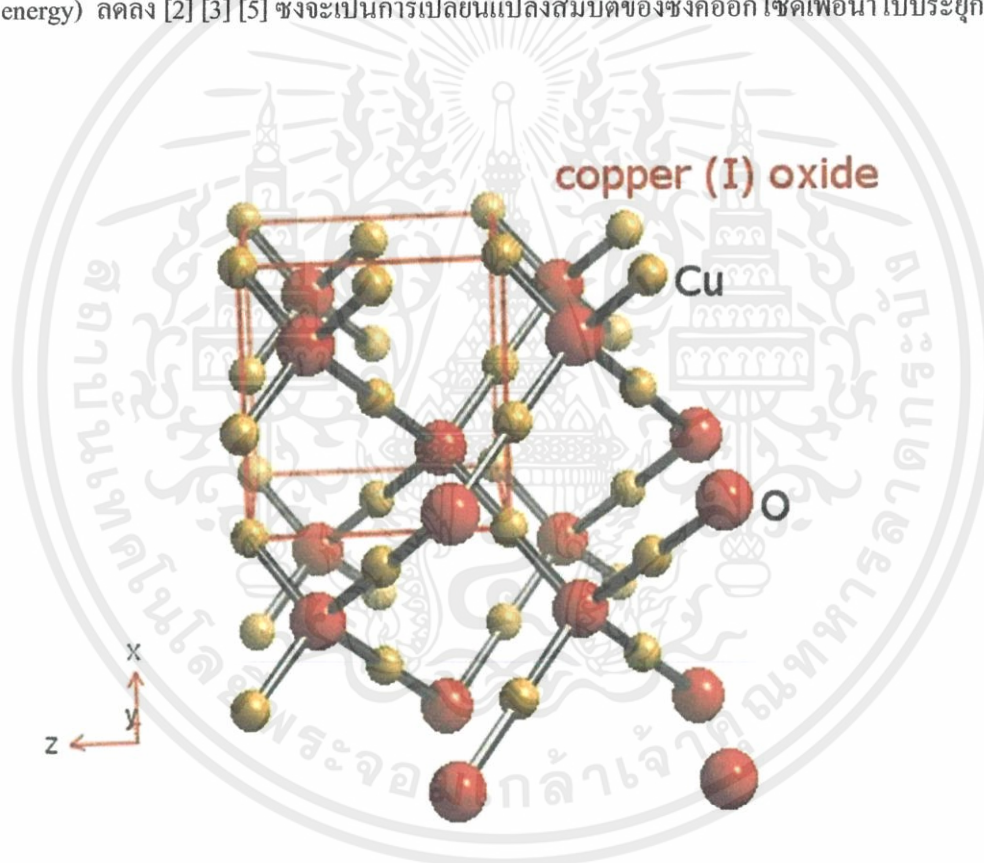
ตารางที่ 2.2 สมบัติพื้นฐานของซิงค์อะซิเตท

สมบัติของสารเคมี	ซิงค์อะซิเตท($(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
ชื่อ	สังกะสีอะซิเตท
ชื่ออื่นๆ	เกลือสังกะสีหรือสังกะสี
สูตร โมเลกุล	$(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$
มวล	219.50 g/mol (dihydrate) (มีน้ำ) 183.48 g/mol (anhydrous) (ไม่มีน้ำ)
รูปแบบ	ของแข็งสีขาว
ความหนาแน่น	1.735 g/cm ³ (dihydrate)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 สมบัติของคอปเปอร์ออกไซด์ (CuO)

ในธรรมชาติทองแดงหรือคอปเปอร์ (Copper:Cu) เป็นโลหะตัวนำที่มีราคาถูกมีจุดหลอมเหลว $1,084^{\circ}\text{C}$ จุดเดือด $2,567.2^{\circ}\text{C}$ โครงสร้างผลึกเป็นแบบ FCC (Face Center Cubic) CCP (cubic close-packed) สามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับออกซิเจนเป็นสารประกอบคอปเปอร์ออกไซด์ 2 เฟส คือ (CuO) และ Cu_2O ซึ่งลักษณะและสมบัติของ (CuO) เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีโครงสร้างป็นโมโนคลินิก มีค่าช่องว่างแถบพลังงาน 1.2 eV นอกจากนั้นยังมีสมบัติทางด้านเซลล์ไฟฟ้าเคมีและเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาจึงได้มีการนำคอปเปอร์ออกไซด์ไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ เช่น ตัวตรวจวัดแก๊ส, อุปกรณ์ทางแสง, ขั้วนำไฟฟ้าของแบตเตอรี่ลิเทียมและเซลล์แสงอาทิตย์ เป็นต้น นอกจากนั้นยังมีสมบัติในการยับยั้งเชื้อราและแบคทีเรีย เมื่อนำไปเจือในซิงค์ ออกไซด์จะทำให้สมบัติบางอย่างของซิงค์ออกไซด์เปลี่ยนไป เช่น ค่าช่องว่างของซิงค์ออกไซด์ลดลง [5] ค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy) ลดลง [2] [3] [5] ซึ่งจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของซิงค์ออกไซด์เพื่อนำไปประยุกต์ต่อไป



รูปที่ 2.3 โครงสร้างของคอปเปอร์ออกไซด์แบบเฟสเซ็นเตอร์คิวบิก

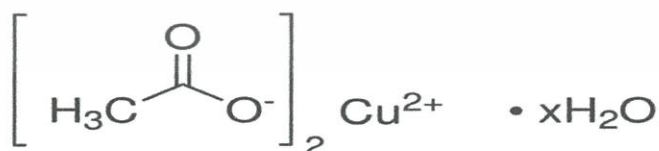
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 ตารางแสดงสมบัติทางกายภาพบางประการของทองแดง (Cu)

Properties of cubic (Fcc) of CuO	Value
น้ำหนักอะตอม (Atomic weight)	63.57
น้ำหนักอะตอม	3.6078 (°A = Angstrom Unit)
โครงสร้างของโครงผลึก Face centered Cubic (Fcc)	8.94 = หน่วยวัดขนาดคลื่นแสง
ความหนาแน่น (20 °C)	1083 °C
จุดหลอมเหลว	2595 °C
ความร้อนจำเพาะ (25 °C)	0.0919 cal/g °C (1° A = 10 ⁻⁸ ซม.)
สัมประสิทธิ์การขยายตัว	16.47 x 10 ⁻⁶ °C
ความต้านทานจำเพาะ (30 °C)	1.682 ไมโครโอห์ม/ซม ³
คุณสมบัติทางกล	17 Kg/mm ²
Tensile Strength	10 Kg/mm ²
Elastic Limit	35 – 50 %
Hardness	12,000 Kg/mm ²
Modulus of Elasticity	

2.4 สมบัติของคอปเปอร์อะซิเตรท Copper(II) acetate

ทองแดง(II) เรียกว่า cupric สังกะสีจากโลหะทองแดงกับสารละลายกรดอะซิติกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นผลึกของแข็งสีเขียวเข้ม ตั้งแต่สมัยโบราณส่วนใหญ่คอปเปอร์ อะซิเตรทส่วนใหญ่จะถูกนำมาเป็นสารฆ่าเชื้อราและน้ำยาสำหรับสังเคราะห์สารอินทรีย์ต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.4 โครงสร้างของคอปเปอร์อะซิเตรทให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.4 ตารางแสดงสมบัติกายภาพบางประการของคอปเปอร์อะซิเตรท

Properties	
Molecular formula	$\text{Cu}(\text{CH}_3\text{COO})_2$
Molar mass	181.63g/mol(anhydrous) 199.65g/mol (monohydrate)
Appearance	Dark green crystalline solid
Odor	odorless (monohydrate)
Density	1.882 g/cm ³ (monohydrate)
Melting point	115 °C, 388 K, 239 °F
Boiling point	240 °C, 513 K, 464 °F
Solubility in water	monohydrate: 7.2g/100mL(coldwater) 20 g/100 mL (hot water)
Solubility	Soluble in alcohol Slightly soluble in ether andglycerol
Refractive index(n_D)	1.545 (monohydrate)
Structure	
Crystal structure	Monoclinic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง (Thin film deposition method)

วิธีการเคลือบฟิล์มบาง สามารถทำได้ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีทางเคมี (Chemical method) และ วิธีทางฟิสิกส์ (Physics method) [5] โดยแต่ละวิธีเป็นการทำให้อะตอมหรือ โมเลกุลของสารเคลือบไปก่อตัวเป็นฟิล์มบนฐานรองรับ ซึ่งวิธีทางเคมีเกี่ยวข้องกับการคายไอออนการสลายตัว ของสารประกอบ และปฏิกิริยาระหว่างแก๊สหรือของเหลวของฐานรองรับนั้น

2.5.1 วิธีการเคลือบฟิล์มด้วยวิธีทางเคมี (Chemical method)

2.5.2 การเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยสารด้วยวิธีทางเคมี (Chemical vapor deposition:(CVD)

เป็นวิธีเคลื่อนย้ายสารเคลือบในสภาวะก๊าซให้ไปจัดเรียงตัวในฐานรองรับและเป็นวิธีสำคัญสำหรับสารกึ่งตัวนำ โดยปฏิกิริยาเคลือบจะเป็นองค์ประกอบหนึ่งของสารประกอบซึ่งไปตกเคลือบบนผิวของฐานรองรับ ได้หลายปฏิกิริยามีความจำเป็นอย่างยิ่งในการควบคุมอุณหภูมิ ลักษณะพิเศษของการเคลือบฟิล์มบางแบบระเหยสารด้วยวิธีทางเคมี คือ ใช้อุณหภูมิสูงเกิดกระบวนการอิพิทอกซีได้อัตราการตกเคลือบค่อนข้างสูงสารระเหยได้มีกรรมวิธีค่อนข้างยุ่งยาก และเนื่องจากแก๊สที่ใช้มีพิษร้ายแรง ดังนั้นระบบเครื่องมือจึงต้องมีความปลอดภัยสูง

2.5.3 อิเล็กโตรเพลตติง (Electroplating)

การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีไฟฟ้าเคมีเป็นการเคลือบผิวโลหะด้วยโลหะ โดยสารเคลือบต้องอยู่ในสภาวะไอออนบวกในสารละลายอิเล็กโตรไลต์ซึ่งไอออนบวกนี้จะเข้าไปรวมตัวกับประจุไฟฟ้าลบที่แคโทดและยึดติดที่แคโทดนั้น ดังนั้นแคโทดจึงเป็นวัสดุที่ถูกเคลือบ

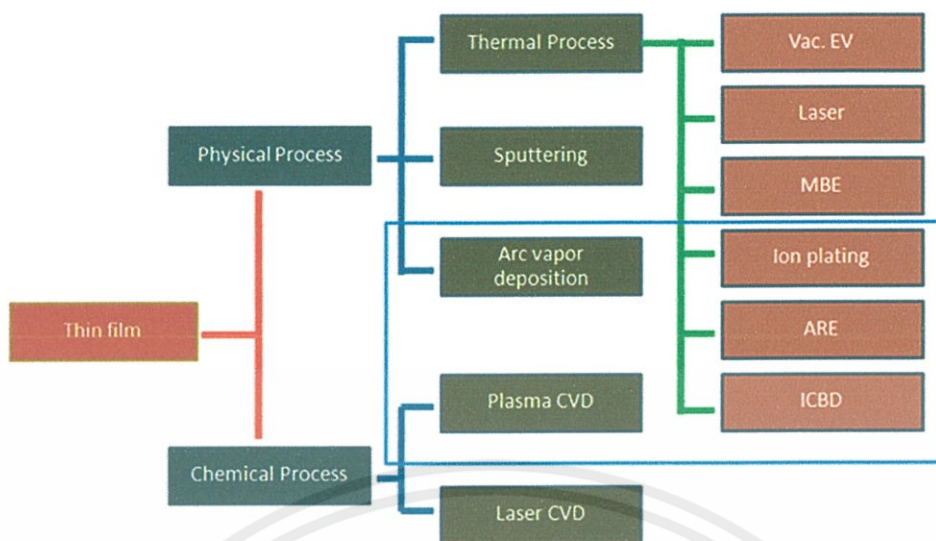
2.5.4 อิเล็กโตรไลต์เพลตติง (Electrolyte plating)

การเคลือบแบบไร้ไฟฟ้าเคมีเป็นการเคลือบผิวโลหะหรือโลหะก็ได้ไม่ต้องใช้สนามไฟฟ้า กล่าวคือ สารเคมีบางชนิดก่อให้เกิดปฏิกิริยาเป็นฟิล์มบางได้โดยไม่มีสนามไฟฟ้าวิธีนี้มีความหลากหลายมาก แต่ก็ควบคุมได้ยาก ซึ่งเหมาะสำหรับเคลือบฟิล์มบางบนผิวโลหะและบนผิวโลหะอะตอมหรือ โมเลกุลค่อนข้างไปถึงได้ยากเมื่อใช้วิธีอื่น

2.5.5 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีทางฟิสิกส์ (Thin film process)

วิธีการเคลือบฟิล์มบางพอจะแบ่งอย่างสังเขปได้ 2 แบบ ดังนี้ กระบวนการเคลือบโดยไอเชิงฟิสิกส์(physical vapor deposition process(PVD) และกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (chemical vapor deposition process:CVD) ซึ่งแต่ละวิธีแยกย่อยออกไปอีกงานวิจัยนี้จะเน้นเฉพาะทางด้าน (PVD) เป็นหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง

ที่มา : 2012 VT-SUN.COM ALL Rights Reserve

กระบวนการเคลือบ โดยไอเชิงฟิสิกส์(PVD) แบ่งได้ 3 กลุ่มคือ

- การทำให้เป็นไอโดยความร้อน (Thermol evaporation)
- สปีตเตอร์ริง (Sputtering)
- การเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก (Arc vapor deposition)

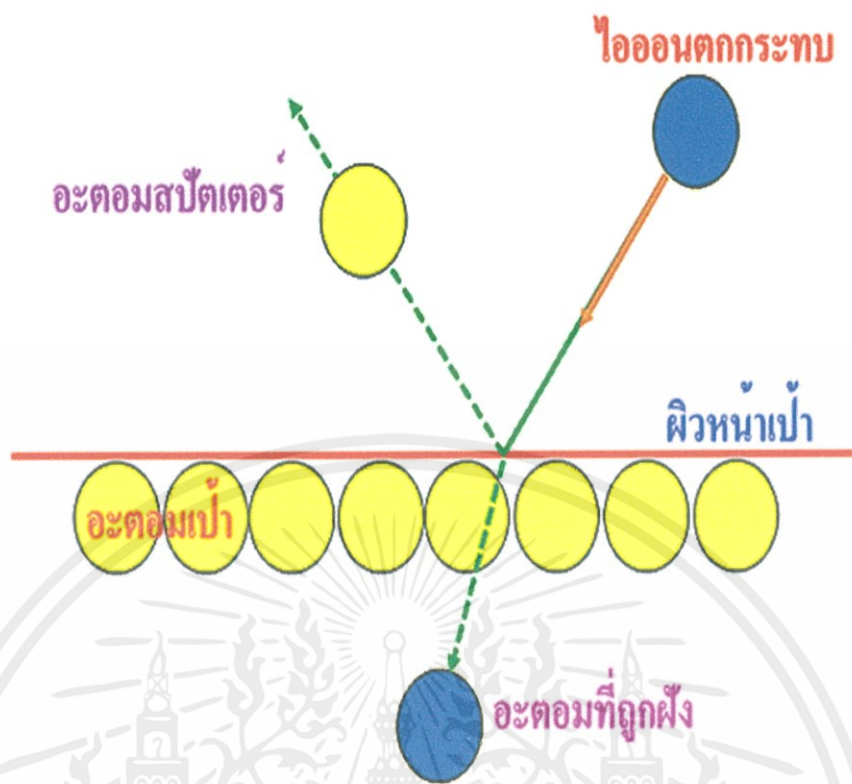
2.5.6 การทำให้เป็นไอโดยความร้อน (Thermol evaporation)

การทำให้เป็นไอโดยความร้อน คือ กระบวนการระเหยด้วยความร้อน โดยประกอบด้วย การระเหยสารที่เป็นแหล่งกำเนิดภายในแชมเบอร์สุญญากาศที่ต่ำกว่า 1×10^{-6} Torr (1.3×10^{-4} Pa) และ ความแน่นอนุภาคที่ระเหยไปบนชิ้นงานกระบวนการระเหยด้วยความร้อนนิยมเรียกว่า การเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum deposition) ซึ่งมีหลายวิธีดังรูปที่ 2.5

2.5.7 สปีตเตอร์ริง (Sputtering)

เมื่อผิวของแข็งถูกระดมยิงด้วยอนุภาคที่มีพลังงานเช่น ไอออนที่มีความเร่งอะตอมที่ผิวของแข็งจะกระเจิงออกมาเนื่องจากการชนระหว่างอะตอมที่ผิวและอนุภาคพลังงาน ดังรูปที่ 2.6 ปฏิกิริยาการชนนี้เรียกว่าสปีตเตอร์ริงกลับ (back sputtering) หรือสปีตเตอร์ริงเชิงเดี่ยว (Simple sputtering) และอะตอมที่หลุดออกมาจากผิวของแข็งนี้จะไปก่อตัวบนชิ้นงานทำให้เกิดฟิล์มบางขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

