

การเตรียมฟิล์มบางซึ่งออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม
โดยวิธีการโซลเจล เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสง



กมลชนก เรืองอ่อน

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมวัสดุนาโน

วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PREPARATION OF In-Ga-ZnO THIN FILMS BY SOL-GEL PROCESS
FOR TRANSPARENT ELECTRONIC APPLICATIONS



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF BACHELOR
OF ENGINEERING IN NANOMATERIAL ENGINEERING
COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPY RIGHT 2016

COLLEGE OF NANOTECHNOLOGY

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

=====

หัวข้อโครงการพิเศษ	การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม โดยวิธีการโซลเจล เพื่อประยุกต์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสง
นักศึกษา	นางสาวกมลชนก เรืองอ่อน
รหัสประจำตัว	56110001
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมวัสดุนาโน
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม (GZO, IZO, และ IGZO) โดยเตรียมฟิล์มบางจากกรรมวิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล (Sol-gel) และเคลือบผิวสร้างชั้นฟิล์มด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating) ซึ่งจะทำให้การเคลือบชั้นฟิล์มลงบนฐานรองกระจก โดยใช้ซิงค์อะซีเตตไดไฮเดรตความเข้มข้น 0.4 โมลาร์ เป็นสารตั้งต้น และปรับปรุงประสิทธิภาพการนำไฟฟ้าและสมบัติทางแสงของฟิล์มบางซิงค์ ออกไซด์โดยการเจือด้วยธาตุอินเดียมและแกลเลียม โดยปริมาณของสารเจือทั้งสองกำหนดให้เป็น 1, 2, 3, 4, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม และทำการปลูกฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบเป็นเวลา 30 วินาทีด้วยความเร็วรอบ 2000 รอบต่อนาที โดยมีอุณหภูมิในการอบระหว่างชั้นของการหมุนเคลือบที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วนำฟิล์มที่เตรียมได้จากการหมุนเคลือบไปเผาแอนนัลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้อากาศปกติ เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นทำการศึกษาผลกระทบของการเจือต่อสมบัติทางโครงสร้าง ทางกายภาพ ทางแสง และทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง โดยการวัดสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer) การวัดสมบัติทางพื้นผิวและการประมาณความหนาของฟิล์มจากภาพตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อิมิสชัน (Field Emission Scanning Electron Microscope) การวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิค 4-point probe รวมไปถึงการวัดสมบัติทางแสงโดยเครื่อง UV-Vis spectrophotometer ผลการวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และรูปถ่ายสมบัติทางพื้นผิวของฟิล์มบาง บ่งชี้ถึงผลกระทบที่เกิดต่อโครงสร้างผลึกและโครงสร้างพื้นผิวจากปริมาณการเจืออินเดียมและ

แกเลียม นอกจากนี้การวัดโดยเทคนิค 4-point probe บ่งชี้ว่าสมบัติทางไฟฟ้าถูกปรับปรุงให้ดีขึ้นจากการเจือ และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกเลียมที่สังเคราะห์ขึ้นมีความโปร่งใสสูง และมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามเพิ่มขึ้นในกรณีของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียม ส่วนฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมมีค่าแถบพลังงานต้องห้ามลดลงเมื่อปริมาณการเจือเพิ่มขึ้น

คำสำคัญ : ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ กระบวนการหมุนเคลือบ การเจือด้วยอินเดียมและแกเลียม



Special Project title	Preparation of In-Ga-ZnO thin films by sol-gel process for transparent electronic applications
Student	Miss. Kamonchanok Ruangon
Student ID	56110001
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Nanomaterial Engineering
Year	2016
Special Project Adviser	Assoc. Prof. Dr. Wisanu Pecharapa

Abstract

M-doped ZnO (M=In, Ga) transparent thin films were prepared by sol-gel spin coating technique onto glass substrate. The precursor solution was prepared by zinc acetate dehydrate. The enhancement of electrical and optical properties was obtained by In and Ga dopant. In and Ga contents were controlled by the change in the atomic% ratio from 0-5 at.%. M-doped ZnO (M=In, Ga) thin films were deposited by sol-gel spin coating at rotation speed of 2000 rpm for 30 s. The films were heated at 150°C for 5 min and annealed in a furnace under an air atmosphere at 400°C for 2 h. The effects of In and Ga contents on the structural and optical properties of the films were investigated by X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), and UV-visible spectroscopy. The electrical conductivity measured by four-point probe technique indicated that their electrical conductivity can be enhanced by the suitable dopant contents. With increase in the In and Ga contents, the crystal quality was improved. Transmission spectra show that the prepared thin films have high optical transparency. Their direct band gap of GZO were increased and direct band gap of IZO were decreased with increasing doping concentration.

Keywords: ZnO thin film, Spin coating, In and Ga doping

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จขึ้นตามความคาดหวังของผู้เขียนได้ เนื่องมาจากความเมตตากรุณาของอาจารย์ที่ปรึกษาที่มีพระคุณยิ่งของผู้เขียน กราบขอบพระคุณ รศ.ดร. วิษณุ เพชรภา ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษา และเสียสละเวลาในการให้คำปรึกษาเกี่ยวกับหัวข้อและแนวคิดในการทำโครงการพิเศษ ตรวจสอบแก้ไขความเรียบร้อย ตลอดจนคำแนะนำทางวิชาการที่ดีเสมอมา

ขอขอบกราบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านภายในวิทยาลัยฯ ที่คอยให้ความรู้และคำปรึกษาในทุกๆ ด้าน ขอขอบคุณวิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในด้านอุปกรณ์และเครื่องมือวิเคราะห์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดามารดาที่สนับสนุนด้านการเรียนและคอยให้กำลังใจตลอดเวลาจนการเรียนรู้ผ่านพ้นไปได้ด้วยดีและมีวันนี้ได้

กมลชนก เรืองอ่อน



สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	III
กิตติกรรมประกาศ.....	IV
สารบัญ.....	V
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ออกไซด์โปร่งใสไฟฟ้า.....	4
2.2 ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง.....	4
2.3 ชิงค์ออกไซด์.....	5
2.3.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางนาโนชิงค์ออกไซด์.....	6
2.3.2 สมบัติความโปร่งแสงของฟิล์มบางนาโนชิงค์ออกไซด์.....	7
2.4 แกลเลียม.....	8
2.5 อินเดียม.....	8
2.6 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง.....	9
2.6.1 กระบวนการโซลเจลแบบหมุนเคลือบ.....	9
2.6.1.1 โซลเจล.....	9
2.6.1.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีหมุนเคลือบ.....	10
2.7 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง.....	11
2.8 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....	14
2.8.1 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	14
2.8.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	15

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	21
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง.....	21
3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.2 สถานที่ทำการทดลอง.....	22
3.3 วิธีการดำเนินงาน.....	22
3.3.1 การเตรียมฐานรองกระจกโบโรซิลิเกตสำหรับใช้ในการปลูกฟิล์ม.....	22
3.3.2 การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเลียมโดยวิธีการหมุนเคลือบ.....	23
3.3.3 การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมโดยวิธีการหมุนเคลือบ.....	25
3.3.4 การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแคลเลียมโดยวิธีการหมุนเคลือบ.....	27
3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง.....	29
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปราย.....	32
4.1 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเลียม (GZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ.....	32
4.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (GZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ.....	38
4.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแคลเลียม (IGZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ.....	42
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	46
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	46
5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข.....	47
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	47
เอกสารอ้างอิง.....	48
ประวัติผู้เขียน.....	50