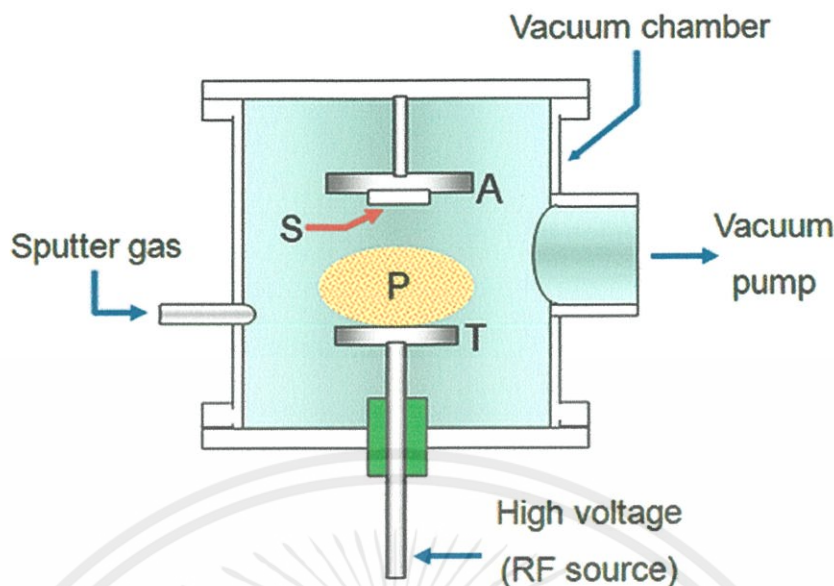


รูปที่ 2.6 กระบวนการสปัตเตอร์เชิงฟิสิกส์

ที่มา : 2012 VT-SUN.COM ALL Rights Reserve

เมื่อแผ่น โลหะถูกยิงด้วยอนุภาคพลังงานทำให้มีอะตอมกระเจิงส่งผ่านแผ่นโลหะบางออกมาปรากฏการณ์นี้ถูกเรียกว่าสปัตเตอร์แบบส่งผ่าน (Transmission Sputtering) คำว่าสปัตเตอร์ (Sputtering) แคโทดสปัตเตอร์ (Cathode Sputtering) หรือ แคโทดดีไซน์ทีเกรชัน (Cathode disintegration) และ อิมแพกต์อีวาเพอเรชัน (Impact evaporation) ถูกใช้ในความหมายเดียวกันระบบสปัตเตอร์หลายแบบถูกแนะนำมาใช้ในการเคลือบฟิล์มบางตามรูปแบบที่แสดงดังรูปที่ 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ระบบการเคลือบแบบสเป็คเตอริ่ง : A,แอโนด; T เป้า; S, ฉันทัน ;P, พลาสมา

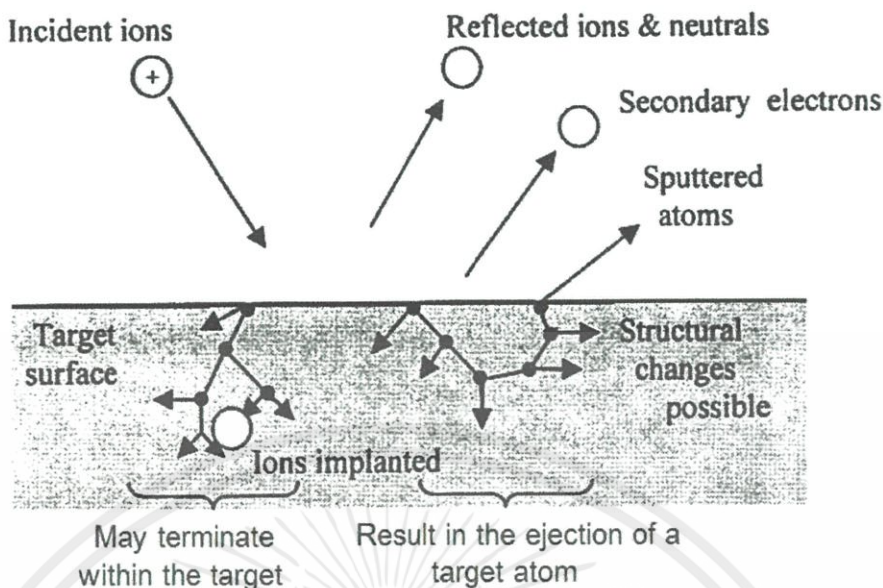
ที่มา : 2012 VT-SUN.COM ALL Rights Reserve

2.5.8 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

เมื่อ ไอออนพลังงานสูงวิ่งชนผิวหน้าวัสดุจะเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ

1. การสะท้อนที่ผิวหน้าของไอออน (Reflected ions and neutrals) ไอออนอาจสะท้อนกลับจากผิวหน้าซึ่งส่วนใหญ่จะสะท้อนออกมาในรูปของอะตอมที่เป็นกลางทางไฟฟ้าอันเกิดจากการ รวมตัวกับอิเล็กตรอนที่ผิวเป้าสารเคลือบ
2. การปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron emission) จากการชนของ ไอออน อาจทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากเป้าสารเคลือบถ้า ไอออนนั้นมีพลังงานสูงพอ
3. การฝังตัวของ ไอออน (Ion implantation) ไอออนที่วิ่งชนเป้าสารเคลือบนั้น ไอออนอาจฝังตัวลงในสารเคลือบ โดยความลึกของการฝังตัวจะแปรผันโดยตรงกับพลังงานไอออนซึ่งมีค่าประมาณ $10 \text{ \AA}/$ พลังงานไอออน 1 keV สำหรับ ไอออนของแก๊สอาร์กอนที่ฝังตัวในแผ่นทองแดง
4. การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของผิวสารเคลือบ การชนของไอออนบนผิวสารเคลือบทำให้เกิดการเรียงตัวของอะตอมที่ผิวสารเคลือบใหม่และเกิดความบกพร่องของโครงสร้างผลึก (Lattice defect)
5. การสเป็คเตอริ่ง การชนของไอออนที่ผิวหน้าเป้าอาจทำให้เกิดกระบวนการชนแบบต่อเนื่องอันทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมจากเป้าสารเคลือบซึ่งเรียกว่ากระบวนการสเป็คเตอริ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 อันตรกิริยาระหว่างไอออนและผิวเป้าสารเคลือบ

ที่มา: Chapman, B. (1980). Glow discharge processes: Sputtering and plasma etching.

2.5.9 วิธีการเคลือบด้วยไอจากการอาร์ก (Arc vapor deposition)

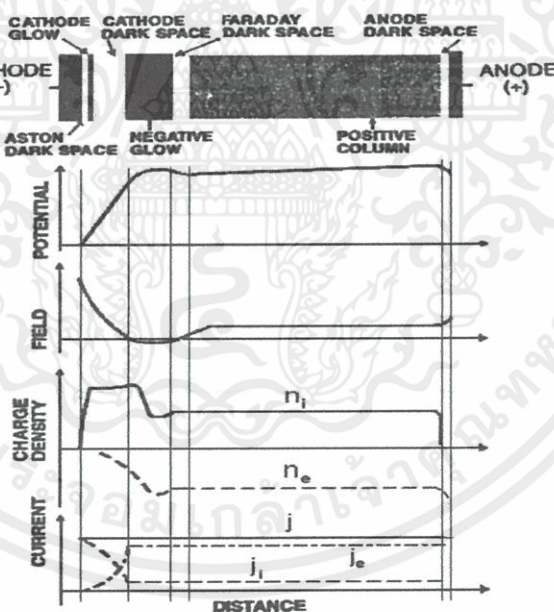
การเคลือบด้วยไอจากการอาร์กเป็นเทคนิค PVD ซึ่งใช้ในการทำให้ขั้วไฟฟ้ากลายเป็นไอภายใต้เงื่อนไขการอาร์กซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดของสารที่เป็นไอในการเคลือบเงื่อนไขการอาร์กประกอบด้วยกระแสสูงและโวลต์ต่ำกระแสไฟจะผ่านตลอดแก๊สหรือไอของสารที่เป็นขั้วไฟฟ้า ความต่างศักย์ต้องมีค่าใกล้เคียงกับศักย์ไอออไนซ์ของแก๊สหรือไอเท่านั้น (>25V) ไอออนจะถูกยิงที่ขั้วแคโทดและอิเล็กตรอนจะถูกยิงที่ขั้วแอโนดทำให้ขั้วไฟฟ้าวร้อนส่วนมากสารที่หลุดออกมาถูกระเหยด้วยความร้อน บางอย่างหลุดออกมาเป็นหยดจากการหลอมเหลวหรืออนุภาคของแข็งจากแคโทด เพลอร์เซียมส่วนมากของอะตอมถูกไอออไนซ์ในกระบวนการเป็นไอด้วยวิธีอาร์กนี้การอาร์กสามารถเกิดขึ้นได้ระหว่างขั้วไฟฟ้าที่อยู่ใกล้ชิดกันในปริภูมิสุญญากาศสูงโดยขั้วไฟฟ้าหนึ่งจะกลายเป็นไอหรือระหว่างขั้วไฟฟ้าในความดันต่ำหรือสภาพแวดล้อมแก๊สความดันสูง(gaseous arc) การอาร์กในสภาวะแวดล้อมแก๊สความดันสูงไม่ถูกใช้ในกระบวนการ PVD แต่จะถูกใช้ในกระบวนการพลาสมาสปเรย์ (Plasma Spraying) และการเชื่อมโดยการอาร์ก (Arc welding) และการเคลือบเชิงอิเล็กโตรสปาร์ก (Electrospark plating) ในกระบวนการ PVD โดยการเป็นไอจากการอาร์กสามารถพิจารณาเป็นแหล่งกำเนิดที่มีลักษณะเฉพาะเช่นเดียวกับการเป็นไอความร้อนและสปัดเตอริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.10 กระบวนการโกลว์ดิซชาร์จ (Glow Discharge)

ในการผลิตอนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้น วิธีที่นิยมและใช้กันมาก ได้แก่ กระบวนการโกลว์ดิซชาร์จ (กมล เอี่ยมพนากิจ, 2547: 12-14) ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้เทคนิคนี้เช่นกัน โดยในกระบวนการ โกลว์ดิซชาร์จจะเกิดขึ้นโดยการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้ขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ขั้ว ที่วางห่างกันเป็นระยะ D ภายใต้ความดันบรรยากาศที่ต่าง ($10^{-3} - 10^{-1}$ Torr) เมื่อเริ่มต้นความต่างศักย์ไฟฟ้าน้อยกระแสไฟฟ้าจะเกิดจากอิเล็กตรอนและไอออนบวก ซึ่งได้จากการแตกตัวแก๊สเนื่องจากเกิดการชนกันเองหรือถูกชนโดยรังสีคอสมิก อิเล็กตรอนจะวิ่งเข้าหาขั้วบวก (Anode) และไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วลบ (Cathode) ซึ่งทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองแต่กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะมีค่าต่ำมาก เมื่อทำการเพิ่มศักย์ไฟฟ้าระหว่างอิเล็กโทรดจนถึงแรงดันพังทลาย (Breakdown voltage) พลังงานของประจุจะถูกเร่งภายใต้สนามไฟฟ้าจนมีค่าสูงขึ้น สามารถชนกับโมเลกุลของแก๊สที่อยู่ในภาชนะสุญญากาศ ทำให้โมเลกุลของแก๊สเกิดการแตกตัวเป็นอิเล็กตรอนและไอออนบวก เรียกว่าการไอออไนซ์ของแก๊สโดยไอออนบวกจะวิ่งเข้าหาขั้วแคโทดที่ติดเป่าสารเคลือบไว้ด้านบนทำให้อิเล็กตรอนชุดที่สองและอะตอมที่ผิวหน้าของเป่าสารเคลือบถูกชนหลุดออกมาจากเป่าสารเคลือบด้วยการถ่ายเทโมเมนตัม โดยอะตอมของเป่าสารเคลือบที่ถูกชนจะฟุ้งกระจายภายในระบบสุญญากาศ ซึ่งพร้อมที่จะตกลงบนแผ่นรองรับส่วนอิเล็กตรอนก็จะเคลื่อนที่เข้าสู่ขั้วอานอดและทำให้เกิดการไอออไนซ์อย่างต่อเนื่อง ทำให้กระแสเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีปริมาณไอออนมากพอที่จะผลิตอิเล็กตรอนได้ในจำนวนคงที่เพื่อรักษาสภาวะโกลว์ดิซชาร์จต่อไป หลังจากการไอออไนซ์ของก๊าซไอออนซึ่งมีมวลมากกว่าอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าทำให้บริเวณขั้วแคโทดมีประจุบวกเกาะกลุ่มกัน (Positive space charge) เกิดขึ้นสูงส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สู่อานอดอย่างรวดเร็วทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณขั้วแคโทดมีค่าสูง ศักย์ไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมบริเวณนี้ เมื่อพ้นจากบริเวณแคโทดสนามไฟฟ้าจะมีค่าต่ำลง อิเล็กตรอนหลังการไอออไนซ์หลายครั้งบริเวณใกล้แคโทดจะสูญเสียพลังงานไปมากไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองภายใต้สนามไฟฟ้าเพื่อให้มีพลังงานสูงเพียงพอที่จะไอออไนซ์แก๊สครั้งต่อไปได้จึงเคลื่อนที่เข้าหาขั้วอานอด โดยระหว่างนี้อาจทำได้เพียงกระตุ้น (Excited) อะตอมของแก๊สเท่านั้น เมื่ออะตอมของแก๊สที่อยู่ในสภาวะกระตุ้นกลับสู่กราวด์สเตตจะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออก จึงเกิดเป็นสีต่างๆตามชนิดของแก๊ส เรียกว่า เกิดโกลว์ดิซชาร์จ ส่วนไอออนบวกที่วิ่งเข้าสู่แคโทดจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่แคโทดให้เป็นกลางทางไฟฟ้าและกลับจากสภาวะไอออนสู่กราวด์สเตต โดยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของอะตอมของแก๊สจากภาวะไอออนสู่กราวด์สเตตนี้ มีความถี่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ตทำให้เกิดเป็นบริเวณมืดและบริเวณมืดนี้เกิดขึ้นในช่วงระยะปลอดการชนจากผิวแคโทดโดยเป็นระยะปลอดการชนเฉลี่ย (Mean free path) ระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของก๊าซ โดยระยะของแถบมืดจะเปลี่ยนแปลงไปตามความดันบรรยากาศภายในและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดพบว่าผลคูณระหว่างความดันกับระยะของแถบมืดมีค่าคงที่เมื่อความดันลดลงแถบมืดจะมีระยะยาวขึ้นทำให้การผลิตไอออนในระบบมี

ปริมาณน้อยลงกระแสลดลง ดังนั้นอะตอมที่ถูกสปีดเตอริงจะมีปริมาณลดลงด้วยแต่เมื่อความดันเพิ่มขึ้นแถบมืดจะมีค่าลดลง การผลิตไอออนมีปริมาณสูงขึ้น กระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรเพิ่มขึ้นทำให้ขบวนการสปีดเตอริงสูงขึ้นตามความดันแก๊สขณะที่ความดันแก๊สในระบบสูงขึ้นระยะปลอดการชนจะมีค่าลดลงอะตอมของสารเคลือบที่หลุดออกจากเป่าสารเคลือบจะถูกส่งผ่านลงเคลือบบนแผ่นรองรับได้ยากขึ้นเนื่องจากการชนกันกับโมเลกุลของแก๊สและเคลื่อนที่ย้อนกลับสู่เป่าสารเคลือบหรือสูญเสียสู่ผนังภาชนะสุญญากาศทำให้ค่าyieldของการสปีดเตอริงมีค่าลดลงเมื่อมีความดันสูงขึ้น ดังนั้นอัตราการเกิดสปีดเตอริงจะขึ้นอยู่กับความดันแก๊ส และแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับขั้วอิเล็กโทรด แรงดันไฟฟ้าพังทลายในขบวนการโกลว์ดีสชาร์จจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปกับระยะทาง D ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดและระยะปลอดการชนระหว่างอิเล็กตรอนชุดที่สองกับโมเลกุลของแก๊ส (ระยะปลอดการชนจะแปรผกผันกับความดันแก๊ส) ถ้าความดันแก๊สต่างกันเกินไป หรือระยะทาง D มีค่าน้อยเกินไป อิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถผลิตไอออนให้มากพอก่อนการชนกับอะโนด ถ้าความดันแก๊สสูงเกินไปหรือระยะทาง D มากเกินไปอิเล็กตรอนชุดที่สองจะไม่สามารถเพิ่มพลังงานให้กับตัวเองในสนามไฟฟ้าได้มากพอในการไอออไนส์ ดังนั้นทั้งสองกรณีนี้จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าพังทลายที่มีค่าค่อนข้างสูง พิจารณาลักษณะการ โกลว์ดีสชาร์จ์จิงภาพประกอบที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ลักษณะการ โกลว์ดีสชาร์จ์ระหว่างขั้วอิเล็กโทรด

ที่มา: Milton Ohring. (2002). *Materials Science of Thin Films*. p 151.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.11 วิธีระเหยสาร (Evaporation)

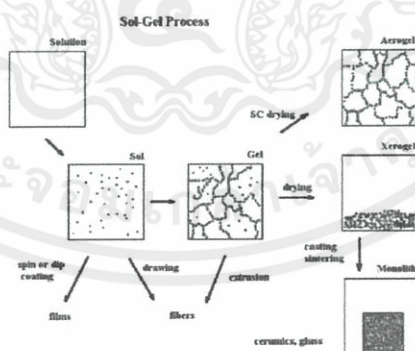
การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสารเป็นการทำให้สารเคลือบระเหยเป็นไอด้วยความร้อนในสุญญากาศ (ความดันประมาณ 10^{-6} mbar ซึ่ง $1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2$) อุณหภูมิที่ใช้มักอยู่ในช่วง $200 - 600 \text{ }^{\circ}\text{C}$ การลดความดันกระทำโดยใช้เครื่องสูญอากาศออกจากห้องสุญญากาศอย่างสม่ำเสมอที่ผิวของฐานรองรับและเกิดขึ้นกับตำแหน่งและจัดเรียงฐานรองรับนั้น

2.5.12 วิธีระเหยสารด้วยอัลตราโซนิก (Ultrasonic Evaporation)

การใช้วิธีอัลตราโซนิกสั่นสารที่ต้องการจะเคลือบบนกระจกสไลด์เพื่อให้โมเลกุลของสารเกิดการแตกตัวทำให้ได้ฟิล์มบางและใช้งานได้จริงแต่อาจจะต้องใช้เวลาในการเคลือบนาน หลักการทำงาน คือ Piezoelectric transducer ที่ถูกแช่ไว้ในสารจะทำการเปลี่ยนความถี่สูงทางไฟฟ้า (มากกว่าหนึ่งล้านครั้งต่อวินาที) ให้เป็นความถี่สูงเชิงกลและจะพยายามสั่นให้สารเคลือบเกิดการสั่นตามความถี่สูงไปด้วยในขณะที่ทรานสดิวเซอร์สั่นทางบวกก็จะทำให้เกิดความดันสูงผลักดันคลื่นให้พื้นผิวน้ำละอองขนาดเล็ก (โดยเฉลี่ย 1 ไมครอน) หลุดลอยออกมาอย่างรวดเร็วเป็นจำนวนมากจนเกิดเป็นไอขึ้นไปเคลือบบนฐานรองรับ