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลายโซลเจลเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์และเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม.....	21
3.2 ปริมาณการเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมโซลเจล เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม.....	23
3.3 ปริมาณการเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมโซลเจล เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม.....	25
3.4 ปริมาณการเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมโซลเจล เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม.....	27



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของ Active Matrix.....	5
2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์.....	6
2.3 โครงสร้างของแกเลียม.....	8
2.4 โครงสร้างของอินเดียม.....	9
2.5 ลักษณะโครงสร้างและขั้นตอนของกระบวนการโซล.....	10
2.6 กระบวนการหมุนเคลือบ.....	11
2.7 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน.....	12
2.8 กราฟพลังงานโฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงที่ค่า γ ต่างๆ.....	13
2.9 ลักษณะของภาพที่ได้จากหัววัดที่แตกต่างกัน.....	16
2.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือแกเลียมแตกต่างกัน.....	18
2.11 ความต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือแกเลียมแตกต่างกัน.....	18
2.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจืออินเดียมแตกต่างกัน.....	19
2.13 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม.....	18
2.14 การทะลุผ่านของแสงในฟิล์มบางที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	20
2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน.....	20
3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียม.....	24
3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม.....	26
3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกเลียม.....	28
3.4 เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และตำแหน่งในการวางตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์.....	29
3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด.....	30
3.6 เครื่องวัดการทะลุผ่านของแสง.....	30
3.7 เครื่องวัด 4-point Probe.....	31

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือแกกลีเทียมแตกต่างกัน.....	33
4.2 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกกลีเทียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ.....	34
4.3 กราฟการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกกลีเทียมภายใต้สัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ.....	35
4.4 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกกลีเทียม.....	36
4.5 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโปร่งใสซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกกลีเทียม.....	37
4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจืออินเดียมแตกต่างกัน.....	38
4.7 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ.....	39
4.8 กราฟการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมภายใต้สัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ.....	40
4.9 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม.....	41
4.10 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโปร่งใสซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม.....	41
4.11 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกกลีเทียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ.....	42
4.12 กราฟการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกกลีเทียมภายใต้สัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ.....	43
4.13 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกกลีเทียม.....	44
4.14 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโปร่งใสซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกกลีเทียม.....	45

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ปัจจุบันอุตสาหกรรมในการผลิตฟิล์มบางนำไฟฟ้าโปร่งแสงเพื่อนำไปใช้ทำเป็นชั้นนำไฟฟ้าโปร่งแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) และทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (Thin film transistors) ได้มุ่งความสนใจไปที่ซิงค์ออกไซด์ เนื่องจากมีความเสถียรทางเคมีสูง มีแถบพลังงานช่องว่างที่กว้าง มีสมบัติการดูดกลืนแสงหรือการเปล่งแสงในย่านความยาวคลื่นแสงสีน้ำเงิน ซึ่งเหมาะสำหรับสิ่งประดิษฐ์ทางแสง เช่น อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optoelectronics) เซนเซอร์ (Sensor) สปินทรอนิกส์ (Spintronics) อิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสง (Transparent electronics) เป็นต้น และได้รับความนิยมในการประยุกต์ใช้เป็นออกไซด์นำไฟฟ้า (Transparent conducting oxides) ในทางธรรมชาติ นั้น ซิงค์ออกไซด์มีแถบพลังงานช่องว่างประมาณ 3.3 ถึง 3.4 อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ซึ่งทำให้ซิงค์ออกไซด์โปร่งแสง (Transparent) ในช่วงคลื่นแสงที่สายตามนุษย์มองเห็น (Visible light) และทำงานได้ในความยาวคลื่นเหนือม่วง (Ultra Violet) ถึงคลื่นแสงสีน้ำเงิน (Blue light) นอกจากนี้ ซิงค์ออกไซด์ยังมีเทคโนโลยีการสร้างฟิล์มที่ค่อนข้างง่าย เหมาะกับการใช้ผลิตเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ซิงค์ออกไซด์มีข้อได้เปรียบมากกว่าวัสดุชนิดอื่น คือ สามารถใช้ทำเป็นออกไซด์โปร่งใสนำไฟฟ้าที่มีราคาถูกที่สุด เพราะมีวัตถุดิบจำนวนมาก และสามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำ ถึงแม้ว่าซิงค์ออกไซด์จะมีความโปร่งแสงและค่อนข้างจะมีความนำไฟฟ้าอยู่พอสมควร โดยมีอิเล็กตรอนเป็นตัวพาหะ ซึ่งความนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้เชื่อว่าเกิดจากความบกพร่องภายในผลึกเองหรืออาจจะเกิดจากไฮโดรเจนที่เข้าไปเจือปนอยู่ในสารประกอบซิงค์ออกไซด์ ในกรณีที่ต้องการเพิ่มความนำไฟฟ้าในสารประกอบ ซิงค์ออกไซด์โดยที่ยังคงรักษาความโปร่งแสงไว้นั้น สามารถทำได้โดยการเจือธาตุหมู่ที่ 3 เข้าไปผสมในสารประกอบซิงค์ออกไซด์ โดยสารที่นิยมใช้เจือในซิงค์ออกไซด์และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ อาทิเช่น อินเดียม (Indium : In) แกลเลียม (Gallium : Ga) และ อลูมิเนียม (Aluminum : Al) เป็นต้น จากการศึกษาพบว่า การเจือสารในซิงค์ออกไซด์นั้นจะส่งผลต่อการเกิดที่ว่างของออกซิเจน (Oxygen vacancy) จึงทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในสารเพิ่มขึ้น จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพความนำไฟฟ้าขึ้นได้ อีกทั้งสารที่ไดยังมีความเสถียรที่อุณหภูมิสูง โดยการเตรียมฟิล์มบางนั้นสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การหมุนเคลือบ (Spin Coating), การจุ่มเคลือบ (Dip Coating), การเคลือบแบบสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น ซึ่งวิธีการเคลือบฟิล์มในสุญญากาศ เช่น การเคลือบแบบสปัตเตอริงเป็นวิธีการที่ต้องควบคุมความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อน และใช้เวลานาน ส่วนการหมุนเคลือบในเป็นวิธีการเตรียมฟิล์ม

บางที่ไม่ซับซ้อน ควบคุมความหนาได้ง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น และไม่ต้องใช้พลังงานมาก อีกทั้งยังใช้ต้นทุนในการเตรียมฟิล์มบางต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมฟิล์มบางอื่นๆ

สำหรับงานวิจัยนี้เป็นการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม (GZO, IZO, และ IGZO) โดยเตรียมฟิล์มบางจากกรรมวิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล (Sol-gel) แล้วเคลือบผิวสร้างชั้นฟิล์มด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating) โดยศึกษาผลของอัตราส่วนในการเจือสารอินเดียมและแกลเลียมในซิงค์ออกไซด์ ที่จะทำให้ฟิล์มบางแสดงสมบัติที่ดีและเหมาะสมเพื่อเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้าต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมฟิล์มบางของ Metal doped ZnO และ Metals co-doped ZnO (Metals=In,Ga) สำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้า

1.2.2 เพื่อพัฒนาระบวนการเตรียมฟิล์มบางของ Metal doped ZnO และ Metals co-doped ZnO (Metals=In,Ga) สำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้า