2.5.13 วิธีการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสารละลายโซลเจล (Sol – gel method)

การเตรียมสารละลายโซลเจลจะเป็นการเจือสารที่ต้องการและกวนให้เข้ากันโดยใช้เครื่องกวนสารพร้อมทั้งให้ความร้อนเพื่อที่จะทำให้สารแตกตัวและจับตัวกันเป็นสารตัวใหม่ที่ต้องการซึ่งวิธีสารละลายโซลเจลนี้มีขั้นตอนในการเตรียมสารที่ไม่ยุ่งยาก สามารถทำในระบบที่ไม่ใช้ระบบสุญญากาศได้ สามารถควบคุมปริมาณการเจือสารและใช้ต้นทุนต่ำเมื่อเตรียมสารเรียบร้อยแล้วมีเทคนิคที่นำสารที่เตรียมได้ไปเคลือบเป็นฟิล์มบาง อาทิ เช่น การหมุนเคลือบ การจุ่มเคลือบและการพ่นเคลือบ เป็นต้น แสดงผังรูปที่ 2.10

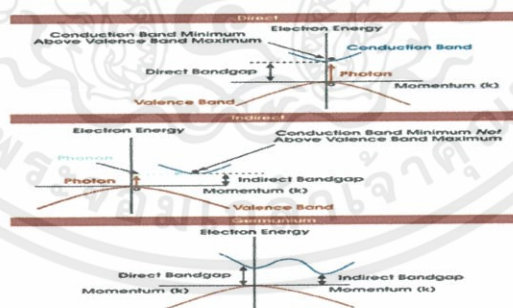


รูปที่ 2.10 วิธีการเตรียมสารละลายด้วยวิธีสารละลายโซลเจล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ที่มา: Thai nation research repository
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าแถบพลังงานต้องห้ามแล้วเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหันขอบลักษณะนี้ เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสง (Absorption Edge) พลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่ขอบการดูดกลืนแสง มีค่าเท่ากับความต่างของจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันและจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนอนจะให้ค่าแถบพลังงานต้องห้าม (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำซึ่งการเขียนกราฟเช่นนี้ เรียกว่า การเขียนกราฟแบบเทาซ์ (Tauc's plot) ซึ่งการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่นของอิเล็กตรอน (Wave number) แสดงด้วยเวกเตอร์ k ในแผนภาพแสดงลักษณะของแถบพลังงานแนวแกนอน คือ เลขคลื่น k และแนวแกนตั้งคือพลังงานของอิเล็กตรอน เนื่องจากโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$ ดังนั้นแนวแกนอน คือ ค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอน เมื่อเขียนแผนภาพของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ k จะได้แผนภาพดังรูปที่ 2.8 ถ้าการดูดกลืนแสงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่มีค่า k เท่ากัน เรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดตรง (Direct absorption) แต่ถ้าจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันมีค่า k ไม่ตรงกัน ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนเพื่อดูดกลืนแสงจะต้องอาศัยโฟตอนช่วย โดยอิเล็กตรอนต้องมีการดูดความร้อนจากโครงผลึกหรือคายความร้อนให้แก่โครงผลึก เรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดไม่ตรง (Indirect absorption)



รูปที่ 2.11 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน

ที่มา : Thai nation research repository

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (T) ดังสมการ

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.1)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient)

T = สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmittance)

I_0 = ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง

I_t = ความเข้มแสงทะลุผ่าน

d = ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงจากสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสงสำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงกับค่าพลังงานแถบต้องห้ามซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลาแถบพลังงานต้องห้ามของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง มีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่า

$$\alpha h\nu \sim (h\nu - E_g)^\gamma \quad (2.2)$$

เมื่อ $\gamma = \frac{1}{2}$ สำหรับแถบยินยอมที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง (Direct allowed transition)

$= \frac{3}{2}$ สำหรับแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง (Direct forbidden transition)

$= 2$ สำหรับแถบยินยอมที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบอ้อม (Indirect allowed transition)

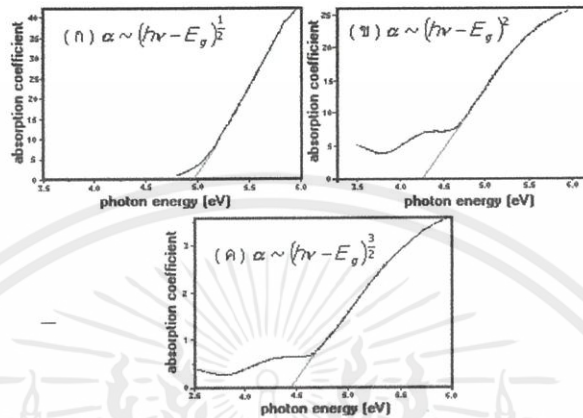
$= 3$ สำหรับแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบอ้อม (Indirect forbidden transition)

กล่าวคือสามารถคำนวณหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามซึ่งมีแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง ($\gamma = \frac{3}{2}$) ได้จากการเขียนกราฟแบบแท่งและคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงและพลังงานโฟตอน โดยการแทนค่า γ ได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$(\alpha h\nu)^{\frac{2}{3}} = \left[\left(-\frac{1}{d} \ln T \right) h\nu \right]^{\frac{2}{3}} = h\nu - E_g \quad (2.3)$$

ตัวอย่างกราฟพลังงานโฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง ที่ค่า γ ต่างๆ แสดงดังรูป



รูปที่ 2.12 กราฟพลังงานโฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงที่ค่า γ ต่างๆ

2.7 เครื่องมือการเตรียมสารละลายเชิงคอลลอยด์ที่เจือด้วยทองแดง(ZnO:Cu)

2.7.1 เครื่องชั่งสารแบบละเอียด

ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องชั่งสารแบบละเอียดที่มีความละเอียดถึงทศนิยม 3 ตำแหน่ง

ดังรูปที่



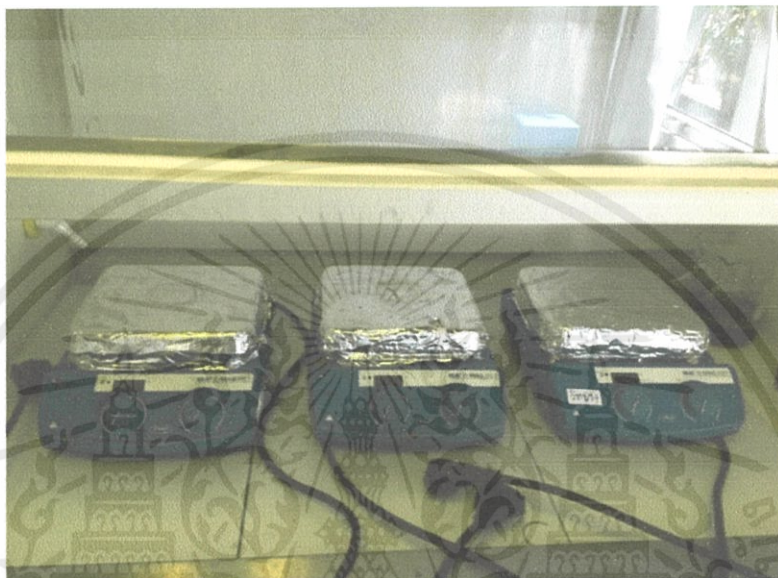
รูปที่ 2.13 เครื่องชั่งสารแบบละเอียดทศนิยม 3 ตำแหน่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7.2 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน

(Magnetic stirrer with hot plate)

หลักการการทำงานของเครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อนจะใช้ร่วมกับลูกกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar) และมีปุ่มปรับระดับความร้อนและความเร็วรอบในการหมุนและวัดอุณหภูมิในรูปขององศาเซลเซียส ดังรูปที่ 2.14

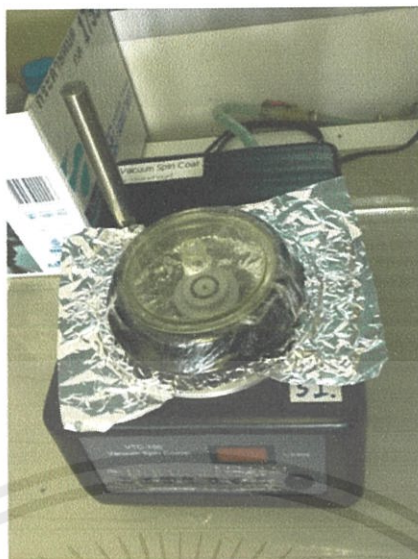


รูปที่ 2.14 เครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กพร้อมให้ความร้อน

2.7.3 เครื่องหมุนเคลือบ (Spin coating)

เทคนิคหมุนเคลือบเป็นเทคนิคที่ใช้กันในช่วงหลายปีที่ผ่านมา โดยมีเครื่องหมุนเคลือบที่ใช้ประยุกต์ทำฟิล์มบางได้ โดยมีขั้นตอนการทำงานดังนี้ 1.หยดสารละลายที่ต้องการเคลือบลงบนฐานรองรับที่ถูกดูดให้เป็นสุญญากาศติดอยู่บนฐานรองรับ 2.ให้ฐานรองรับหมุนตัวด้วยความเร็วที่ไม่สูงมากประมาณ 10 – 20 วินาที เพื่อทำให้ของเหลวที่หยดลงบนผิวหน้ากระจายไปทั่วฐานรองรับ 3. หมุนเร็วขึ้นตามค่าที่ต้องการด้วยความเร็วสูง เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่เรียบอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งฐานรองรับและให้ได้ความหนาที่บางสม่ำเสมอขณะที่แผ่นฟิล์มบางโดยทั่วไปความหนาแน่นของการเคลือบจะขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนเคลือบและค่าความหนืดของของเหลวชนิดนั้นๆ ขั้นตอนต่อไป 4.นำฐานรองที่เคลือบสารเรียบร้อยแล้วไปทำให้แห้ง การระเหยเป็นการเอาตัวทำละลายออกและเหลือเป็นแผ่นฟิล์มบางเคลือบบนฐานรองรับดังรูปที่ 2.15 วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวก รวดเร็ว และสามารถควบคุมปริมาณสารได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.15 เครื่องหมุนเคลือบฟิล์มบาง

กระบวนการหมุนเคลือบประกอบด้วย การหยดสารละลายลงบนฐานรอง ซึ่งจะหมุนด้วยความเร็วสูงเพื่อทำให้ของเหลวบางลงและระเหยเอาตัวทำละลายออกด้วยความร้อนเพื่อทำให้สารละลายได้เป็นฟิล์มบางมีสองกระบวนการ คือ Static dispense และ Dynamic dispense

1. Static dispense เป็นวิธีการง่ายๆ โดยการหยดสารละลายลงบนฐานรองในขณะที่ยังไม่หมุน ประมาณ 1 – 10 cc ซึ่งขึ้นอยู่กับความหนืดของสารละลายและขนาดของฐานรองที่ใช้ในการเคลือบ ความหนืดสูงและฐานรองที่กว้างๆเป็นรูปแบบที่เหมาะสมในการหยดสารละลายซึ่งมีความสัมพันธ์ระหว่างการหมุนด้วยความเร็วสูง

2. Dynamic dispense เป็นการหยดสารละลายในขณะที่ฐานรองกำลังหมุนอย่างช้าๆด้วยความเร็วประมาณ 500 รอบ/นาที การกระจายของสารละลายทั่วฐานรองทำให้สิ้นเปลืองสารละลายน้อยกว่า เนื่องจากไม่ต้องหยดสารละลายในปริมาณมากๆทั่วๆพื้นผิวของฐานรอง

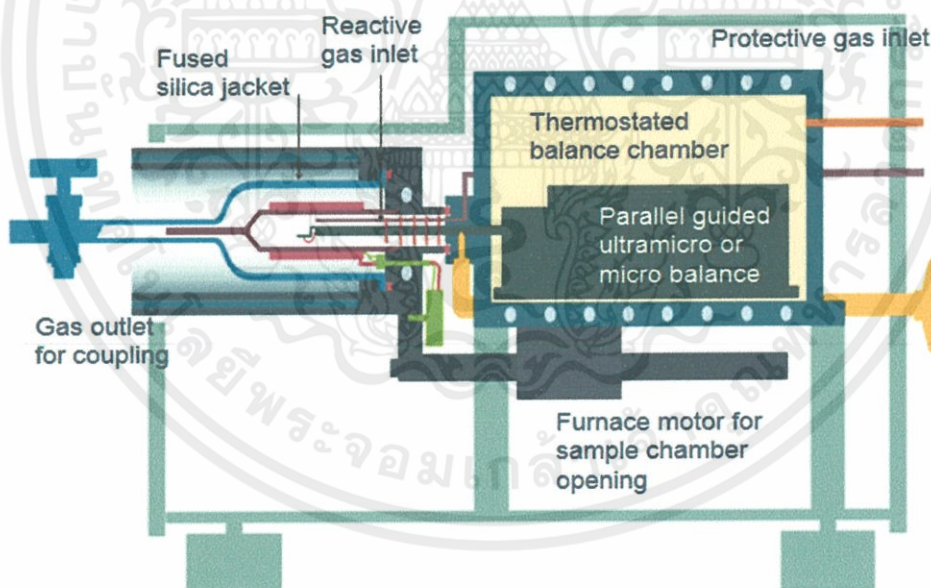
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

2.8.1 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

(Thermogravimetric/Differential Thermal Analysis TG/DTA)

เครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อนหรือ Thermogravimetric Analysis เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อนของวัสดุต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิโดยใช้การวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวและความละเอียดสูงในสภาวะแวดล้อมที่ผู้ทดลองกำหนดสามารถใช้ในการศึกษาสมบัติของตัวอย่างได้หลากหลายชนิด ทั้งตัวอย่างในกลุ่มเซรามิก (Ceramic) โพลีเมอร์ (Polymer) หรือ สารอินทรีย์ (inorganic) ต่างๆได้ สามารถวิเคราะห์หาจุดหลอมเหลว การสูญเสียน้ำหนัก หาสารเจือปนในตัวอย่าง รวมไปถึงการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงเฟสของตัวอย่างเมื่อได้รับความร้อนได้อีกด้วย นอกจากนี้จะสามารถแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักต่ออุณหภูมิ (TG curve) แล้วยังสามารถแสดงกราฟการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ (DTA) โดยใช้การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของตัวอย่างเทียบกับอุณหภูมิของห้องเผา นอกจากนี้ยังสามารถทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารที่สลายตัวได้ทั้งแบบความสัมพัทธ์ หรือ น้ำหนักจริง และสามารถบอกถึงอุณหภูมิเริ่มต้นของการเผาไหม้ได้ สามารถเปลี่ยนชนิดแก๊สอัตโนมัติเมื่อถึงอุณหภูมิที่ได้ตั้งไว้



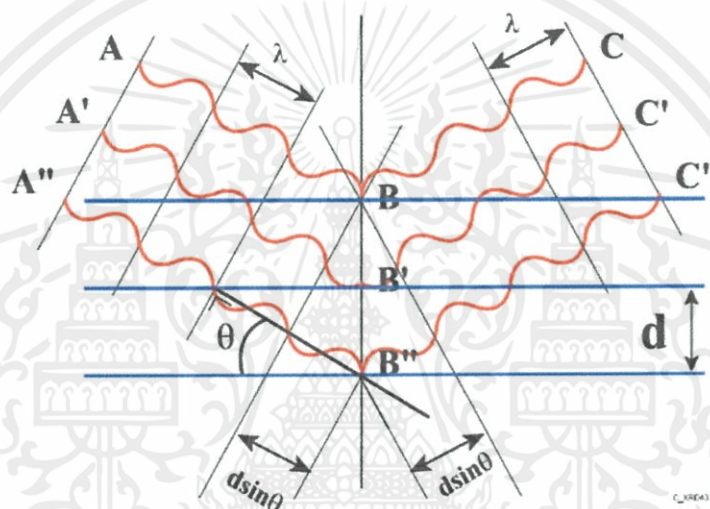
รูปที่ 2.16 โครงสร้างภายในของเครื่องมือวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.2 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

(X-ray Diffractometer XRD)

เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ที่ไม่ทำลายสารตัวอย่าง (Non-destructive method) โดยใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่ตกกระทบหน้าผลึก ของสารตัวอย่างที่มุมต่าง ๆ กัน ผลการวิเคราะห์ที่ได้จะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลมาตรฐานเพื่อระบุวิฤภาคองค์ประกอบของสารตัวอย่างซึ่งวัสดุที่เป็นผลึกคือวัสดุที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมภายในโครงสร้างอย่างเป็นระเบียบ การจัดเรียงตัวของอะตอมภายในผลึกจะมีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรงขนานกันแต่ละระนาบจะอยู่ห่างกันเป็นระยะ d ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งค่าระยะห่าง d จะมีค่าแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับธรรมชาติของผลึกจะเป็นไปตามกฎของ Bragg ดังสมการที่ 2.4



รูปที่ 2.17 กฎของ Bragg

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (2.4)$$

ซึ่งการเกิดรังสีเอ็กซ์จะถูกสร้างขึ้นภายในหลอดปิดซึ่งอยู่ภายใต้สภาวะสุญญากาศโดยให้กระแสไฟฟ้าแก่เส้นลวดฟิลาเมนต์ (Filament) ที่อยู่ในหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ซึ่งจะทำให้เส้นลวดร้อนขึ้นและก่อให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนออกจากเส้นลวด อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์สูง ทำให้เคลื่อนที่เส้นลวดฟิลาเมนต์ที่เป็นขั้วแคโทดด้วยความเร็วสูงเข้าชนขั้วแอโนดซึ่งโดยทั่วไปทำจากโลหะทองแดง อิเล็กตรอนที่พุ่งเข้าชนจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนวงในสุด (K-shell) ของอะตอมทองแดงหลุดออกไปจึงเกิดเป็นช่องว่างขึ้นเป็นผลให้อิเล็กตรอนวงนอกที่อยู่ถัดมา (L- และ M- ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้คิดเปล่งเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

shell) เกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานลงมาแทนที่ช่องว่างนั้น โดยการคายรังสีเอ็กซ์ออกมา รังสีเอ็กซ์ที่คายออกมาจะผ่านออกจากหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ไปยังสารตัวอย่างและรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนออกจากสารตัวอย่างจะถูกตรวจจับด้วยอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์สมการที่ (2.4) เรียกว่า กฎของแบรกก์ในทางผลึกวิทยา (Crystallography) สามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่างๆ โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (h k l) ซึ่งค่า hkl เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) เป็นเลขจำนวนเต็มตั้งแต่ 0,1,2,... ระยะห่างระหว่างระนาบในชุดเดียวกันขึ้นอยู่กับดัชนีมิลเลอร์ (h k l) และค่าคงที่ของโครงผลึก (a, b, c, α , β , γ) ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกจะมีต่างกันไปตามระบบผลึกแบบต่างๆ ในกรณีอย่างง่าย เมื่อพิจารณาผลึกที่มีโครงสร้างแบบคิวบิก (Cubic) ซึ่งมีค่าคงที่โครงผลึกดังนี้ $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ จะได้ความสัมพันธ์ดังนี้