1.2.3 เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนในการเจือสารอินเดียมและแกลเลียมในซิงค์ออกไซด์ สำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้า

1.2.4 เพื่อศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางโครงสร้าง ทางแสง และทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง Metal doped ZnO และ Metals co-doped ZnO (Metals=In,Ga) สำหรับประยุกต์เป็นฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้า

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1.3.1 ศึกษาปริมาณการเจืออินเดียมและแกลเลียมในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ 0%, 1%, 2%, 3%, 4%, และ 5% ลงในซิงค์ออกไซด์ ด้วยวิธีการเตรียมแบบโซลเจล และสร้างเป็นฟิล์มบางด้วยวิธีการหมุนเคลือบ ให้เหมาะสำหรับเป็นฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้า

1.3.2 ศึกษาสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม (IZO, GZO, และ IGZO) ที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการหมุนเคลือบ ภายใต้อุณหภูมิในการอบระหว่างชั้นของการหมุนเคลือบที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที และทำการแอนนิลที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศปกติเป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นฟิล์มบางโปร่งใสไฟฟ้าได้

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1.4.1 สามารถเคลือบฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียมโดยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating)

1.4.2 ทราบปริมาณที่เหมาะสมของอินเดียมและแกลเลียมที่มีต่อคุณสมบัติของฟิล์มบาง และทราบผลกระทบของการเติมอินเดียมและแกลเลียมลงในซิงค์ออกไซด์

1.4.3 ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม

1.4.4 ได้เรียนรู้การใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ทางแสง และทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม

1.4.5 ได้ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียมที่มีสมบัติที่เหมาะสมในการประยุกต์ใช้งานทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์โปร่งแสง



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ออกไซด์โปร่งใสนำไฟฟ้า (TCOs : Transparent conducting oxides) [1]

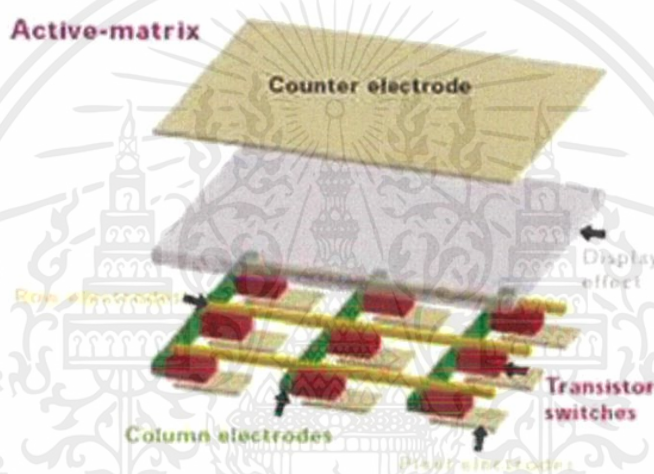
ออกไซด์โปร่งใสนำไฟฟ้า (TCOs : Transparent conducting oxides) คือวัสดุนำไฟฟ้าที่มีสมบัติในการดูดกลืนแสงต่ำ กล่าวคือ มีลักษณะโปร่งใสนั่นเอง วัสดุเหล่านี้มักจะถูกเตรียมด้วยวิทยาการในการปลูกฟิล์มบางและมักนิยมใช้ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสง ยกตัวอย่างเช่น เซลล์สุริยะ จอแสดงผล อุปกรณ์และวงจรอินทอเพซทางแสง เส้นใยแก้วจัดว่ามีสมบัติใกล้เคียงในด้านสมบัติทางแสงแต่กระนั้นด้วยความที่เป็นฉนวน มีสมบัติที่ไม่นำไฟฟ้า ซิลิกอนและสารประกอบของสารกึ่งตัวนำมีสมบัติทางแสงที่จำกัดในขณะที่สมบัติทางไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสารเจือ ออกไซด์โปร่งใสนำไฟฟ้ามีลักษณะที่ยืดหยุ่นทั้งสองอย่าง กล่าวคือ สมบัติการนำไฟฟ้าของวัสดุสามารถที่จะเปลี่ยนจากลักษณะที่เป็นฉนวน มาเป็นสารกึ่งตัวนำ และตัวนำไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี ในขณะเดียวกันความโปร่งใสก็สามารถที่จะถูกปรับเปลี่ยนได้ด้วยเช่นกัน โดยสามารถที่จะผลิตในลักษณะของสารกึ่งตัวนำชนิด p และ n ได้ ออกไซด์โปร่งใสนำไฟฟ้ามีกลุ่มสารหลายกลุ่ม และกลุ่มซึ่งคือออกไซด์เป็นหนึ่งในกลุ่มสารที่น่าสนใจ เพราะนอกจากจะสามารถปรับปรุงสมบัติโปร่งใสและนำไฟฟ้าแล้วนั้น ยังมีข้อได้เปรียบมากกว่ากลุ่มสารอื่น คือ มีความเป็นพิษต่ำ มีเสถียรภาพต่ออุณหภูมิสูงกว่า พบได้มากในธรรมชาติ และมีราคาถูก อันสอดคล้องกับเป้าหมายสำคัญในการพัฒนาประสิทธิภาพของเซลล์สุริยะชนิดซิลิกอนแบบฟิล์มบางคือ การเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนการผลิตนั่นเอง

2.2 ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (TFTs : Thin film transistors) [2]

ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง (TFTs : Thin film transistors) คือ ทรานซิสเตอร์ที่มีฟิล์มบางเป็นสารตั้งต้น คล้ายแก้ว ถูกเคลือบด้วยแผ่นฟิล์มบางๆ ของโลหะหรือพลาสติก มักถูกนำไปใช้คู่กับหน้าจอ LCD ของสมาร์ทโฟน เพื่อขับเซลล์ของ LCD ออกมา โดยถูกออกแบบให้มีแผ่นฟิล์มขนาดใหญ่ภายในมีทรานซิสเตอร์ขนาดเล็กและตัวเก็บประจุ ปัจจุบันจอแบบ AMOLED และ จอ LCD ส่วนใหญ่จะมีทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง เป็นส่วนประกอบ โดยปกติหน้าจอแบบ Active-matrix color displays จะอาศัยหลักการทำงานของทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง คือในแต่ละช่องแสดงผล (Pixel) โดยพื้นฐานของจอ LCD จะประกอบด้วย "พิกเซล" หรือองค์ประกอบภาพขนาดเล็กที่มีอยู่มากมายจนแทบนับไม่ถ้วน ซึ่งแต่ละพิกเซลยังจะประกอบขึ้นมาจากแผ่นชั้นบางๆ ประกอบคู่กันโดยตรงกลางเป็นผลึกเหลว (Liquid crystals) ปกติผลึกเหลวที่ตรงกลางจะทำให้แสงหักเหอย่างไม่มีทิศทาง ดังนั้นมันจึงไม่มีแสงออกมาจากในแต่ละพิกเซล แต่เมื่อหน่วยย่อยๆ เหล่านี้ได้รับการชาร์จประจุไฟฟ้าเข้าไปพวกมันก็จะเกิดการเรียงตัว ซึ่งเปิดโอกาสให้แสงสามารถเล็ดลอดออกมาได้ และนี่คือที่มาของชื่อเรียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง หรือ TFT นั้นเอง เนื่องจากอุปกรณ์ดังกล่าวประกอบด้วยชั้นบางๆ ดังนั้นแสงจึงสามารถผ่านอุปกรณ์ออกไปได้ โดยมันจะมีทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบาง 1 ตัวต่อพิกเซล และทุกตัวจะเชื่อมต่อกันหมด เป็น "Active Matrix" และจะมีตัวส่งสัญญาณกำกับอยู่ในทุกๆ ช่อง มีการตอบสนองต่อการส่งสัญญาณที่ค่อนข้างไว ซึ่งทำให้การแสดงผลมีความคมชัด ซึ่งหน้าจอแบบทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางนี้ ปกติจะพบได้ในอุปกรณ์ราคาแพง เช่น คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก หรือ กล้องดิจิทัล จอทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางจะใช้พลังงานในการทำงานค่อนข้างมาก ซึ่งส่งผลทำให้จำนวนครั้งในการชาร์จ และเปลี่ยนแบตเตอรี่สูงตามไปด้วย กล่าวโดยสรุป Active Matrix คือรูปแบบการเรียงตัวของพิกเซลที่เชื่อมต่อกัน และทรานซิสเตอร์ชนิดฟิล์มบางคือฟิล์มที่ทำหน้าที่เป็นทรานซิสเตอร์และถูกจัดเรียงไว้เป็นชั้น ซึ่งจะทำหน้าที่เหมือนกับสวิตช์เปิดปิดแสงจากด้านหลังให้ผ่านออกมายังพิกเซลต่างๆ ที่ปรากฏบนหน้าจอ LCD นั้นเอง



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของ Active Matrix [2]

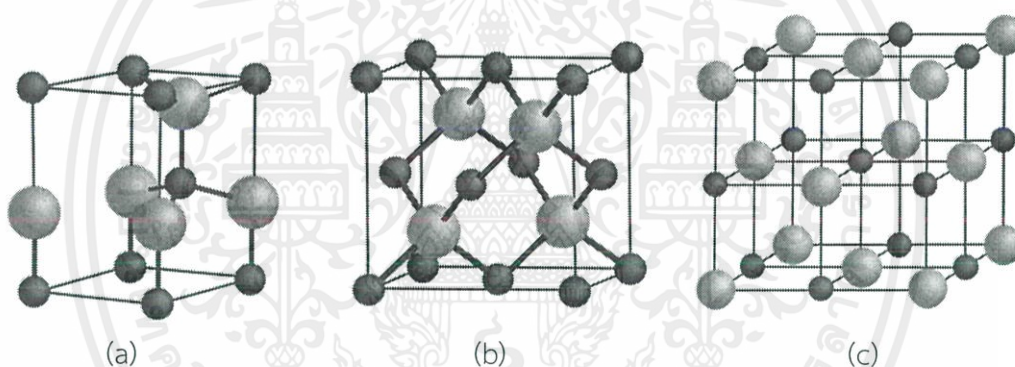
2.3 ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) [3]

ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) เป็นสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบซึ่งอยู่ในกลุ่ม II-VI มีแถบพลังงานกึ่งตรง มีค่า 3.37 อิเล็กตรอนโวลต์ที่อุณหภูมิห้อง และ 3.44 อิเล็กตรอนโวลต์ที่อุณหภูมิ 4 เคลวิน ซิงค์ออกไซด์มีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอลเวอร์ไซด์ (Hexagonal Wurtzite) คิวบิกซิงค์เบลน (Cubic Zinc Blende) หรือคิวบิกร็อกซอลต์ (Cubic Rocksalt) แสดงดังรูปที่ 2.3 โครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวอร์ไซด์ มีค่าคงที่ผลึกเป็น $a = b = 3.24$ อังสตรอม (Å) และ $c = 5.2$ อังสตรอม มีค่ามวลยังผลพาหะ (Carrier effective mass) ของอิเล็กตรอน คือ $0.24 m_0$ ส่วนโฮลมีค่ามวลยังผลคือ $0.59 m_0$ มีค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน (Electron mobility) ที่ผลึกเดี่ยวซิงค์ออกไซด์ (ZnO single crystal) ระหว่าง 100 ถึง $200 \text{ cm}^2/\text{V}$ และ มีค่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของโฮล (Hole mobility) ประมาณ $180 \text{ cm}^2/\text{V}$ เนื่องจากซิงค์ออกไซด์มีคุณสมบัติเด่นในเรื่องแสง จึงเป็นที่นิยมนำไปสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เช่น ตัวเปล่งแสงย่านสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Light emitting diodes : LED), ไดโอดเลเซอร์ (Laser diodes) และตัวตรวจวัดแสงย่านอัลตราไวโอเลต (Ultraviolet photodetector) เป็นต้น นอกจากนี้ซิงค์ออกไซด์ยังมีข้อมูลพื้นฐานอื่นๆ ดังนี้

สูตรโครงสร้าง	: ZnO
น้ำหนักโมเลกุล	: 81.37 g/mol
จุดเดือด	: 1,975 °C
จุดหลอมเหลว	: 1,975 °C
ความหนาแน่น	: 5.6803 g/cm ³
สถานะ	: ของแข็ง
สี	: ขาว



รูปที่ 2.2 โครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ (a) Hexagonal Wurtzite (b) Cubic Zinc Blende และ (c) Cubic Rocksalt โดยอนุภาคสีเทาเป็นซิงค์ออกไซด์ และอนุภาคสีดำเป็นออกซิเจน [3]

2.3.1 สมบัติการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ [9]

ค่าพิกัดความต้านทานไฟฟ้า (ρ) ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์มีความสัมพันธ์กับค่าความเข้มข้นของพาหะ (N) และค่าความคล่องตัวของพาหะ (μ) ตามสมการดังต่อไปนี้ โดยค่า e คือประจุของอิเล็กตรอน มีค่าคงที่เท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมบ์

$$\rho = \frac{1}{Ne\mu} \quad (2.1)$$

ดังนั้นฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีค่าพิกัดความต้านทานต่ำ จะต้องมีความเข้มข้นของพาหะ (N) และความคล่องตัวของพาหะ (μ) ที่สูงด้วยการเจือด้วยสารเจือและทำให้ออกซิเจนเกิดการแทรกตัวในโครงสร้าง (Oxygen interstitial) ในกรณีการแทรกตัวของออกซิเจน สามารถทำให้เกิดได้โดยเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การควบคุมอุณหภูมิของแผ่นฐานหรือบรรยากาศในการแอนนิล (Annealing) ถ้าเกิดการแทรกตัวของออกซิเจนในโครงสร้างผลึกที่สมบูรณ์ จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นในผลึกและประพัตต์ตัวเป็นอะตอมผู้ให้ แต่ถ้ามีอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นในฟิล์มมากเกินไป จะทำให้เกิดสารประกอบออกไซด์เป็นผลทำให้ค่าพิคตความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มขึ้น ในอีกกรณีคือการเจือด้วยสารเจือผู้ให้ก็มีผลต่อความนำไฟฟ้าเช่นกัน โดยไอออนบวกในผลึกจะถูกแทนที่ด้วยธาตุที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอนมากกว่า ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นในโครงสร้างผลึก โดยทราบกันดีว่าปกติแล้วฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์บริสุทธิ์จะมีค่าพิคตความต้านทานไฟฟ้าที่สูง เนื่องจากมีความเข้มข้นของพาหะต่ำ ดังนั้นการลดค่าพิคตความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ทำได้โดยการเพิ่มความเข้มข้นของพาหะและความคล่องตัวของพาหะ อย่างไรก็ตามถึงแม้การทำให้ออกซิเจนแทรกตัวในโครงสร้างผลึกของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จะให้สมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสงที่ดีและแสดงพฤติกรรมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น แต่ด้วยความไม่เสถียรเมื่อ อุณหภูมิสูงขึ้น จึงทำให้พฤติกรรมเปลี่ยนไปได้ ดังนั้นการเจือด้วยอะตอมสารเจือผู้ให้ในโครงสร้างผลึกของ ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์เพื่อให้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จึงมีความเสถียรภาพและเหมาะสมมากกว่า