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

จากสมการ (2.5) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการ (2.6) จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างของระนาบกับค่าคงที่ของโครงผลึกดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.6)$$

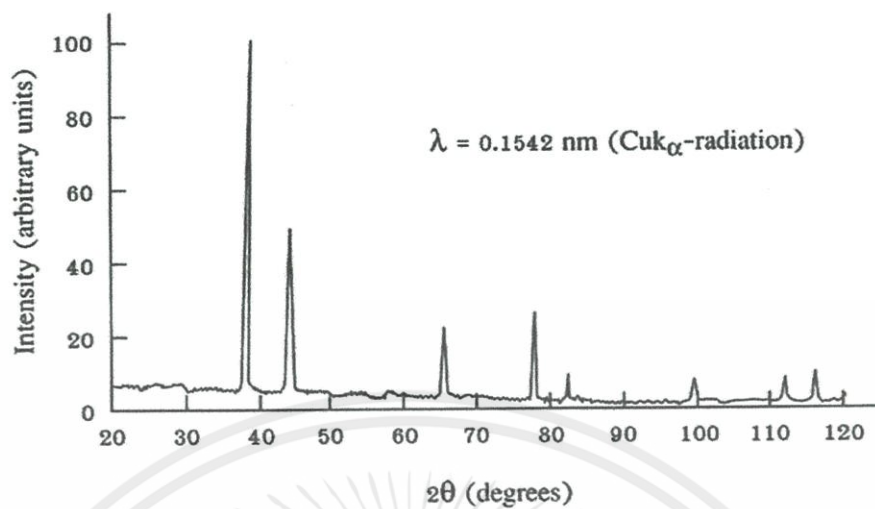
เมื่อ a คือ ค่าคงที่แลตทิซ

λ คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

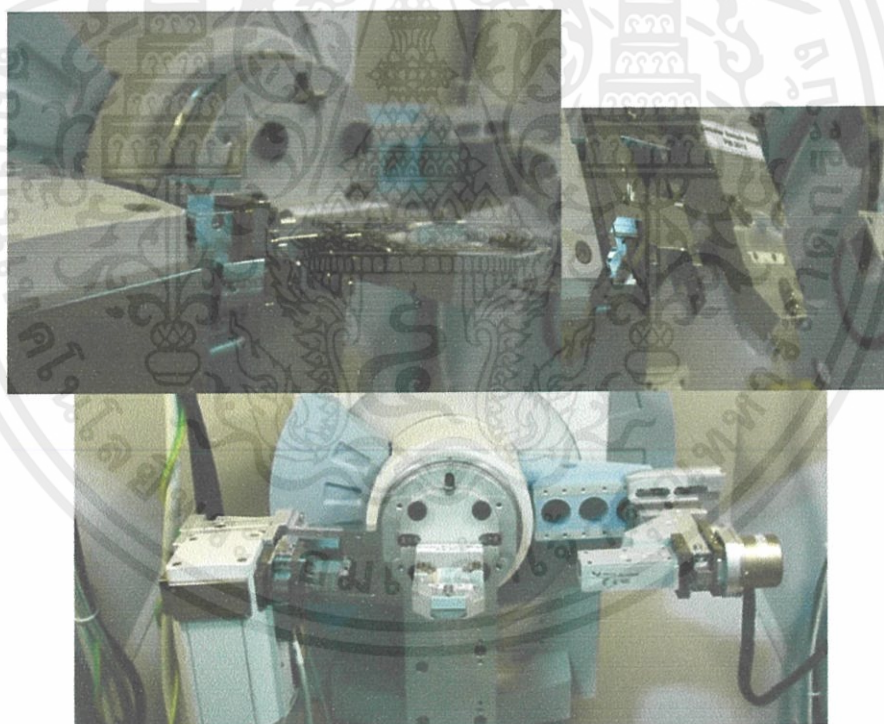
θ คือ มุมของการเลี้ยวเบน

ระนาบต่างๆ ในผลึกไม่ได้ก่อให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อนเมื่อนำฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมา ไปวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาค่าทั้งสองจะนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุมเลี้ยวเบนที่ได้ เรียกว่า แบบอย่างการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะมีลักษณะเฉพาะสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน เมื่อได้ข้อมูลดังกล่าวมาแล้วก็จะสามารถคำนวณหาค่าคงที่ของโครงผลึก รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงดังรูปที่ 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุแต่เปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.19 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8.3 การวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องยูวีวิซิเบิลสเปกโทรสโกปี

(UV – VIS Spectrophotometry)

การวิเคราะห์สมบัติทางแสง โดยใช้เทคนิคการทะลุผ่านของแสง ด้วยเครื่อง UV – VIS Spectrophotometry จะเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณของสารอินทรีย์ในปัจจุบันเป็นเทคนิคที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายและได้กลายมาเป็นเครื่องมือวิเคราะห์ที่สำคัญในปัจจุบัน เป็นเทคนิคที่ง่าย มีความรวดเร็ว มีความแม่นยำสูง และใช้ค่าใช้จ่ายไม่สูงอีกด้วย เทคนิคนี้เลือกใช้แสงในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ความยาวคลื่น 380 – 800 นาโนเมตร) และ ช่วงแสงที่ตามองเห็น (ความยาวคลื่น 380 – 700 นาโนเมตร) อาศัยกระบวนการดูดกลืนและการส่งผ่านของแสงโดยเมื่อแสงผ่านไปยังตัวอย่าง ตัวอย่างจะมีการดูดกลืนแสงบางส่วนไว้และแสงที่ไม่ถูกดูดกลืนก็จะสามารถผ่านตัวอย่างออกไปได้ ซึ่งช่วงแสงที่ถูกตัวอย่างดูดกลืนไว้จะเป็นการแสดงถึงสมบัติทางแสงของตัวอย่างนั้น กล่าวคือตัวอย่างแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการดูดกลืนแสงในช่วงที่ไม่เท่ากัน ดังนั้นข้อมูลที่ได้ออกมานั้นแสดงถึงสมบัติเฉพาะตัวของตัวอย่างนั้นด้วย เทคนิคก็สามารถใช้ยืนยันตัวอย่างได้เบื้องต้นเท่านั้น องค์ประกอบสำคัญของเครื่อง UV-Vis Spectroscopy แบ่งออกได้เป็น

1. Source หรือแหล่งกำเนิดแสงซึ่งให้กำเนิดแสงในช่วง UV และ visible โดยแหล่งกำเนิดแสงในช่วง UV ได้แก่ deuterium หรือ hydrogen lamps ซึ่งจะให้แสงในช่วง 160 - 375 นาโนเมตร ส่วนแหล่งกำเนิดแสงในช่วง visible จะนิยมใช้ tungsten filament lamp หรือ tungsten/halogen lamp ซึ่งจะให้แสงในช่วง 350 – 2500 นาโนเมตร
2. Monochromator (Wavelength Selector) ทำหน้าที่แยกสีแสงจากแหล่งกำเนิดแสง โดยแสงจะผ่านเข้าที่ entrance slit และจะถูกแยกด้วย grating หรือ prism จากนั้นแสงที่มีความยาวคลื่นหนึ่ง ๆ เท่านั้นจะออกจาก Monochromator โดยผ่านทาง exit slit
3. Detector เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจวัดแสงที่ผ่านสารตัวอย่างออกมา โดย detector ที่ใช้มีหลายชนิดได้แก่
 - a. Photomultiplier tube เป็น detector ที่ไวต่อแสงทั้งในช่วง UV และ visible โดยสามารถตรวจวัดได้อย่างรวดเร็ว และตรวจวัดสารที่มีปริมาณต่ำ ๆ ได้ดี ในช่วงความยาวคลื่น 190 – 900 นาโนเมตร
 - b. Photodiode array detector เป็น detector ที่สามารถตรวจวัดในทุกความยาวคลื่นของแสงได้ในเวลาเดียวกัน โดยมีราคาถูกและตรวจวัดได้ตั้งแต่ช่วง 190 – 1100 นาโนเมตร

นอกจากการวิเคราะห์ในรูปแบบสารละลายแล้ว เทคนิคนี้ก็ยังสามารถประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ตัวอย่างในรูปของแข็งได้อีกด้วย เช่น การตรวจสอบวัสดุพอลิเมอร์ เช่น พลาสติก กระจก แก้ว ผ้า การตรวจสอบเพชร พลอย การวิเคราะห์ทางด้านโปรตีน DNA RNA การวิเคราะห์ด้านสี ด้านอาหาร และด้านสิ่งแวดล้อม เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



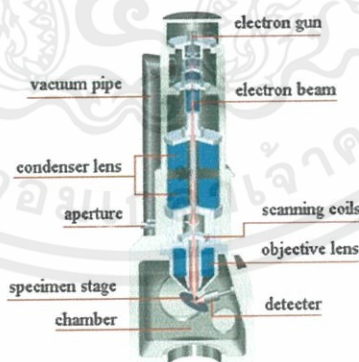
รูปที่ 2.20 เครื่อง UV-Vis spectroscopy

2.8.4 การวิเคราะห์เชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM)

เรียกโดยย่อว่า SEM หรือในภาษาไทยเรียกว่า กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ใช้อิเล็กตรอนในการสร้างภาพขยายเช่นเดียวกับเครื่อง Transmission Electron Microscopy แต่มีความแตกต่างในรายละเอียดของกระบวนการในการสร้างภาพอย่างมาก เครื่อง SEM เครื่องแรกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงทศวรรษที่ 1960 จากนั้น เครื่อง SEM ก็ค่อยๆ กลายเป็นเครื่องมือที่นำไปประยุกต์ใช้แพร่หลายทั่วไป ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี การแพทย์ อุตสาหกรรม นิติวิทยาศาสตร์ โบราณคดี และอื่นๆอีกหลายด้าน ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกสร้างขึ้นโดยใช้ Electron Gun จากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกโฟกัสให้เข้มข้นและเส้นผ่านศูนย์กลางเล็กลงโดย Condenser Lens จากนั้นจะถูกโฟกัสให้ตกลงบนผิวตัวอย่าง โดย Objective Lens ซึ่ง ณ ตอนนี้อิเล็กตรอนที่ตกลงบนผิวตัวอย่างจะเป็นเพียงจุดที่เล็กมาก Scan Coil จะควบคุมการกวาดของลำอิเล็กตรอนให้กวาดจากซ้ายไปขวา เมื่อสุดก็เลื่อนลงอีกชั้นและกวาดจากซ้ายไปขวาอีกครั้ง เป็นเช่นนี้จนครบเฟรม การกวาดลำอิเล็กตรอนเช่นนี้เรียกว่า Raster scan และเมื่อครบเฟรม แล้วก็จะไปเริ่มสแกนที่จุดแรกใหม่ ในการกวาดลำอิเล็กตรอนในแต่ละเฟรม จะถูกกำหนดจำนวนจุดและแถวไว้อย่างแน่นอน โดยในภาพตัวอย่าง 1 เฟรม ตามเส้นตามแนวนอนจะประกอบด้วยจุด 1000 จุด และมีทั้งหมด 1000 เส้น ที่ผิวตัวอย่างที่อิเล็กตรอนตกใส่ จะเกิดสัญญาณอิเล็กตรอนขึ้นหลายรูปแบบซึ่งคล้ายกับการที่แสงตกกระทบวัตถุและสะท้อนออกจากผิววัตถุ ในที่นี้ถ้ากล่าวอย่างง่ายว่าถ้าผิวตัวอย่างเรียบก็จะให้สัญญาณสะท้อนอิเล็กตรอนได้ดี แต่ถ้าผิวตัวอย่างเป็นหลุมลึกก็จะไม่ให้สัญญาณหรือให้ได้น้อย ซึ่งเราสามารถรับสัญญาณได้โดยใช้ตัวตรวจจับที่เหมาะสม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับชนิดของสัญญาณ สัญญาณที่ได้จะนำมาขยายให้มีความแรงที่เหมาะสมแล้วนำมาสร้างเป็นภาพถ้าเราใช้หลอดรังสีแคโทด (Cathod ray tube, CRT) เพื่อแสดงภาพ ในหลอดรังสีแคโทดจะมีการสร้างลำอิเล็กตรอนและถูกบีบให้เป็น ลำเล็กๆ แต่มีเส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่าในกล้องของเครื่อง SEM มาก กล่าวคือในเครื่อง SEM ลำอิเล็กตรอนมีขนาดศูนย์กลางในระดับนาโนเมตร แต่ในจอภาพมีขนาดศูนย์กลางประมาณ 0.1 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของลำอิเล็กตรอนของเครื่อง SEM ต่อจอภาพจะพบว่าห่างกันถึง 20000 เท่า ทำให้เกิดเป็นอัตราส่วนของกำลังขยายที่จะให้ภาพที่มีรายละเอียดได้ดีซึ่งจะได้กล่าวต่อไป การสแกนในจอภาพจะถูกควบคุมให้มีการสแกนแบบ Raster scan พร้อม ๆ กับการสแกนของลำอิเล็กตรอนในกล้อง ขณะเดียวกันความสว่างของจุดอิเล็กตรอนในจอภาพจะขึ้นอยู่กับความแรงของสัญญาณจาก Amplifier ที่ขยายสัญญาณจากตัวตรวจจรับสัญญาณอิเล็กตรอนในกล้อง ถ้าสัญญาณแรงก็จะให้ความสว่างของลำอิเล็กตรอนมาก เมื่อส่งลงบนจอภาพก็จะปรากฏเป็นจุดสว่าง ในทางกลับกันถ้าสัญญาณเบาก็จะได้จุดที่มีความสว่างน้อยบนจอภาพก็จะปรากฏเป็นจุดสว่างน้อยด้วย บนจอภาพจะทำการเรียงจุดของสัญญาณที่ได้นี้เป็นแถวจนครบเฟรมก็จะได้เป็นภาพออกมา ถ้านบนจอภาพมีขนาดกว้างและยาวเป็น 20 เซนติเมตร และเรากำหนดการกวาด ลำอิเล็กตรอนในกล้อง ให้ 1 เฟรมมีพื้นที่ขนาด กว้างยาวเป็น 20 เซนติเมตรด้วย อัตราส่วนการขยายของภาพก็จะ เป็น 1 เท่า แต่ถ้าเราให้การกวาดลำอิเล็กตรอนในกล้องเป็นพื้นที่ 1×1 เซนติเมตร ก็จะขยายภาพเป็น 20 เท่า แต่ในความเป็นจริงขนาดของการสแกน 1 เฟรมในกล้องอาจควบคุมให้เล็กมากถึงระดับ ไมโครเมตร โดยที่การสแกนบนหน้าจอยังเท่าเดิม ดังนั้นการขยายจึงได้ถึงระดับหมื่นเท่าอิเล็กตรอนจาก Column ของเครื่อง SEM เราเรียกว่า Primary Electron เมื่อตกกระทบผิวตัวอย่างจะมีสัญญาณหลายอย่างเกิดขึ้น แต่พอจะแบ่งเป็นกลุ่มได้สองกลุ่มคือ Inelastic scattering และ Elastic scattering ซึ่งมีส่วนประกอบพื้นฐานของ SEM ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.21 แผนภาพแสดงส่วนประกอบของเครื่อง SEM ที่เป็นจุดกำเนิดภาพ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun)

อยู่ด้านบนสุดของ Column ซึ่งต่อกับสายไฟฟ้าแรงสูงที่ต่อจากหม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงซึ่งแปลงจาก 110 โวลต์ หรือ 220 โวลต์ เป็นไฟฟ้าที่มีความดันไฟฟ้าสูงคือระหว่าง 1-30 กิโลโวลต์ ซึ่งเพียงพอสำหรับ SEM แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนประกอบด้วยลวดโลหะ Tungsten ที่บิดเป็นรูปตัววี เรียกว่า Filament และล้อมด้วยโลหะรูปกรวย (Wehnelt cylinder) มีรูอยู่ปลายกรวยเมื่อกระแสไฟฟ้าตั้งแต่ 1000 โวลต์ จะไปเข้ามาสู่ Filament ลวดตัววีดังกล่าวก็จะมีความร้อนสูงประจุอิเล็กตรอนก็จะกระจาย ออกมาในสภาวะสุญญากาศภายใน Column ประจุอิเล็กตรอนซึ่งเป็นประจุลบจะถูกดึงดูดด้วยแผ่นขั้วบวก (Anode plate) ที่อยู่ด้านล่างของ Electron gun ประจุอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะถูกดึงผ่านรูของกรวยไปยังทิศทางที่กำหนด คือ บริเวณสนามแม่เหล็กที่สามารถรวบรวมประจุอิเล็กตรอนที่มีอยู่ให้เป็นลำแสงอิเล็กตรอนที่มีความหนาแน่นเพียงพอสำหรับฉายลงบนตัวอย่าง Electron gun ซึ่งมี filament และ Wehnelt cylinder อยู่ภายในสามารถทำให้ยับเยินได้ด้วยสกรูที่อยู่รอบๆ ด้านนอก Electron gun ทั้งนี้เพื่อปรับให้ Electron gun อยู่ในแนวตรงได้ ศูนย์กลางหรือตั้งฉากกับสนามแม่เหล็กของเลนส์สนามแม่เหล็กภายใน Column ใน SEM สมัยใหม่นอกจากจะมีปุ่มหรือสกรูที่ช่วยปรับ Electron gun ให้ได้ศูนย์แล้วยังมีขดลวดที่มีสนามแม่เหล็กไฟฟ้าบริเวณแผ่นขั้วบวกเพื่อจะช่วยปรับลำแสงอิเล็กตรอนให้อยู่ศูนย์กลางของสนามแม่เหล็กในเลนส์ชุดแรกขดลวดดังกล่าวเรียกว่า Alignment coil ซึ่งสามารถควบคุมและปรับได้ตามต้องการ โดยหมุนและปรับปุ่ม (Alignment knobs) บนแผงของ Console Unit เหตุที่ต้องปรับ Electron gun ก็เพื่อให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีความสมบูรณ์เป็นรูปทรงกระบอกที่ไม่บิดเบี้ยวหรือเบี่ยงออกไปจากศูนย์กลางหากมีการบิดของลำแสงอิเล็กตรอนออกนอกทิศทางอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) บางส่วนจะถูกกั้นออกไปซึ่งมีผลกระทบต่อปริมาณของอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron)