2.3.2 สมบัติความโปร่งแสงของฟิล์มบางนาโนซิงค์ออกไซด์ [9]

เมื่อแสงส่งผ่านจากตัวกลางชนิดหนึ่งไปยังอีกชนิดหนึ่ง จะเกิดปรากฏการณ์การทะลุผ่านของแสงผ่านตัวกลางและแสงบางส่วนอาจถูกดูดกลืน และแสงบางส่วนอาจจะสะท้อนกลับที่ผิวหน้าของตัวกลาง อย่างไรก็ตามความเข้มของแสงจากจุดกำเนิด (I_0) ต้องเท่ากับผลรวมของความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านตัวกลาง (I_T) ความเข้มของแสงที่ถูกดูดกลืน (I_A) และความเข้มแสงที่สะท้อนกลับที่ผิวของตัวกลาง (I_R) ดังสมการที่ต่อไปนี

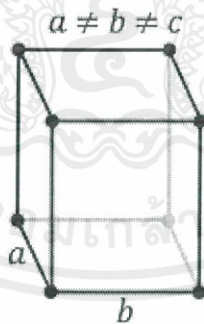
$$I_0 = I_T + I_A + I_R \quad (2.2)$$

ดังนั้นเมื่อพิจารณาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ จึงควรมีค่าการส่องผ่านของแสงสูง มีการดูดกลืนแสงและสะท้อนกลับที่ผิวน้อย ปรากฏการณ์ทางแสงที่เกิดขึ้นกับของแข็ง เช่น ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ จะเกี่ยวข้องกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและอะตอม ไอออน หรืออิเล็กตรอน โดยมีความสัมพันธ์ที่สำคัญคือ การเกิดโพลาไรเซชันแบบอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic polarization) และการเปลี่ยนแปลงพลังงานของอิเล็กตรอน (Electron energy transition) ดังนั้นปรากฏการณ์การดูดกลืนคลื่นวัสดุของโลหะที่มีความยาวคลื่นสั้นอย่างฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ (λ น้อยกว่า 400 นาโนเมตร) จะสามารถอธิบายด้วยความรู้พื้นฐานของแถบพลังงานต้องห้าม (Energy forbidden band) อาจเรียกอีกอย่างว่าแถบพลังงานช่องว่าง (Energy band gap, E_g) ซึ่งขึ้นอยู่กับการโครงสร้างของแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ดังนั้นโครงสร้างแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์จึงเป็นสมบัติที่มีความสำคัญมาก

2.4 แกลเลียม (Ga) [4]

แกลเลียมจัดเป็นธาตุโลหะ เลขอะตอม 31 ลำดับที่ 3 ของหมู่ 3A แกลเลียมมีโครงสร้างเป็นออร์โธโรมบิก (Orthorhombic) โดยตัวแกลเลียมเองนั้นมีการใช้งานไม่มากนัก ด้วยลักษณะที่คล้ายกับโลหะเหลวอื่นๆจึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานที่คล้ายๆกัน ยกตัวอย่างเช่น สวิตช์อุณหภูมิ สวิตช์ บารอมิเตอร์ ระบบส่งถ่ายความร้อน เป็นต้น แต่สารประกอบของแกลเลียม ยกตัวอย่างเช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) เป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำที่สำคัญซึ่งนำไปใช้ในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ แกลเลียมมีข้อมูลพื้นฐานอื่นๆ ดังนี้

สูตรโครงสร้าง	: Ga
น้ำหนักอะตอม	: 69.723 g/mol
จุดเดือด	: 2,204 °C
จุดหลอมเหลว	: 29.76 °C
ความหนาแน่น	: 5.907 g/cm ³
สถานะ	: ของแข็ง
สี	: เงิน



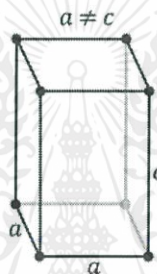
รูปที่ 2.3 โครงสร้างของแกลเลียม

2.5 อินเดียม (In) [5]

อินเดียมจัดเป็นธาตุโลหะ เลขอะตอม 49 ลำดับที่ 4 ของหมู่ 3A อินเดียมมีโครงสร้างเป็นเตตระโกนอล (Tetragonal) อินเดียมเป็นโลหะที่ไม่ตีมากนักหลอมเหลวได้ง่าย มีสมบัติทางเคมีที่คล้ายอะลูมิเนียมและแกลเลียมแต่มีลักษณะเหมือนสังกะสีมากกว่า ใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ทำอุปกรณ์เครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า ทำกระจกเงา เป็นต้น อินเดียมมีข้อมูลพื้นฐานอื่นๆ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สูตรโครงสร้าง	: In
น้ำหนักอะตอม	: 114.818 g/mol
จุดเดือด	: 2,072 °C
จุดหลอมเหลว	: 156.60 °C
ความหนาแน่น	: 7.31 g/cm ³
สถานะ	: ของแข็ง
สี	: ขาวเงิน



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของแกเลียม

2.6 กระบวนการเคลือบฟิล์มบาง [6]

การเคลือบฟิล์มบางมี 2 วิธี คือการเตรียมฟิล์มโดยใช้สารละลายเป็นสารตั้งต้นโดยสร้างฟิล์มภายใต้ความดันอากาศปกติ เช่น การเคลือบแบบจุ่ม, การเคลือบแบบหมุน และเทคโนโลยีในแบบที่สองคือการเคลือบฟิล์มในสุญญากาศ เช่น การเคลือบแบบสปัตเตอริง ซึ่งวิธีการเคลือบฟิล์มในสุญญากาศ เช่น การเคลือบแบบสปัตเตอริง เป็นวิธีการที่ต้องควบคุมความดัน อุณหภูมิ และอัตราการไหลของก๊าซ ซึ่งมีขั้นตอนที่ซับซ้อน และใช้เวลานาน ส่วนการหมุนเคลือบเป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่ไม่ซับซ้อน ควบคุมความหนาได้ง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น และไม่ต้องใช้พลังงานมาก อีกทั้งยังใช้ต้นทุนในการเตรียมฟิล์มบางต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเตรียมฟิล์มบางอื่นๆ จึงจะกล่าวเฉพาะวิธีการเคลือบแบบหมุนเพียงเท่านั้น

2.6.1 กระบวนการโซลเจลแบบหมุนเคลือบ

2.6.1.1 โซลเจล [7]