2. เลนส์ควบคุมลำแสงอิเล็กตรอนพร้อมขดลวดขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอน (Electromagnetic Lens & Scan coils)

เป็นชุดอุปกรณ์ที่ทำงานร่วมกันทำหน้าที่รวบรวมอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้เป็นลำแสงรูปกรวยที่เล็กที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ลำแสงดังกล่าวไปตกกระทบ บนผิวตัวอย่างและจะใช้สนามแม่เหล็กขับหรือผลักให้ลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิเคลื่อนไปบนผิวตัวอย่างในแนวที่ต้องการเป็นบริเวณรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสเลนส์แต่ละชุดมี Aperture ซึ่งเป็นโลหะประเภททองขาวทองเหลืองมีรูปลักษณ์ต่าง ๆ กัน (50 – 400 μm) และสามารถเปลี่ยนได้ตามขนาดที่ต้องการ Aperture ดังกล่าวมักจะจัดไว้ในเลนส์แต่ละชุดภายในบริเวณที่ไร้สนามแม่เหล็กของเลนส์ Aperture เหล่านี้ ทำหน้าที่กำหนดให้ลำแสงอิเล็กตรอนที่ผ่านสนามแม่เหล็กของเลนส์แต่ละชุดให้มีรูปกรวยที่สมมาตร Aperture ของเลนส์ชุดสุดท้ายก่อนที่ลำแสงอิเล็กตรอนจะมาสัมผัสกับตัวอย่างเป็น Aperture พิเศษเรียกว่า Objective Aperture มีไว้เพื่อกรองลำแสงอิเล็กตรอนให้เป็นรูปกรวยขนาดเล็กที่มีความสมมาตรที่สุดและกำหนดขนาดและปริมาณของอิเล็กตรอนให้กระทบจุดต่างๆ บนผิวตัวอย่างเพื่อให้ภาพที่มีความลึกมากกว่าปกติขดลวด

สนามแม่เหล็กไฟฟ้าที่ทำหน้าที่ขับเคลื่อนลำแสงอิเล็กตรอนปฐมภูมิให้ภาคไปบนผิวของตัวอย่างชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์นี้เรียกว่า Scan coils ซึ่งควบคุมโดยระบบไฟฟ้าและยังควบคุมการกวาดของลำแสงที่เป็นเส้นในจอร์บภาพ ให้เคลื่อนที่ไปในทิศทาง และเวลาเดียวกันกับลำแสงอิเล็กตรอน

3. ช่องใส่ตัวอย่างของเครื่อง SEM (specimen chamber)

เป็นช่องว่างใต้เลนส์สุดท้ายส่วนที่สำคัญของช่องใส่ตัวอย่างคือฐานวางตัวอย่างและปั๊มควบคุมโดยใช้เฟืองขนาดต่างๆเพื่อเลื่อนฐานนี้ให้เลื่อนไปมาภายในช่องตัวอย่างได้อย่างน้อย 6 ทิศทางฐานวางตัวอย่างที่มีส่วนประกอบและคุณสมบัติเหล่านี้ เรียกว่า (Goniometer stage)

4. อุปกรณ์รวบรวมสัญญาณ (Collector & Scintillator)

เป็นแท่งแก้วใสมีปลายมลทำด้วยพลาสติกทาบผิวด้วยอลูมิเนียมและส่วนปลายของแท่งนี้ล้อมด้วยตาข่ายโลหะที่ต่อกับวงจรไฟฟ้าประจุบวกขนาด 30-250 โวลต์ เพื่อดึงดูดประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิอันเกิดจากปฏิกิริยา ระหว่างประจุอิเล็กตรอนปฐมภูมิกระทบกับผิวของตัวอย่าง

5. อุปกรณ์สร้างภาพและถ่ายภาพ (Imaging & Photographic devices)

ทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงสัญญาณที่ได้รับเป็นภาพและภาพที่ปรากฏบนจอภาพพร้อมที่จะทำการบันทึกที่อุปกรณ์สร้างภาพประกอบด้วยท่อนำแสงและเครื่องขยายและเปลี่ยนสัญญาณอิเล็กตรอนให้เป็นแสงไฟฟ้าการสร้างภาพเริ่มจากประจุอิเล็กตรอนทุติยภูมิซึ่งประจุอิเล็กตรอนชุดนี้จะถูกจับและรวบรวมไว้แล้วนำสู่แท่งแก้วใส่ประเภทท่อนำแสงในลักษณะของแสงแสงที่ผ่านท่อแท่งแก้วนี้จะเคลื่อนไปสู่เครื่องขยายแสง (Photomultiplier) ซึ่งจะเปลี่ยนแสงชนิดโฟตอนนี้ไป อิเล็กตรอนอีกครั้งหนึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะผ่านเครื่องขยายให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าให้ปรากฏในจอภาพที่ติดตั้งไว้บน (Console unit)



รูปที่ 2.22 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

การปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง(ZnO:Cu) ที่ปลูกลงบนโบโรซิลิเกตในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการเคลือบด้วยสารละลาย โพลเจลด้วยเทคนิคหมุนเคลือบ (Spin coating) มาใช้ในการปลูกฟิล์มบางเนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่าย มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก ราคาถูก สามารถทำในระบบเปิด และสามารถควบคุมปริมาณการเจือสารได้

3.1 การเตรียมสารละลายซิงค์อะซิเตรทและคอปเปอร์อะซิเตรท

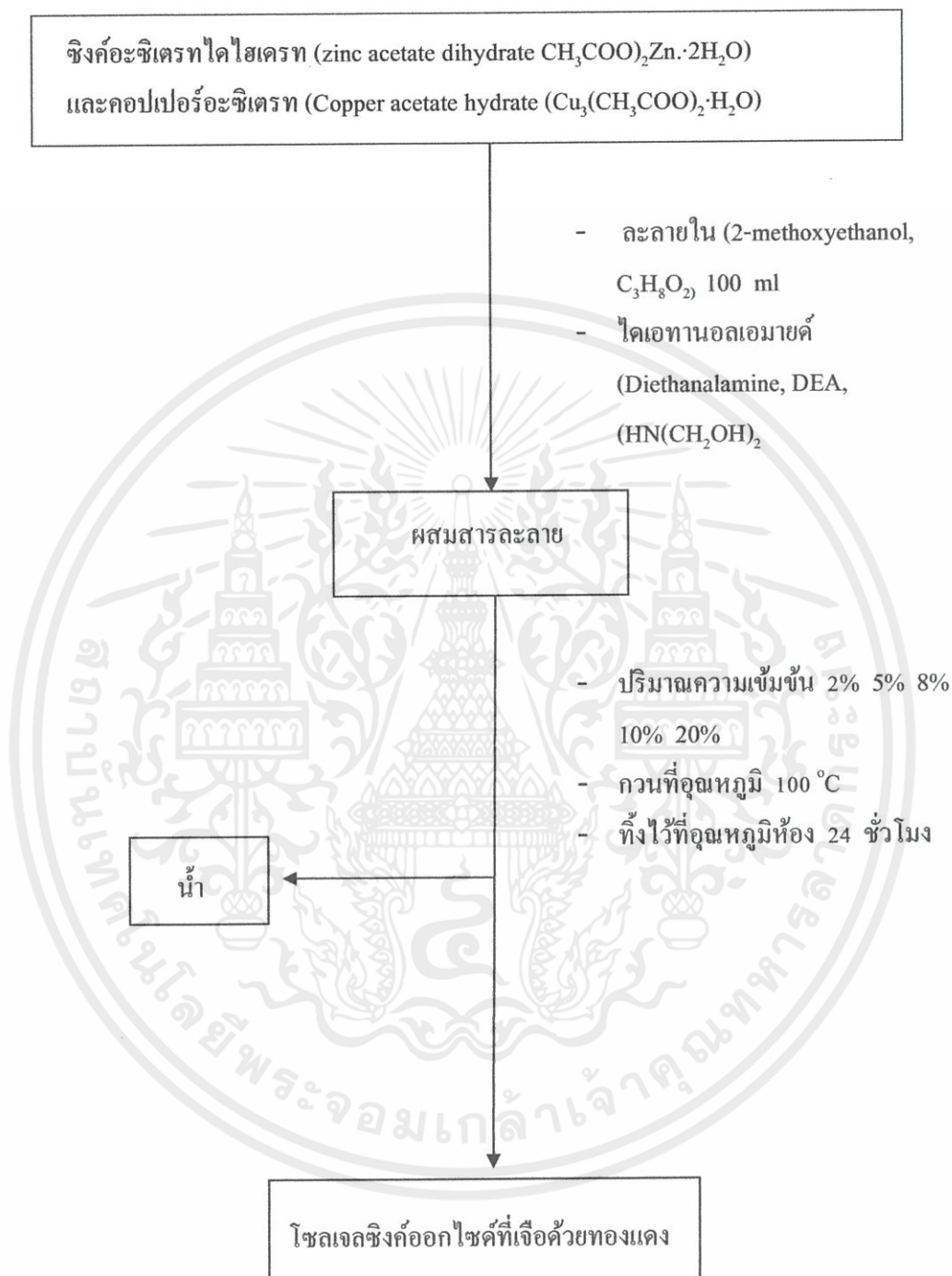
ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง โดยมีสารตั้งต้นดังนี้ ซิงค์อะซิเตรทไดไฮเดรต (zinc acetate dihydrate $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) คอปเปอร์อะซิเตรทไดไฮเดรต (Copper acetate dihydrate $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{COO})_4\cdot \text{H}_2\text{O}$) 2-เมททอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) และไดเอทานอล เอมาคด์ (Diethanalamine, DEA, $(\text{HN}(\text{CH}_2\text{OH})_2$ ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ปริมาณ 100 มิลลิลิตร สารละลายที่เตรียมขึ้นใช้ปริมาณทองแดงที่แตกต่างกันคือ 2% 5% 8% 10% และ 20% ฟิล์มที่เตรียมทั้งหมดจะถูกหมุนเคลือบบนฐานรองรับกระจกสไลด์ที่มีจำนวน 3 4 5 ครั้ง ในการหมุนเคลือบสารลงแผ่นกระจกสไลด์และแอนนัลที่อุณหภูมิต่างกัน คือ 400°C 450°C 550°C ในบรรยากาศปกติ ซึ่งแสดงขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางดังรูปที่ 3.1 และตารางแสดงปริมาณการเตรียมสารซิงค์อะซิเตรทและคอปเปอร์อะซิเตรท ดังตารางที่ 3.1

ตาราง 3.1 ปริมาณความเข้มข้นการเตรียมสารซิงค์อะซิเตรทและคอปเปอร์อะซิเตรท

ความเข้มข้นของสารตั้งต้น (%)	ซิงค์อะซิเตรท(g)	คอปเปอร์อะซิเตรท(g)
2%	10.755	0.199
5%	10.425	0.499
8%	10.096	0.788
10%	9.877	0.998
20%	8.780	1.990

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่งานวิจัยสำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรณีไปใช้

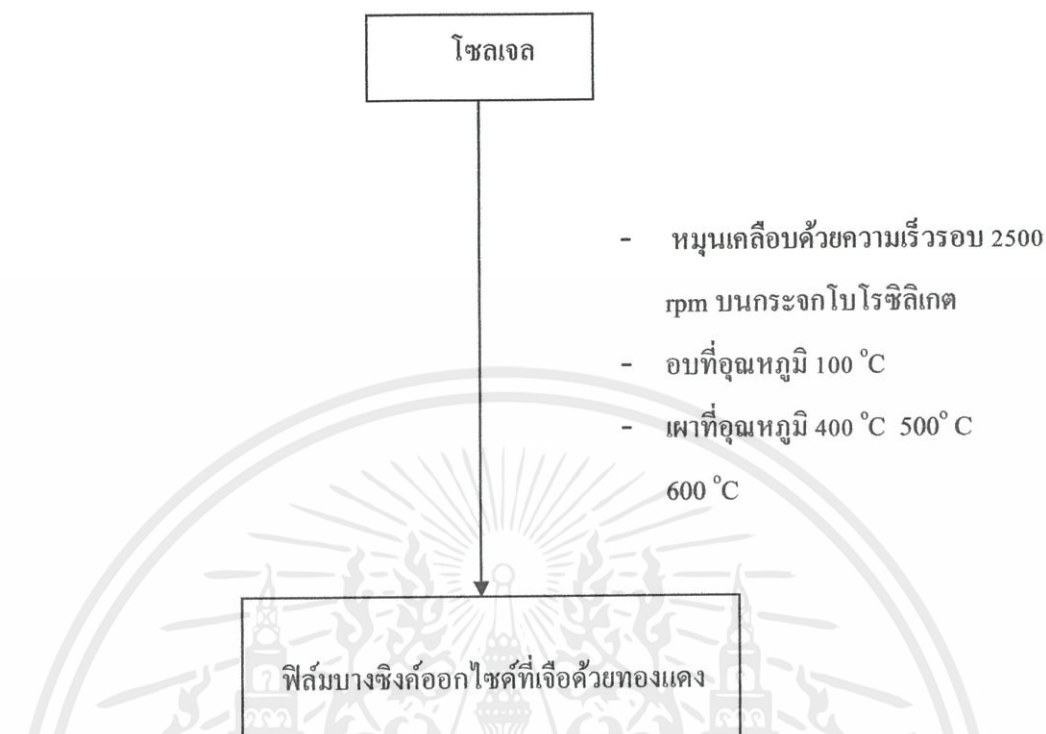
3.2 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมสารละลายซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง

นอกจากนี้งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลการเพิ่มประสิทธิภาพต่อการตอบสนองต่อรังสีอัลตราไวโอเลตของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงหลังจากนั้นนำฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงไปวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ (XRD) วิเคราะห์สมบัติเชิงพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน Scanning Electron Microscope (SEM) และวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวิเคราะห์การวัดการทะลุผ่านทางแสง (Uv-vis Spectroscopy)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 อุปกรณ์ในการทดลอง

1. กระจกโบโรซิลิเกต
2. เครื่องทำความสะอาดอัลตราโซนิก
3. ซิงค์อะซิเตทไดไฮเดรต (Zinc acetate dihydrate, $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
4. คอปเปอร์อะซิเตทไฮเดรต (Copper acetate hydrate, $\text{Cu}_2(\text{CH}_3\text{COO})_4\cdot \text{H}_2\text{O}$)
5. 2-เมทอกซีเอทานอล (2-methoxyethanol, $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$)
6. ไดเอทานอลเอมีน (Diethanalamine DEA, $(\text{HN}(\text{CH}_2\text{OH}))_2$)



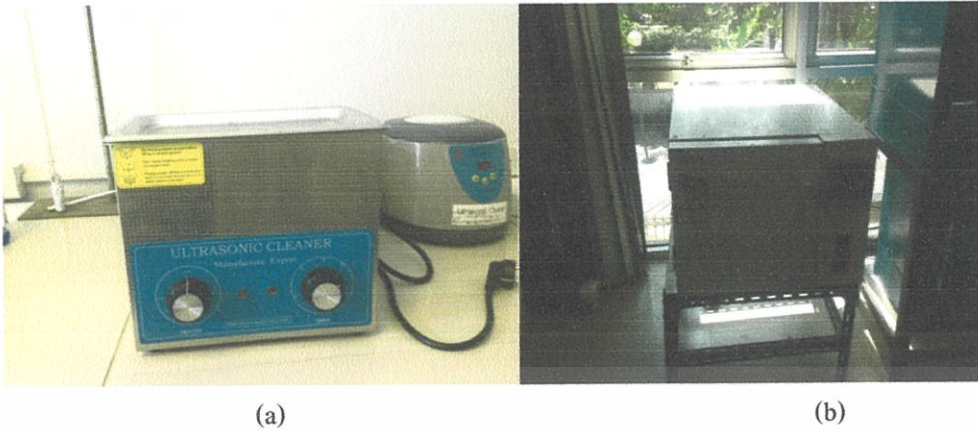
รูปที่ 3.3 (a) เครื่องชั่งสาร (b) สารละลายโซลเจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่เตรียมได้

3.5 การเตรียมกระจกสไลด์ที่ใช้ในการปลูกฟิล์มบาง

งานวิจัยนี้ใช้ฐานรองรับเป็นกระจกสไลด์ในการปลูกฟิล์มซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงมีขั้นตอนการเตรียมดังนี้

1. ตัดกระจกโบโรซิลิเกต กว้าง 2.5 เซนติเมตร ยาว 2.5 เซนติเมตร
2. ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน
3. ล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างด้วยน้ำปลอดประจุ (DI) ด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่อง อัลตราโซนิก 10 นาที
4. ล้างด้วยอะซิโตนด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที
5. ล้างด้วยเอทานอลบริสุทธิ์ 95% ด้วยเครื่องทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก 10 นาที
6. อบให้แห้งด้วยตู้อบความร้อนที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$

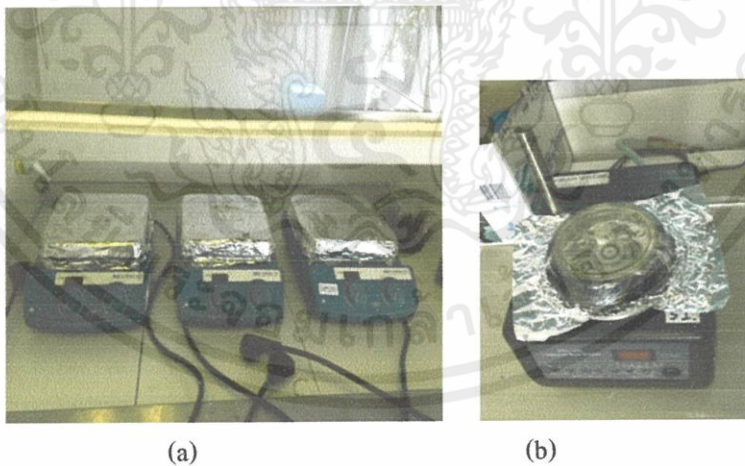
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 (a) เครื่องอัลตราโซนิก (b) เตาอบยูวี