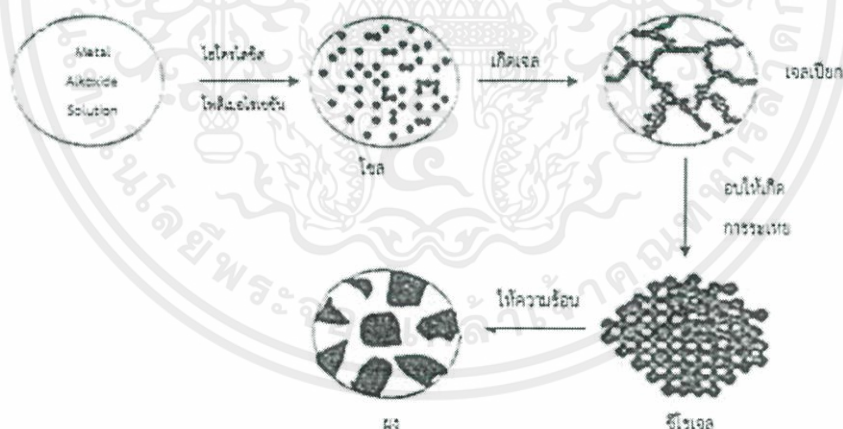
กระบวนการเตรียมโซลเจลเป็นกระบวนการเตรียมทางเคมีแบบเปียก (Wet Process) เป็นกระบวนการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่า “โซล” ซึ่งส่วนมากจะอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เรียกว่า “เจล” การเตรียมโลหะออกไซด์เริ่มต้นปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับปฏิกิริยาการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis Reaction) ได้อนุภาคที่มีขนาดเล็กที่แขวนลอยในน้ำที่เรียกว่า “โซล” จากนั้นปฏิกิริยาจะดำเนินไปด้วยปฏิกิริยาการควบแน่น (Condensation Reaction) ทำให้อนุภาคเชื่อมโยงต่อกันเป็นโครงร่างตาข่าย “เจล” เมื่อนำเจลไปแคลไซน์จะได้โลหะออกไซด์เพียงอย่างเดียว

โซล (Sol) การแขวนลอยของอนุภาคของแข็งที่อยู่ในของเหลว โดยที่โซลจะมีความหนาแน่นอนุภาคของแข็งมากกว่าของเหลวที่อยู่รอบๆอนุภาคของของแข็งที่อยู่ภายในของเหลวจะมีขนาดเล็กมาก (~1-1000 นาโนเมตร) จะมีแรงต้านทานแรงโน้มถ่วงจึงไม่มีการตกตะกอน และมีการกระจายตัวอยู่ทั่วไปโดยที่คอลลอยด์บางชนิดจะเปลี่ยนสภาพจากโซลเป็นเจล หรือจากเจลไปเป็นโซลได้ขึ้นอยู่กับสภาวะ เช่น อุณหภูมิ เป็นต้น

เจล (Gel) เป็นสารละลายแขวนลอยชนิดหนึ่งซึ่งจับตัวแข็งเป็นวุ้น ซึ่งมีความหนืดสูงจนสารละลายมีความยืดหยุ่นอย่างของแข็ง ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโครงข่าย (Network) ของเฟสที่กระจาย (Dispersed Phase) หรือคอลลอยด์ (Colloid) และสารตัวกลางทำกระจาย (Dispersed Medium) วนเวียนอยู่ทั่วโครงข่ายนั้น ที่โครงสร้างของของแข็งเกิดเป็นโครงข่ายเชื่อมโยง 3 มิติและมีความพรุนที่กระจายปกคลุมทั่วเฟสของเหลวมีขนาดไม่แน่นอนนั้นขึ้นอยู่กับภาชนะที่บรรจุ ถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากโซลที่เป็นอนุภาคคอลลอยด์ เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่า คอลลอยด์เจล (Colloidal Gel) ถ้าโครงข่ายของของแข็งเกิดจากอนุภาคที่มีขนาดเล็กกว่าคอลลอยด์เจลที่เกิดขึ้นเรียกว่า โพลีเมอริกเจล (Polymeric Gel)



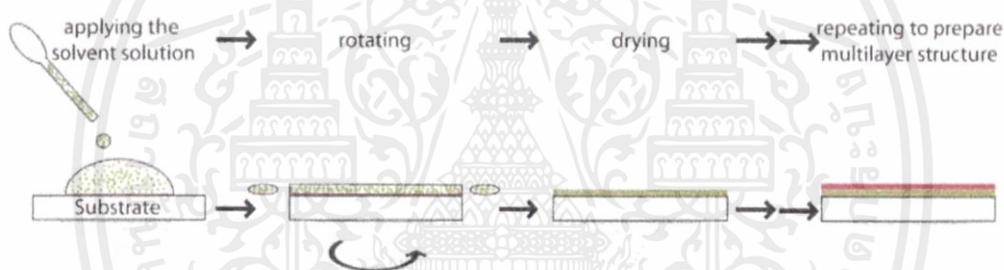
รูปที่ 2.5 ลักษณะโครงสร้างและขั้นตอนของกระบวนการโซลเจล [7]

2.6.1.2 การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีหมุนเคลือบ [6]

กระบวนการหมุนเคลือบ (Spin coating) ถูกใช้ในการเตรียมฟิล์มบางมากกว่า 10 ปีแล้ว โดยมีหลักการคือ เมื่อทำการหยดสารที่ต้องการใช้เคลือบหรือเตรียมได้โดยวิธีการโซลเจลลงบนจุดศูนย์กลางของวัสดุที่เป็นฐานรอง เช่น แผ่นกระจก ซึ่งถูกดูดให้เป็นสุญญากาศติดอยู่บนแท่นหมุนที่เป็นฐานรองในปริมาณที่เหมาะสม จากนั้นจะให้ฐานรองหมุนตัวด้วยความเร็วสูง (ประมาณ 700-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6,000 rpm) ในช่วงเวลาประมาณ 10-20 วินาที การหมุนแผ่นกระจกซึ่งเป็นวัสดุที่ใช้เป็นฐานรองนี้ จะทำให้ของเหลวที่หยดลงบนผิวหน้ากระจายไปทั่วอย่างสม่ำเสมอและเคลือบอยู่บนแผ่นกระจก เนื่องจากความเร่งเข้าสู่ศูนย์กลาง (Centripetal acceleration) จากการที่ฐานรองหมุนนั้นเป็น ปัจจัยที่ทำให้หยดของเหลวเกิดการแผ่ออกตามทิศทางของแรงสู่ศูนย์กลางจนทั่วทั้งแผ่นของ ฐานรองรับ ขั้นตอนต่อไปนำฐานรองที่ได้ผ่านกระบวนการเมื่อครู่มาทำให้แห้งเพื่อระเหยเอาตัวทำ ละลายออก จะทำให้ได้แผ่นฟิล์มบางที่เคลือบอยู่บนฐานรองรับ ซึ่งแสดงขั้นตอนการหมุนเคลือบดัง รูปที่ 2.6 วิธีนี้เป็นวิธีที่สะดวกและรวดเร็ว ซึ่งให้ผลในการเคลือบฟิล์มที่ผิวหน้าได้เรียบมาก การ เตรียมโดยวิธีนี้สามารถเติมสารเจือต่างๆได้ หรือสามารถเตรียมแผ่นฟิล์มบางหลายชั้นโดยแต่ละชั้น สามารถที่จะใช้สารที่แตกต่างกันได้ การเตรียมแผ่นฟิล์มบางด้วยวิธีนี้มีปัจจัยที่สำคัญเกี่ยวข้องอยู่ หลายประการ ซึ่งมีทั้งปัจจัยเกี่ยวกับสมบัติของสารละลายที่ต้องการใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง ได้แก่ ความหนืด (Viscosity), อัตราการแห้ง (Drying rate), ความเข้มข้นสารละลาย (Concentration), ความตึงผิว (Surface tension), อัตราเร็วในการหมุน, ระยะเวลาในการหมุน, การระเหยสาร เป็นต้น