3.6 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (spin coating)

1. นำกระจกสไลด์ที่เตรียมไว้มาอบที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 30 นาที
2. กำหนดความเร็วรอบและเวลาในการหมุน 2500 rpm
3. นำกระจกสไลด์ที่เคลือบสารแล้ว อบที่อุณหภูมิประมาณ 100°C เป็นเวลา 5 นาที
4. สำหรับฟิล์มบางนี้จะทำการเพิ่มจำนวนชั้นความหนาของฟิล์มที่อุณหภูมิ 400°C 450°C 550°C
5. นำไปแอนนัลที่อุณหภูมิต่างกันที่ 400°C 450°C 550°C ใช้เวลา 4 ชั่วโมง



รูปที่ 3.5 (a) เครื่องกวนสารแบบแม่เหล็กพร้อมแผ่นให้ความร้อน (b) เครื่องหมุนเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

3.7.1 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

(Thermogravimetric/Differential Thermal Analysis TG/DTA)

TGA เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุด้วยการวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัสดุ เมื่อได้รับความร้อนภายใต้สภาวะที่กำหนด เทคนิคนี้เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊สหรือระเหยของน้ำการตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงเฟสการแตกตัวของวัสดุ (decomposition) ศึกษาการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน หรือ ปริมาณสารสัมพันธ์ (stoichiometry) ในการวิเคราะห์ตัวอย่างจะถูกวางบนจานขนาดเล็กซึ่งเชื่อมต่อกับเครื่องชั่งละเอียดที่มีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงสูง โดยที่ทั้งหมดจะอยู่ในเตาที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและบรรยากาศได้ บรรยากาศภายในอาจจะเป็นแก๊สเฉื่อย เช่น ไนโตรเจน หรือ แก๊สที่มีความว่องไว เช่น ออกซิเจน โดยน้ำหนักของตัวอย่างที่เปลี่ยนแปลงจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิเฉพาะของสารแต่ละชนิดโดยน้ำหนักที่หายไปนั้นเกิดจากการระเหย การย่อยสลาย หรือการเกิดปฏิกิริยาต่างๆ

DTA เป็นเทคนิควิเคราะห์ทดสอบวัสดุด้วยการวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิที่วัสดุที่เปลี่ยนแปลงไปในงานวิจัยนี้จะทำการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายโซลเจล คือ Perkin รุ่นPyris 1 TG



รูปที่ 3.6 เครื่องมือวิเคราะห์สมบัติทางความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านของแสง ของบริษัท Thermo Electron Corporation รุ่น Helios α



รูปที่ 3.8 เครื่อง UV-Vis Spectroscopy

3.7.4 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope SEM)

หลักการทำงานของเครื่อง SEM จะประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (condenser lens) เพื่อทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนชิ้นงานจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron) ขึ้นซึ่งสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ต่อไปสามารถบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์ได้เลย ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของบริษัท ZEISS รุ่น EVO MA 10

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ห้ามเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.7.2 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

(X-ray Diffractometer XRD)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยระบบวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์คือระบบที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนตามกฎของแบรกก์ กราฟที่ได้จากการตรวจสอบฟิล์มบางเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์ต่อมุมเลี้ยวเบนภายในผลึก ซึ่งธาตุหรือสารประกอบแต่ละชนิดมีมุมและลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นจึงสามารถบอกลักษณะโครงสร้างและชนิดของฟิล์มได้ ในงานวิจัยนี้เราตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางโดยระบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ด้วยเครื่อง XRD รุ่น D8 ของบริษัท Bruker ซึ่งใช้ $\text{Cu K}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดคลื่นรังสีเอ็กซ์และมีความยาวคลื่น 1.5046 Å



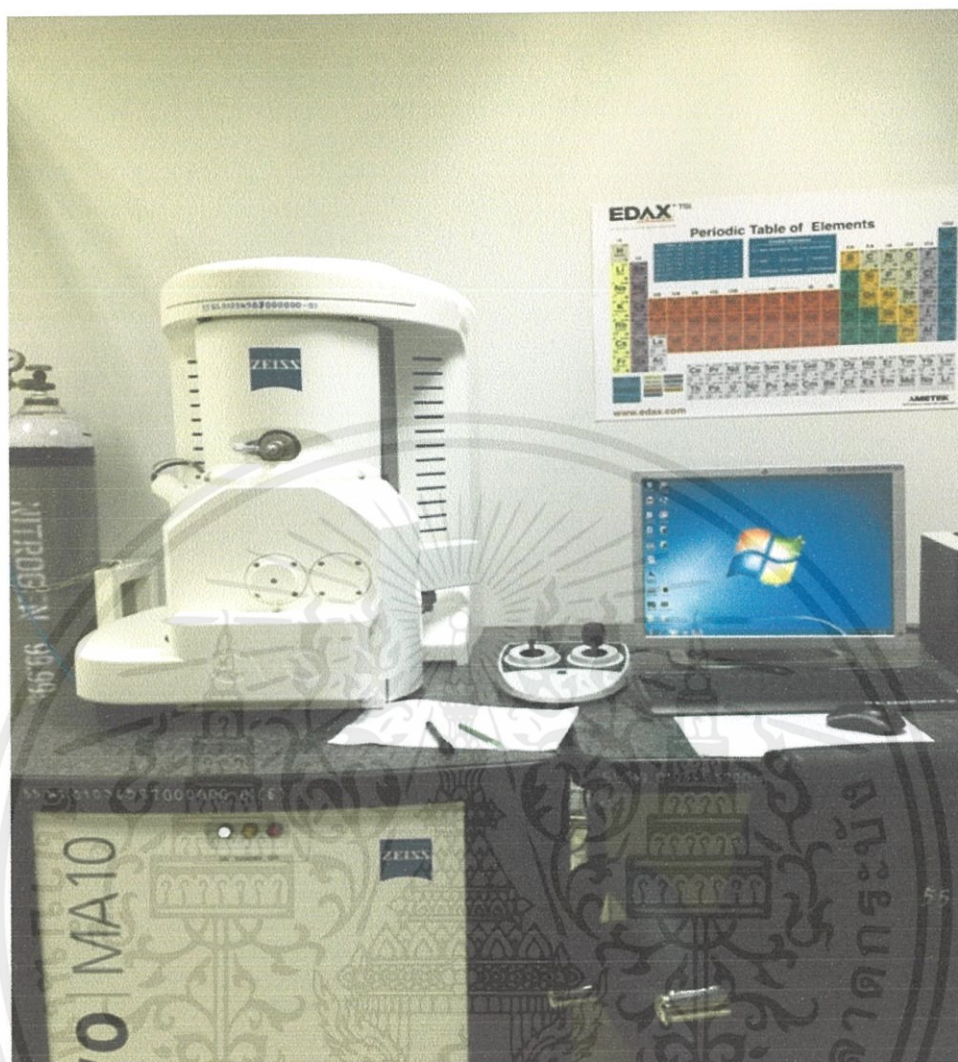
รูปที่ 3.7 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

3.7.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบาง

(Ultraviolet – Visible Spectrophotometer)

วิธีการวัดการทะลุผ่านของแสงเป็นเทคนิคการวิเคราะห์สาร โดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงที่ตามองเห็นช่วงความยาวคลื่นที่สามารถวิเคราะห์ประมาณ 190-1000 นาโนเมตร โดยนำสารตัวอย่างวางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสงสารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีหรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ดูดกลืนจะผ่านออกมายังเครื่องวัดแสง (Photodetector) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมาโดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทะลุผ่าน กับ ค่าความยาวคลื่น ในงานวิจัยนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

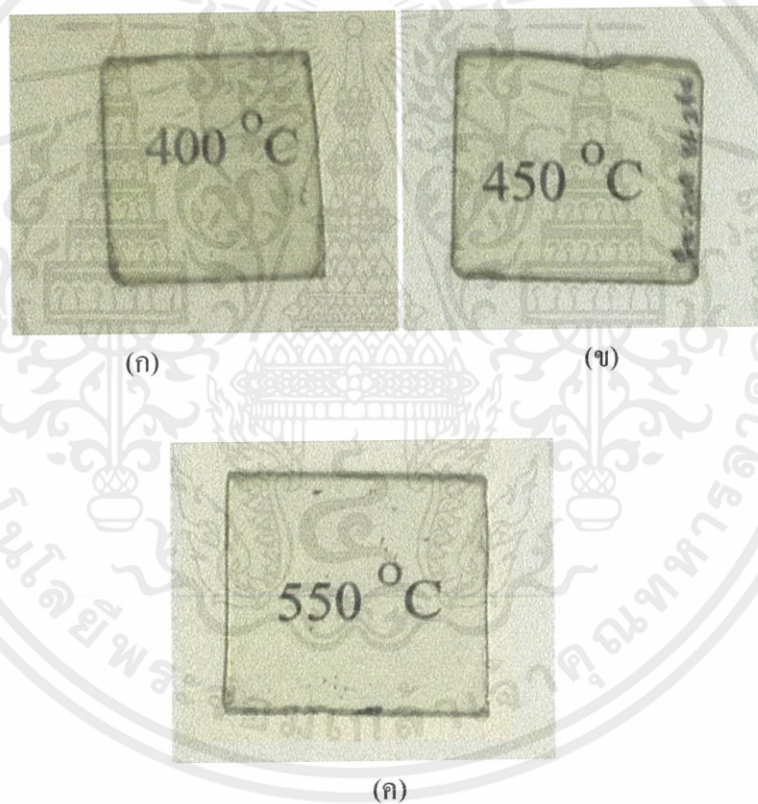
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (ZnO:Cu)

แสดงภาพฟิล์มบาง เตรียมด้วยวิธีโดยสารละลายโซลเจลโดยสารเจือที่มีความเข้มข้น 20% เตรียมด้วยสารละลายโซลเจลซึ่งใช้เทคนิคหมุนเคลือบบนฐานรองรับบนกระจกโบโรซิลิเกต 4 ครั้ง และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C 450 °C 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ จากการสังเกตพบว่าฟิล์มบางที่เตรียมมีความโปร่งใสสูงและฟิล์มบางสามารถยึดเกาะบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกตได้

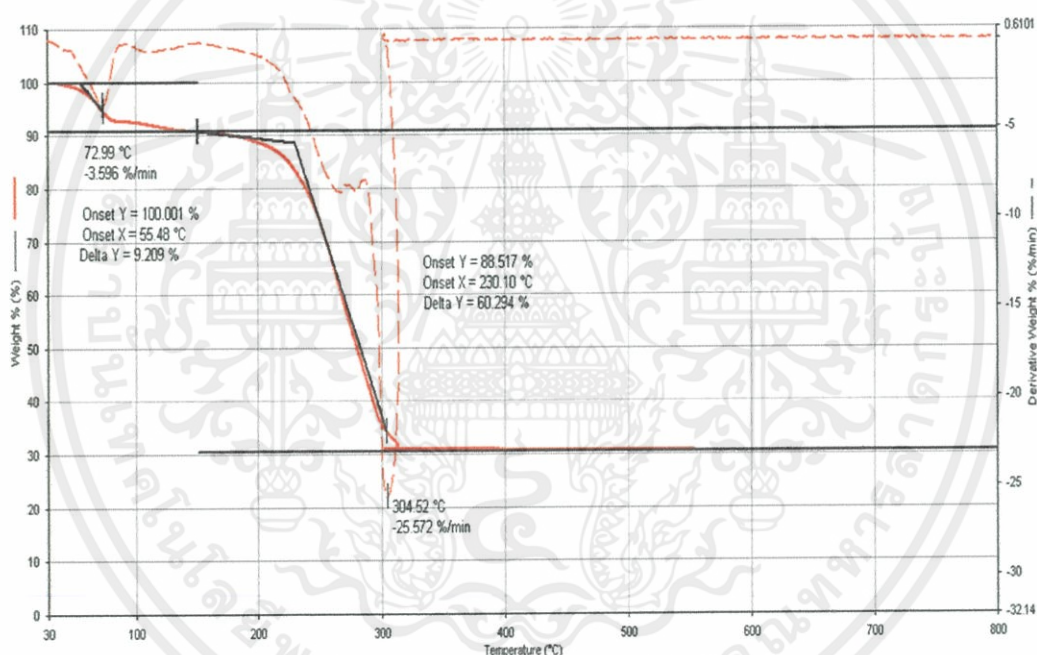


รูปที่ 4.1 รูปถ่ายฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงโดยวิธีการเตรียมสารละลาย โซลเจล (a) ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C (b) ฟิล์มบาง ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงแอนนัลที่อุณหภูมิ 450 °C (c) ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงแอนนัลที่อุณหภูมิ 550 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายโซลเจลซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (ZnO:Cu)

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายโซลเจลซิงค์อะซิเตทที่เจือด้วยทองแดง แสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลสารในช่วงอุณหภูมิ 73-304 °C ที่อุณหภูมิประมาณ 72.99°C มีการดูดกลืนพลังงานความร้อนเพื่อใช้ในการสลายตัวของซิงค์อะซิเตทเจือด้วยทองแดงเกิดการหายไปของน้ำหนัก ซึ่งอุณหภูมิดังกล่าวอยู่ในช่วงการสลายตัวของน้ำในสารตั้งต้น สืบเนื่องจากสูตรโมเลกุลของสารตั้งต้นที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบ คือ $(\text{CH}_3\text{COO})_2\text{Zn}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ แสดงให้เห็นว่า สารละลาย โซลเจลของซิงค์อะซิเตทที่เจือด้วยทองแดง เริ่มมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป็นซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ที่อุณหภูมิประมาณ 304.52°C ดังนั้นการแอนนิลฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง จึงควรเริ่มที่อุณหภูมิ 304.52°C เป็นต้นไปจะเกิดการฟอร์มตัวของโครงผลึกเกิดขึ้นและ ที่อุณหภูมิ 550 °C มีการฟอร์มตัวของโครงผลึกได้ดี



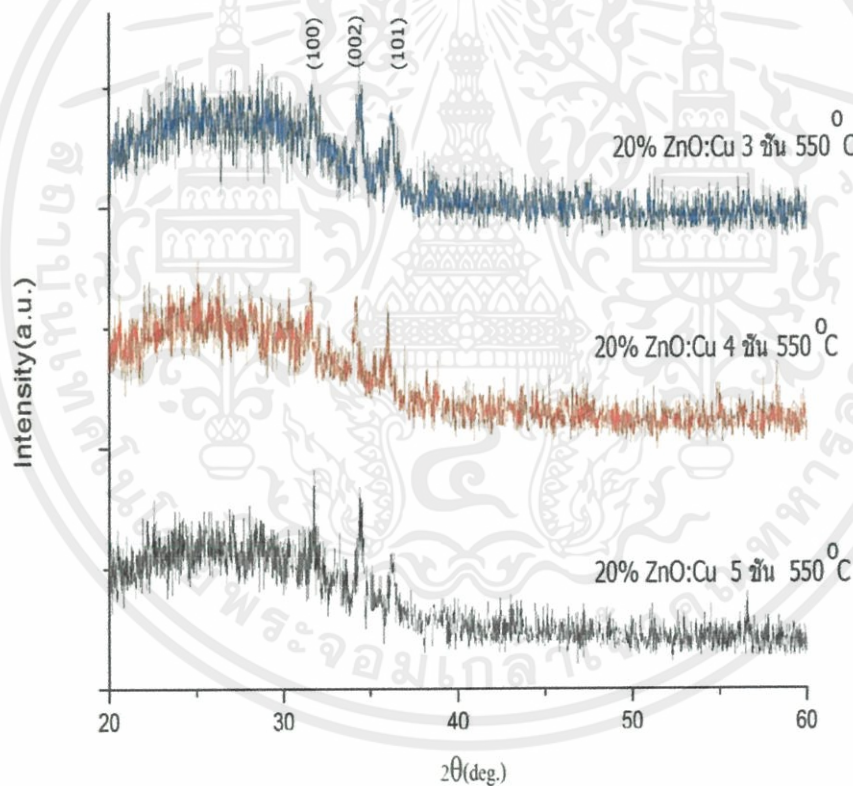
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของสารละลายโซลเจลของซิงค์อะซิเตทแสดงการเปลี่ยนแปลงของมวลสารในช่วงอุณหภูมิ 72-304 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างด้วยเครื่องมือวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์

(X - ray Diffractometer XRD)

แสดงผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วย ทองแดง (ZnO:Cu) ที่ปริมาณ 20% ที่เตรียมด้วยสารละลายโซลเจลโดยใช้เทคนิคการหมุนเคลือบบนฐานรองรับบนกระจกโบโรซิลิเกตและทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติจากผลการวัดเลี้ยวเบนพบว่า มีระนาบผลึกเหมือนกันที่ตำแหน่ง $2\theta = 31.8^\circ 34.5^\circ 37.8^\circ$ เป็นระนาบของ (100) (002) (101) ซึ่งเป็นโครงสร้างซิงค์ออกไซด์ตามลำดับ มีลักษณะแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ไซด์ (Hexagonal wurtzite) พบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการหมุนเคลือบ ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดง ลงบนกระจกโบโรซิลิเกตทำให้โครงสร้างผลึกดีขึ้นเล็กน้อยจากผลการวัดการทะลุผ่านของแสงพบว่าที่มีการหมุนเคลือบของสารจำนวน 4 ครั้ง ก่อนข้างตอบสนองได้ดี



รูปที่ 4.3 ผลการวัดการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ XRD ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ

20% มีการหมุนเคลือบชั้นที่ต่างกันคือ 3 4 5 ครั้ง หมุนเคลือบลงบน โบโรซิลิเกตและทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงแบบภาคตัดขวาง (ZnO:Cu) ที่ปริมาณ 20% ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy)

แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% เตรียมด้วยสารละลายโซลเจล ซึ่งใช้เทคนิคการหมุนเคลือบรองรับบนกระจกโบโรซิลิเกตทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ พบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้ไม่สม่ำเสมอเนื่องจากการหยดสารลงบนฟิล์มบางไม่เท่ากันทั่วทั้งแผ่นทำให้เวลาหมุนเคลือบสารที่เกาะบนหน้าฟิล์มจึงหนาบางไม่สม่ำเสมอ ดังนั้นฟิล์มบางจึงมีความหนามากที่สุดประมาณ 1 ไมโครเมตร

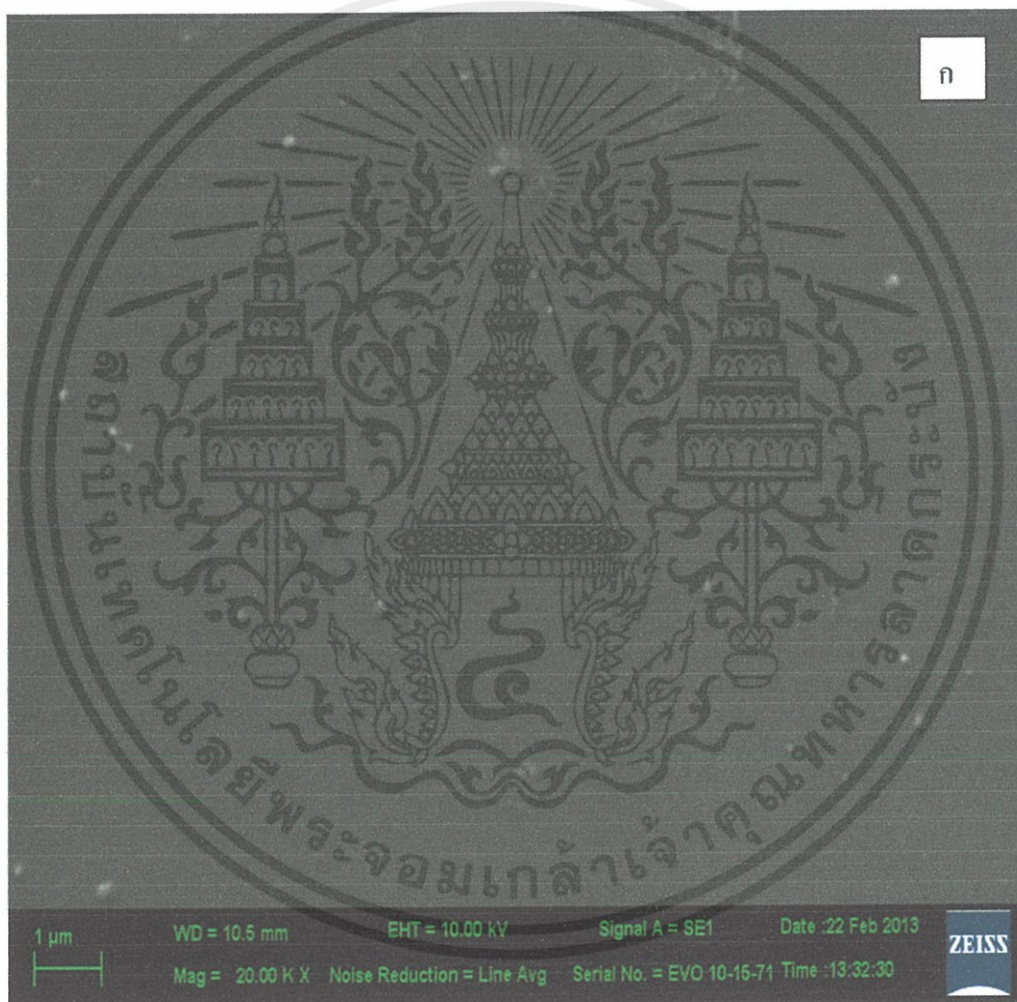


รูปที่ 4.4 (ก) แสดงภาพตัดขวางของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% เตรียมด้วยสารละลายโซลเจล ซึ่งใช้เทคนิคหมุนเคลือบบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกต 4 ครั้ง และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.5 ผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวของฟิล์มบางด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(Scanning Electron Microscopy)

แสดงผลการวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ที่ปริมาณ 10% ที่อุณหภูมิ 550 °C โดยที่ (ก) 10% ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงมีขนาดผลึกเล็กมาก เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดไม่พบเม็ดผลึกจึงทำให้เห็นพื้นผิวของฟิล์มบางที่ราบเรียบแต่ก็จะสังเกตเห็นว่ามีผลึกเม็ดเล็กๆกระจายตัวอยู่บนผิวของฟิล์มบางซึ่งอาจจะเกิดจากทองแดงที่ยังละลายไม่หมด ดังนั้นพื้นผิวฟิล์มบางที่วิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจึงมีผลึกเล็กอยู่

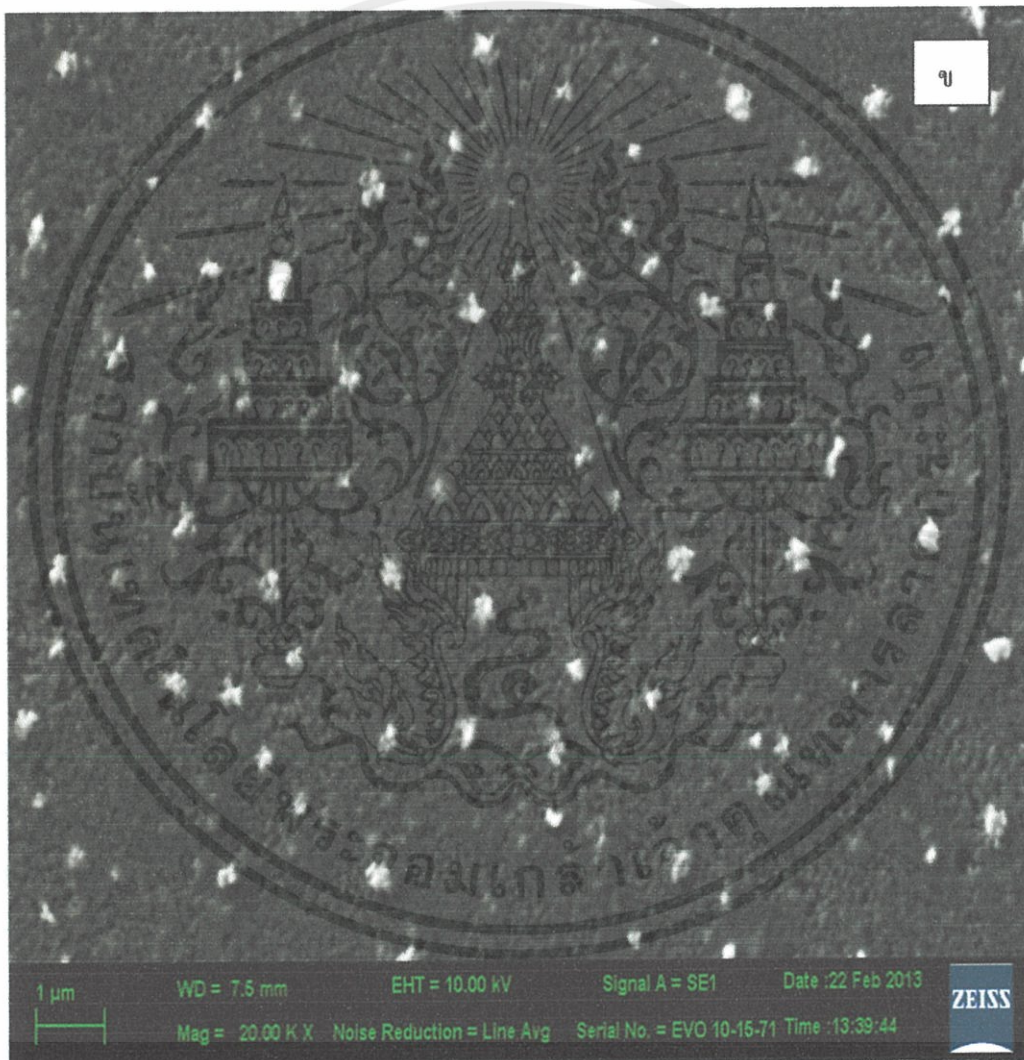


รูปที่ 4.5 (ก) การวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 10% ที่อุณหภูมิ 550 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.6 การวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (ZnO:Cu) ปริมาณ 20% ที่อุณหภูมิ 550 °C

การวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มบางที่ปริมาณ 20% ที่อุณหภูมิ 550 °C โดยที่ พบว่า (ข) 20% ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงพบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงมีขนาดผลึกเล็กมากจนนำมาวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด จากการสังเกตผิวหน้าของฟิล์มบางพบผลึกเล็กๆมีการกระจายตัวอยู่ทั่วทั้งผิวหน้าของฟิล์มบางซึ่งผลึกเม็ดเล็กๆที่สังเกตเห็นนี้อาจจะเป็นผลึกของทองแดงที่ยังละลายไม่หมด ดังนั้นเราจึงเห็นผลึกเม็ดเล็กๆบนผิวหน้าของฟิล์มบาง



รูปที่ 4.6 (ข) การวิเคราะห์ทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดของฟิล์มบางฟิล์มบาง

ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ที่อุณหภูมิ 550 °C ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.7 การวิเคราะห์ปริมาณธาตุของฟิล์มบางด้วยเทคนิค

(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy EDS)

แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณธาตุของฟิล์มบางซึ่งสกัดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงปริมาณ 20% วิเคราะห์ด้วยด้วยเทคนิค EDS และตารางที่ 4.8 แสดงค่าปริมาณธาตุที่มีอยู่ในฟิล์มบางซึ่งสกัดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% วิเคราะห์ด้วยด้วยเทคนิค EDS ทำให้ทราบปริมาณส่วนประกอบของธาตุทองแดงและซึ่งค้อยู่ในฟิล์มบาง

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าปริมาณธาตุของฟิล์มบางซึ่งสกัดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20%

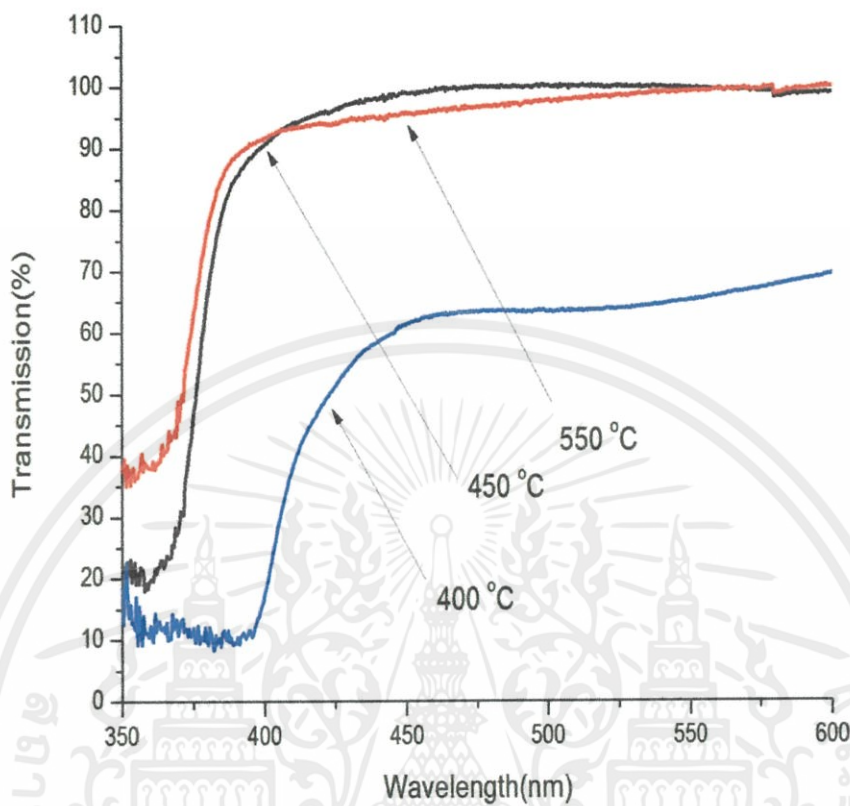
ELEMENT	ปริมาณ % (at)
O	54.29
Cu	7.77
Zn	37.94
Total	100.00

4.8 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบาง

4.8.1 ผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของฟิล์มบางซึ่งสกัดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงภายใต้ เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ต่างกัน

แสดงผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซึ่งสกัดออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง 20% ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C 450 °C 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ สังเกตเห็นว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความโปร่งใสสูงประมาณ 80-90% ในย่านแสงตามมองเห็นมีขอบการดูดกลืนที่ค่อนข้างชันเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น แสดงถึงการก่อตัวเป็นผลึกที่ดีขึ้นและเลื่อนไปในช่วงความยาวคลื่นสั้นเล็กน้อย โดยค่าการทะลุผ่านของฟิล์มบางนี้สามารถนำไปคำนวณค่าแถบพลังงานต้องห้ามได้ด้วยสมการที่ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

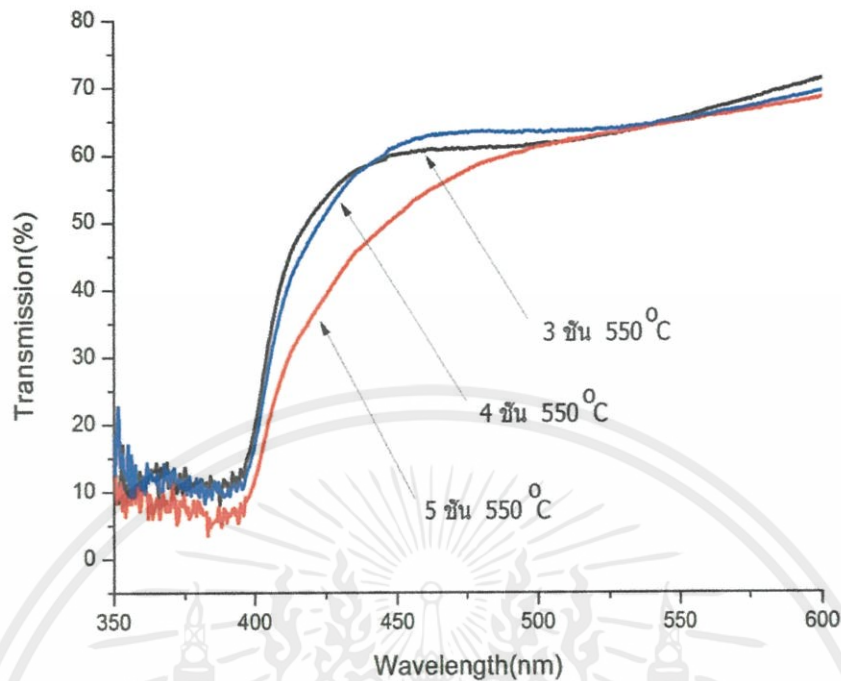


รูปที่ 4.7 แสดงผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง 20% ที่อุณหภูมิ 400 °C 450 °C 550 °C

4.8.2 ผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนครั้ง

แสดงผลการวิเคราะห์การดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือทองแดงที่ปริมาณ 20% โดยจำนวนครั้งของการหมุนเคลือบต่างกัน คือ 3 4 5 ครั้ง พบว่าเมื่อทำการหมุนเคลือบฟิล์มบาง 4 ชั้น สามารถตอบสนองได้ดีกว่าเพราะความบางความหนา มีผลต่อฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

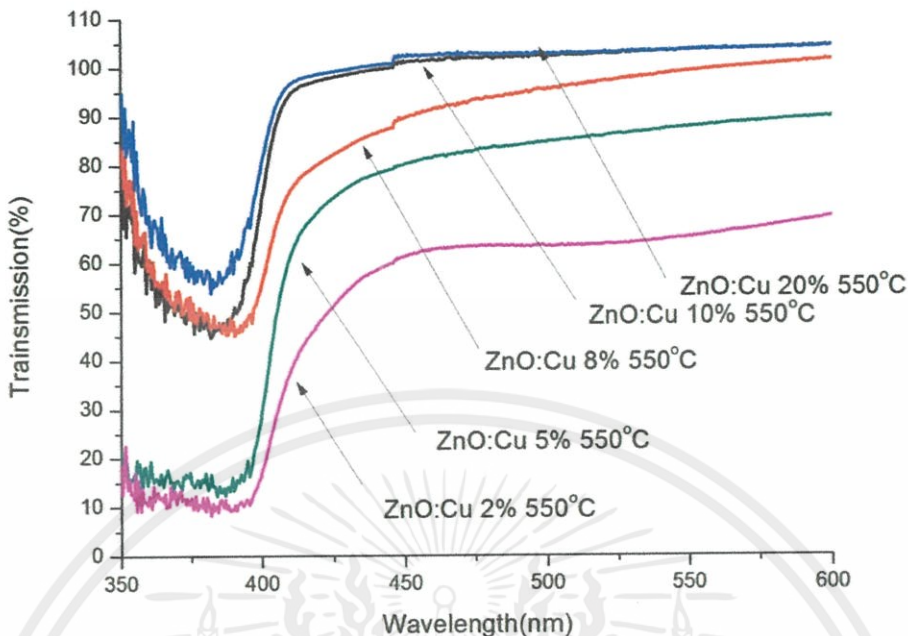


รูปที่ 4.8 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือทองแดง(ZnO:Cu) ที่ปริมาณ 20% โดยจำนวนครั้งของการหมุนเคลือบต่างกัน คือ 3 4 5 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 550 °C

4.8.3. ผลการวิเคราะห์การทะลุผ่านของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณความเข้มข้นการเจือทองแดงที่แตกต่างกัน

แสดงผลการวิเคราะห์การดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณการเจือด้วยทองแดงต่างกันคือ 2% 5% 8% 10% และ 20% เคลือบบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกต 4 ครั้ง ที่อุณหภูมิ 550 °C พบว่าเมื่อมีปริมาณทองแดงเพิ่มมากขึ้นทำให้ขอบการดูดกลืนในย่านความยาวคลื่นสั้นลง ดังนั้นการเจือทองแดงเข้าไปในซิงค์ออกไซด์ทำให้ประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



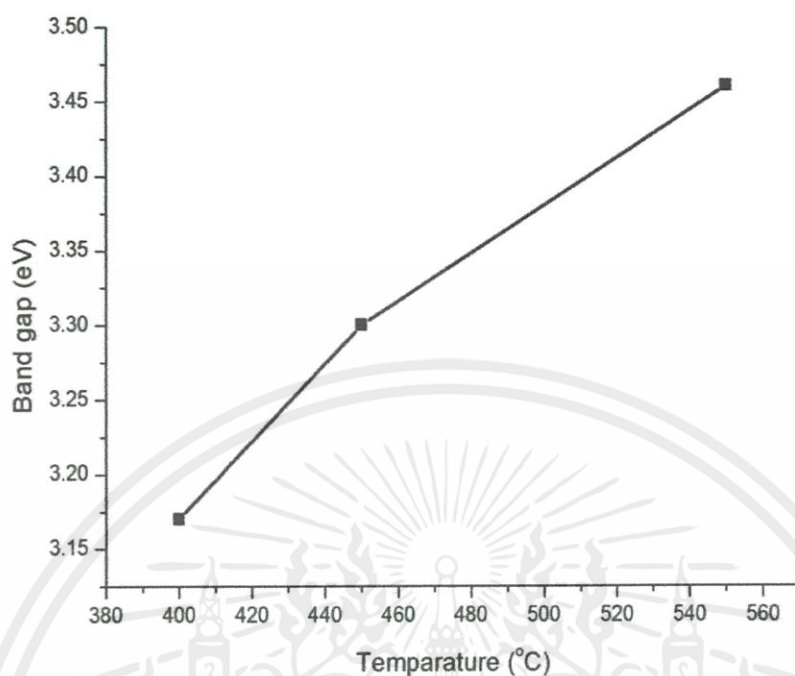
รูปที่ 4.9 ผลการวิเคราะห์การดูดกลืนทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณการเจือด้วยทองแดงต่างกัน

4.9 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มบาง

4.9.1 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิที่แตกต่างกัน

ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงทำการแอนนีลที่อุณหภูมิ 400 °C 450 °C 550 °C เตรียมโดยวิธีสารละลายโซลเจลที่เคลือบบนฐานรองรับบนกระจกโบโรซิลิเกต 4 ครั้ง พบว่าค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ได้มีค่าประมาณ 3.17-3.46 eV ทำให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิการแอนนีลสูงขึ้นค่าแถบพลังงานต้องห้ามจะเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ของแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% เตรียมด้วยสารละลายโซลเจลที่เคลือบบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกต และทำการแอนนัลที่อุณหภูมิต่างกัน

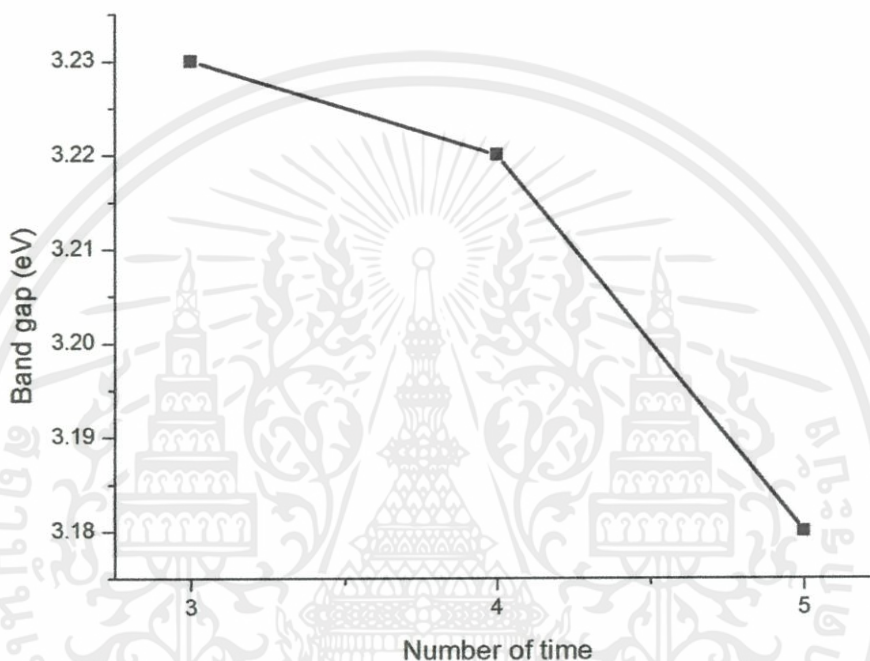
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงค่าแถบพลังงานต่อห้ามที่อุณหภูมิต่างกัน

ซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่อุณหภูมิ(°C)	Band gap (eV)
400	3.17
500	3.30
550	3.46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.2 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางภายใต้เงื่อนไขจำนวนครั้งการหมุนเคลือบที่แตกต่างกัน

ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งของการหมุนเคลือบที่ต่างกัน 3 4 5 ครั้ง ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติพบว่าเมื่อเพิ่มจำนวนครั้งในการหมุนเคลือบค่าแถบพลังงานต้องห้ามจะลดลงซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ของแถบพลังงานต้องห้ามกับจำนวนครั้งการหมุนเคลือบที่ต่างกันของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% เตรียมด้วยสารละลายโซลเจล

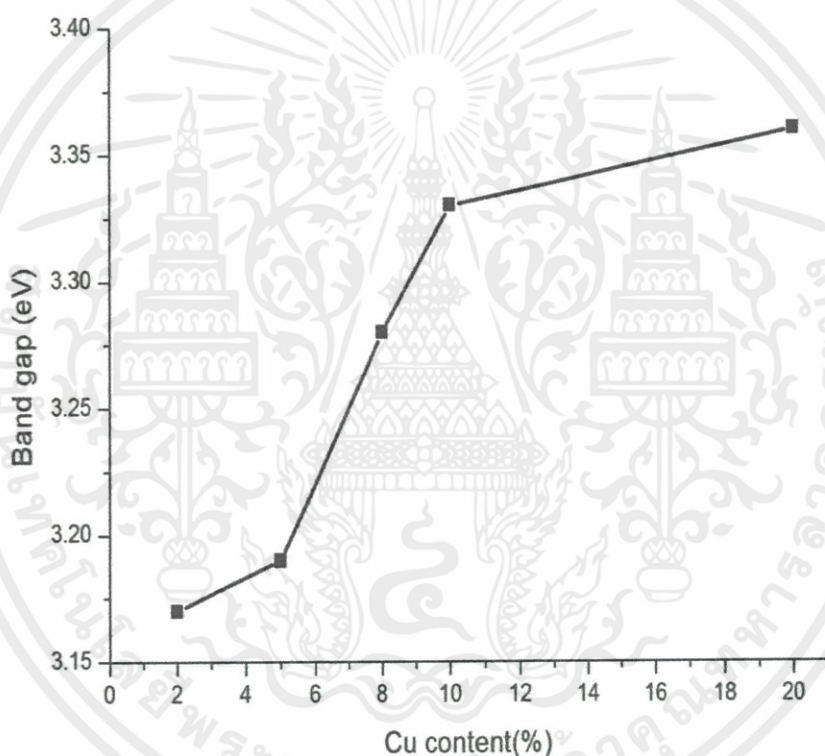
ตารางที่ 4.3 ตารางแสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามของจำนวนครั้งการหมุนเคลือบที่ต่างกัน

จำนวนชั้น	Band gap (eV)
3	3.23
4	3.22
5	3.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.9.3 ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางที่ปริมาณการเจือทองแดงแตกต่างกัน

ผลการคำนวณที่ได้จากการหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากกราฟการดูดกลืนแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550 °C ที่ปริมาณการเจือทองแดงที่ต่างกันคือ 2% 5% 8% 10% และ 20% เตรียมโดยวิธีสารละลายโซลเจลที่เคลือบบนฐานรองรับบนกระจกโบโรซิลิเกต 4 ครั้ง พบว่าค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ได้มีค่าประมาณ 3.17-3.36 eV ทำให้เห็นว่าเมื่อมีการเพิ่มปริมาณการเจือทองแดงพบว่าค่าแถบพลังงานต้องห้ามมีค่าใกล้เคียงกันกับค่าของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) ซึ่งแสดงในตารางที่ 4.4



รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ของแถบพลังงานกับอุณหภูมิแอนนัลของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ที่ปริมาณการเจือทองแดงที่ต่างกันคือ 2% 5% 8% 10% และ 20% โดยเตรียมด้วยสารละลายโซลเจลที่เคลือบบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ปริมาณสารเจือทองแดงต่างกัน

ปริมาณการเจือทองแดง (%)	Band gap (eV)
2	3.17
5	3.19
8	3.28
10	3.33
20	3.36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลวิจัยและข้อเสนอแนะ

จากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับเงื่อนไขการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง (ZnO:Cu) ภายใต้เงื่อนไขต่างกันดังนี้ เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการแอนนัล เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งในการหมุนเคลือบฟิล์มบาง เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือทองแดงและศึกษาวิธีการเพิ่มประสิทธิภาพต่อการตอบสนองของแสงในย่านยูวีวิสิเบิลสเปกโตรสโกปี (Uv-visible Spectroscopy) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่เตรียมด้วยสารละลายโซลเจลด้วยเทคนิควิธีหมุนเคลือบลงบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกต เนื่องจากกระบวนการเตรียมและการปลูกฟิล์มบางวิธีนี้เป็นวิธีที่ง่าย มีขั้นตอนไม่ยุ่งยาก สามารถเตรียมได้ในระบบเปิด สามารถเตรียมได้ในบรรยากาศปกติ และสามารถควบคุมปริมาณการเจือสารได้ จากนั้นนำฟิล์มบางที่ได้ไปวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้าง สมบัติทางแสง และสมบัติทางพื้นผิว ซึ่งสรุปได้ดังนี้

5.1 ผลการทดลองปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการแอนนัล

งานวิจัยนี้ได้ทำการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง ที่ปริมาณทองแดง 20% ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการแอนนัลที่เตรียมด้วยสารละลายโซลเจลโดยใช้เทคนิคการหมุนเคลือบลงบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกตโดยทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 °C 450 °C 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความโปร่งใสและมีความหนาประมาณ 1 ไมโครเมตร จากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการแอนนัลทำให้ทราบว่าอุณหภูมิมีผลกระทบต่อสมบัติทางโครงสร้าง ทางแสง และทางพื้นผิวของฟิล์มบาง กล่าวคือที่อุณหภูมิ 550 °C มีค่าแถบพลังงานเพิ่มขึ้นจาก 3.17-3.46 eV และฟิล์มบางที่เตรียมได้มีการก่อตัวเป็นผลึกที่ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิแอนนัลสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกอุณหภูมิที่ 550 °C ในการทำงานวิจัยต่อไป

5.2 ผลการทดลองปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ปริมาณ 20% ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งในการหมุนเคลือบ

งานวิจัยนี้ได้ทำการปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงจำนวนครั้งในการหมุนเคลือบที่ต่างกันคือ 3 4 5 ครั้ง โดยการเตรียมด้วยสารละลายโซลเจลที่หมุนเคลือบบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกต ทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมงในบรรยากาศปกติ พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงที่ได้นั้นมีค่าโปร่งใสประมาณ 55- 60% และพบว่าที่การหมุนเคลือบจำนวน 3 และ 4 ครั้ง มีความโปร่งใสใกล้เคียงกันมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ เช่น การค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ใกล้เคียงกันคือ 3.18-3.23 eV จึงเลือกนำเอาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดง หนูนเคลือบจำนวน 4 ครั้งมาทำการศึกษา เพราะยังหนูนเคลือบจำนวนน้อยครั้งค่าแถบพลังงานต้องห้ามจะยิ่งเพิ่มขึ้น

5.3 ผลการทดลองปลูกฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือทองแดง

งานวิจัยนี้ได้ทำการปลูกฟิล์มบางฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยทองแดงภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณทองแดงที่ต่างกันคือ 2% 5% 8% 10% และ 20% โดยเตรียมจากสารละลายโซลเจลที่เคลือบลงบนฐานรองรับกระจกโบโรซิลิเกตและทำการแอนนัลที่อุณหภูมิ 550°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ในบรรยากาศปกติ ฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความโปร่งใสที่ประมาณ 80-90% และสัญญาณการเลี้ยวเบนจะพบโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (ZnO) มีลักษณะแบบหกเหลี่ยม (Hexagonal wurtzite) เท่านั้น เนื่องจากทองแดงออกไซด์มีลักษณะแบบคิวบิก (Cubic) จะต้องเพิ่มอุณหภูมิการแอนนัลสูงกว่า 600°C ขึ้นไป เพราะทองแดงมีจุดเดือดจุดหลอมเหลวสูง จึงจะทำให้โครงสร้างมีการก่อตัวได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือทองแดงจะส่งผลทำให้ฟิล์มบางมีขอบการดูดกลืนเลื่อนไปในย่านความยาวคลื่นที่สั้นลงมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามคือ 3.17-3.36 eV ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าแถบพลังงานต้องห้ามของซิงค์ออกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ปัญหาและแนวทางการแก้ไข

1. ศึกษาการปลูกฟิล์มบางให้เข้าใจเพื่อลดขั้นตอนการทดลอง
2. ศึกษาสมบัติของสารเคมีอย่างครบถ้วนให้เข้าใจก่อนทำการทดลอง
3. ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการปลูกฟิล์มบางเพื่อลดการเกิดข้อบกพร่อง
4. สารละลายโซลเจลที่เตรียมได้ต้องมีความหนืดที่เหมาะสม
5. ความหนาของฟิล์มบางควรมีความหนาเหมาะสม ถ้าหนาไปจะทำให้ฟิล์มบางมีรอยแตกได้
6. การเก็บฟิล์มบางที่เตรียมได้ต้องเก็บอย่างเป็นระบบ เพื่อป้องกันการสลับกันของฟิล์มบาง

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. อุปกรณ์ในการเตรียมสารละลายโซลเจลจะต้องมีความสะอาด เพื่อลดการปนเปื้อนของฟิล์มบาง
2. สารละลายโซลเจลที่เตรียมได้ไม่ควรถูกน้ำหยดลงไป เพราะจะทำให้สารละลายโซลเจลเสีย
3. สารละลายโซลเจลที่เตรียมได้ควรทำการหมุนเคลือบให้เป็นฟิล์มบางทันที ไม่ควรเก็บไว้นานเกินไป
4. ขณะทำการทดลองควรป้องกันตัวเองทุกครั้งด้วยการสวมถุงมือใส่หน้ากากป้องกันเพื่อไม่ให้สารเคมีเข้าสู่ร่างกาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] M.Caglar,F.Yakuphanoglu,“Structural and optical properties of copper doped ZnO films derived by solgel”,*Applied Surface Science* 258(2012)3039-3044
- [2] Z.Banu Bahsi,A.Yavuz Oral,*Opt.Mater.*29(2007)627
- [3] Ligang Ma,Shuyi Ma HaiXia Chen,Xiaoqian Ai,Xinli Huang,“Microstructures and optical properties of Cu - doped ZnO films prepared by radio frequency reactive magnetron sputtering”*Applied Surface Science* 257 (2011) 1036-10041
- [4] Ruey-Chi Wang, Hsin-Ying Lin,“Cu doped ZnO nanoparticle sheets”,*Materials Chemistry and Physics* 125 (2011) 263-266
- [5] Deyi Wang,Jian Zhou, Guizhen Liu,“The microstructure and and photoluminescence of Cu-doped ZnO nano-crystal thin films prepared by sol-gel method”,*Journal of Alloys and Compound* 487 (2009) 545-549
- [6] Huilian Liu,Jinghai Yang,Zhong Hua,Yongjun Zhang, Lili Yang,Li Xiao,Zhi Xie, “The structure and magnetic properties of Cu-doped ZnO prepared by sol-gel method”,*Applid Surface Science* 256 (2010) 4162-4165
- [7] Deyi Wang,Jian Zhou, Guizhen Liu,“ The microstructure and photoluminescence of Cu-doped ZnO nano-crystal thin films prepared by sol-gel method”, *Journal of Alloys and Compounds* 487 (2009) 545-549
- [8] H.A. MacLeod,“Thin Film Optical Filters”, Adam Hilger/Macmillan, London, NewYork, 1987.
- [9] B.Vincent Crist, “Handbooks of Monochromatic XPS Spectra”,The Elements and Native Oxides, XPS International, Inc., USA, 1999.
- [10] H. Tong, Z. Deng, Z. Liu, C. Huang, J. Huang, H. Lan, C. Wang, Y. Cao, *Appl. Surf.Sci.* 257 (2011) 4906.
- [11] H. Xue, Y. Chen, X.L. Xu, G.H. Zhang, H. Zhang, S.Y. Ma, *Physica E* 41 (2009) 788.
- [12] G.H. Kim, D.L. Kim, B.D. Ahn, S.Y. Lee, H.J. Kim, “*Microelectron*” J. 40 (2009) 272.
- [13] S. Major, S. Kumar, M. Bhatnagar, K.L. Chopra, *Appl. Phys. Lett.* 49 (1986) 394.
- [14] F. Karipcin, E. Kabalcilar, S. Ilican, Y. Caglar, M. Caglar, “*Spectrochim*”, *Acta A* 73(2009) 174.

[20] J.I. Pankove,“Optical Processes in Semiconductors”,Prentice-Hall Inc,EnglewoordCliffs, NJ, 1971.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [21] M. Caglar, S. Ilican, Y. Caglar, "Thin Solid Films" 517 (2009) 5023–5028.
- [22] Min WEI, Chun-Fu LI, Xue-Ran DENG, Hong DENG, "Surface Work Function of Transparent Conductive ZnO Films Surface Work Function of Transparent Conductive ZnO Films", Energy Procedia, 16(2012)76-80
- [23] รศ.รानी สุวรรณพฤกษ์ "เคมีทั่วไปสำหรับสาขาวิศวกรรมศาสตร์" เล่ม 1.— กรุงเทพฯ: วิทยพัฒน์.2551
- [24] [Online].Available : รศ.ดร.สุจิตรา วงศ์เกษมจิตต์, วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี "กระบวนการโซล-เจล"
- [25] [Online].Available : WebElements: the periodic table on the [<http://webelements.com/>]
Copyright 1993-2012 Mark Winter [The University of Sheffield and WebElements Ltd, UK].
All rights reserved.
- [26] กมล เข็มพนากิจ. 2547: 12-14



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้