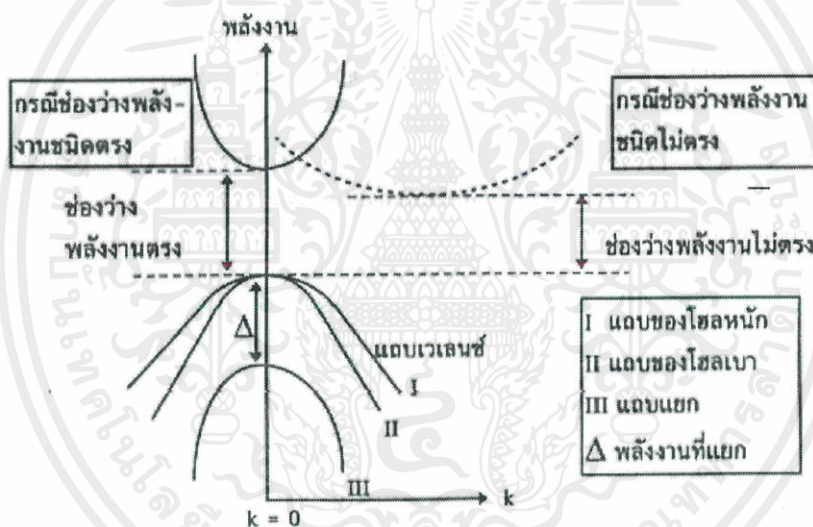
รูปที่ 2.6 กระบวนการหมุนเคลือบ [6]

2.7 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามจากสเปกตรัมการทะลุผ่านของแสง [3]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงาน โฟตอนสูงกว่าค่าแถบพลังงานต้องห้าม แล้วเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลง ของการดูดกลืนแสงอย่างกะทันหัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสง (Absorption Edge) พลังงานโฟตอน (Photon Energy) ที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับความต่างของจุดต่ำสุดของ แถบคอนดักชันและจุดสูงสุดของแถบ วาเลนซ์ จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนนอนจะให้ค่าแถบพลังงาน ต้องห้าม (E_g) วิธีการนี้เป็นการกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งการเขียนกราฟ เช่นนี้เรียกว่า การเขียนกราฟแบบเทาซ์ (Tauc's plot) ซึ่งการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสถานะของ อิเล็กตรอนในผลึกสารกึ่งตัวนำเป็นไปตามกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม โดยให้ระดับพลังงานของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนเป็นฟังก์ชันของเลขคลื่นของอิเล็กตรอน (Wave number) แสดงด้วยเวกเตอร์ k ในแผนภาพแสดงลักษณะของแถบพลังงาน แนวแกนนอน คือ เลขคลื่น k และแนวแกนตั้งคือพลังงานของอิเล็กตรอน เนื่องจากโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$ ดังนั้นแนวแกนนอนก็คือค่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอน เมื่อเขียนแผนภาพของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ k จะได้แผนภาพดังรูปที่ 2.7

ถ้าการดูดกลืนแสงเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันที่มีค่า k เท่ากัน เรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดตรง (Direct absorption) แต่ถ้าจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ และจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันมีค่า k ไม่ตรงกัน ในการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนเพื่อดูดกลืนแสงจะต้องอาศัยโฟตอนช่วย โดยอิเล็กตรอนต้องมีการดูดความร้อนจากโครงผลึกหรือคายความร้อนให้แก่โครงผลึก เรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนชนิดไม่ตรง (Indirect absorption)



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอน [3]

การหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำจะสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (T) ดังสมการ

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.3)$$

เมื่อ α = สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง (Absorption coefficient)

T = สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (Transmittance)

I_0 = ความเข้มแสงตกกระทบแผ่นฟิล์มบาง

I_T = ความเข้มแสงทะลุผ่าน

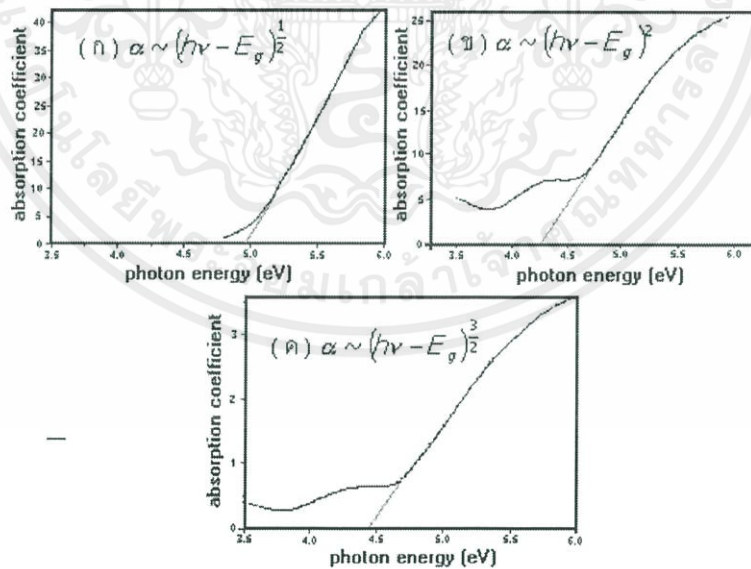
d = ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงจากสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสงโดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงกับค่าพลังงานแถบต้องห้ามซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา แถบพลังงานต้องห้ามของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงซึ่งจะถูกดูดกลืนเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง มีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามที่ขอบของการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่า

$$\alpha h\nu \sim (h\nu - E_g)^{\gamma} \quad (2.4)$$

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)



รูปที่ 2.8 กราฟพลังงานโฟตอนและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสงที่ค่า γ ต่างๆ [3]

กล่าวคือสามารถคำนวณหาค่าของแถบพลังงานต้องห้ามซึ่งมีแถบต้องห้ามที่มีการถ่ายทอดพลังงานแบบตรง ($\gamma = \frac{3}{2}$) ได้จากการเขียนกราฟแบบเทอซ์ และคำนวณหาความสัมพันธ์ระหว่างเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของแสง และพลังงานโฟตอน โดยการแทนค่า γ ได้ดังนี้

$$(\alpha h\nu)^{\frac{2}{3}} = \left[\left(-\frac{1}{a} \ln T \right) h\nu \right]^{\frac{2}{3}} = h\nu - E_g \quad (2.5)$$

2.8 เทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง

2.8.1 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray Diffractometer : XRD) [9]

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุต่างๆ โดยใช้รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นสั้นในระดับอังสตรอม โดยรังสีดังกล่าวจะสามารถเข้าไประหว่างอะตอมของวัสดุที่อยู่ชิดกันและชนกับระนาบของโครงสร้างผลึกหลายๆระนาบ เมื่อรังสีเอกซ์พุ่งชนผิวของวัสดุ รังสีเอกซ์จะเกิดการเลี้ยวเบนอันเนื่องมาจากอะตอมที่เป็นองค์ประกอบภายในผลึก การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังกล่าวจากระนาบของอะตอมในโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน จะทำให้เกิดรูปแบบการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ของรังสีเอกซ์ขึ้น ซึ่งรูปแบบการเลี้ยวเบนดังกล่าวจะบอกถึงการชนหรือการกระทำของรังสีเอกซ์ต่อระนาบผลึก ถ้าระนาบของผลึกเรียงตัวในแนวที่แตกต่างกันออกไป การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ก็จะแตกต่างกัน

ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์วัสดุด้วยเทคนิค XRD มีได้หลายชนิด ได้แก่ ขนาดผลึก ระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) ของโครงสร้างผลึก พารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter) การจัดเรียงของผลึก และความเครียด (strain) ในฟิล์มบาง โดยข้อมูลดังกล่าวมาสามารถวิเคราะห์ได้จากตำแหน่งและรูปร่างของพีค สมการที่ 2.6 แสดงสมการการคำนวณระยะห่างระหว่างระนาบ (d-spacing) ของผลึกตามกฎของแบร็ก (Bragg's Law)

$$2d\sin\theta = n\lambda \text{ หรือ } d = \frac{n\lambda}{2\sin\theta} \quad (2.6)$$

โดย d คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

θ คือ มุมเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

n คือ ลำดับของพีค

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ (1.54059 Å)

สมการที่ 2.7 แสดงสมการการคำนวณพารามิเตอร์โครงผลึก (Lattice Parameter)

$$d_{hkl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{4(h^2+k^2+lk)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2}}} \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดย h, k, l คือ ตำแหน่งของผลึกที่แกนของผลึกนั้นๆ

a, c คือ พารามิเตอร์โครงผลึก

ในกรณีการศึกษาฟิล์มบาง โหมดการวิเคราะห์ Bragg-Brentano แบบเดิมจะไม่เหมาะสมในการศึกษาวัสดุหรือโดยเฉพาะรูปร่างของฟิสิก เนื่องจากผลของแผ่นฐานที่ใช้ในการปลูกฟิล์มจะทำให้ความเข้มของสัญญาณ (Intensity) ต่ำกว่า ดังนั้นโหมดที่มีความเหมาะสมกับวัสดุชนิดฟิล์มบางคือ Glancing Angle X-Ray Diffraction (GAXRD) โดยให้มุมของรังสีเอกซ์ตกกระทบบนมีมน้อยๆ ผลของแผ่นฐาน และได้สัญญาณการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากผลึกของฟิล์มบางสูงขึ้น หลังจากการวิเคราะห์ฟิล์มบางด้วย GAXRD แล้ว และได้รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากฟิล์มบางที่ดีที่สุดโดยควรจะมีค่าความเข้มของสัญญาณสูง เกิดฟิสิกเดี่ยวและแคบ ซึ่งฟิสิกที่แคบจะหมายถึงโครงสร้างผลึกเป็นแบบผลึกเดี่ยวและมีการจัดเรียงไปในทิศทางเดียว แต่กรณีของฟิล์มบางฟิสิกจะกว้าง โดยบอกถึงว่าภายในฟิล์มบางมีเกรน (grain) หรือผลึกจำนวนมาก จากสมการของเชอร์เรอร์ (Scherrer's equation) สมการที่ 2.8 สามารถคำนวณขนาดของผลึกได้

$$d = \frac{k\lambda}{B \cos \theta_B} \quad (2.8)$$

โดย d คือ ขนาดของผลึก

k คือ ค่าคงที่ เท่ากับ 0.9

θ_B คือ มุมของ Bragg

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์เท่ากับ $1.54059 \text{ \AA}$

B คือ ความกว้างที่ครึ่งหนึ่งของความสูงของฟิสิก (FWHM)

2.8.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM) [10]

Field Emission Scanning Electron Microscope (FE-SEM) เป็นเครื่องมือที่มีประโยชน์ในการศึกษา โครงสร้างขนาดเล็กระดับจุลภาค และเป็นอุปกรณ์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายทั้งในการวิจัย และการผลิต ภาคอุตสาหกรรม FESEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงถึงระดับ 1,000,000 เท่า ทำให้สามารถศึกษาโครงสร้างขนาดเล็กระดับไมโครหรือนาโนได้ FE-SEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : EDS) ซึ่งช่วยในการศึกษาชนิด ปริมาณ และการกระจายขององค์ประกอบธาตุของวัสดุที่ศึกษาได้ อีกทั้ง FE-SEM ยังสามารถเชื่อมต่อกับอุปกรณ์หรือหัววัดอื่นๆเพื่อใช้ศึกษาวิเคราะห์ตามวัตถุประสงค์ที่ต่างกันออกไป เช่น เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การเรียงตัวของผลึกโดยใช้สัญญาณจากการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนกระเจิงกลับ (Electron Backscatter Diffraction; EBSD) นอกจากนี้ FE-SEM ยังสามารถประยุกต์โดยเชื่อมต่อกับชุดอุปกรณ์ควบคุมลำอิเล็กตรอนเพื่อใช้เขียนลวดลาย ขนาดเล็กลงบนชิ้นงาน (Electron Beam Evaporation) เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lithography) จะเห็นได้ว่า FE-SEM เป็นเครื่องมือที่มีความจำเป็นต่อการศึกษาวิจัย ด้วยกำลังขยายที่สูง และสามารถประยุกต์ใช้งานได้หลากหลายและครอบคลุมการศึกษาวิจัยในระดับจุลภาค FE-SEM เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่มีแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนแบบ Schottky type field-emission (T-FE) มี resolution สูง เหมาะสำหรับงานทางวิทยาศาสตร์กายภาพ ง่ายต่อการใช้งาน เพราะควบคุมการทำงานด้วยคอมพิวเตอร์ ระบบสุญญากาศในระบบลำอิเล็กตรอน ใช้ sputter-ion pump ส่วนห้องชิ้นงาน (sample chamber) ใช้ diffusion pump หัววัดหลักสำหรับการวิเคราะห์ด้วยภาพถ่ายของระบบประกอบด้วย 3 หัววัด คือ 1) Secondary Electron Detector 2) Backscattered Electron Detector และ 3) Scanning Transmission Electron Detector สัญญาณภาพที่ได้จาก FESEM แบ่งออกเป็น 3 ประเภท ตามลักษณะของภาพที่ได้จากหัววัดที่แตกต่างกัน ได้แก่ 1) Secondary Electron Image (SEI) 2) Backscattered Electron Image (BEI) และ 3) Transmission Electron Image (TEI)



รูปที่ 2.9 ลักษณะของภาพที่ได้จากหัววัดที่แตกต่างกัน [10]

(1) Secondary Electron Image (SEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Secondary Electron Detector (SED) ที่รับเอาพลังงานจาก secondary electron ที่หลุดออกมาจากพื้นผิวของชิ้นงาน เมื่อถูกลำอิเล็กตรอนชนมาประมวลผล ภาพที่ได้แสดงให้เห็นลักษณะของพื้นผิวของตำแหน่งที่สนใจบนชิ้นงาน (Morphology) สามารถเพิ่มกำลังขยายได้สูงถึงประมาณ 1,000,000 เท่า ภายใต้สภาวะการใช้งานที่เหมาะสม โดยทั่วไปการใช้งานปกติมักจะได้กำลังขยายถึงประมาณ 300,000 เท่า และยังสามารถเลือกโหมดป้องกันการสะสมของประจุบนชิ้นงานโดยใส่ความต่างศักย์ไปยังชิ้นงาน เพื่อไล่ประจุสะสม

(2) Backscattered Electron Image (BEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Backscattered Electron Detector (BED) ที่รับเอาพลังงานจาก Backscattered Electron ที่สะท้อนจากพื้นผิวของชิ้นงานมาประมวลผล โดยสัญญาณที่ได้ในแต่ละบริเวณจะแปรตามเลขอะตอม (atomic number, Z) ในเนื้อสารบริเวณนั้นๆ ภาพที่ได้จึงมีความสว่าง เข้มหรืออ่อนตามเลขอะตอมของธาตุที่เป็นส่วนประกอบของเนื้อสาร (atomic contrast) BEI จึงสามารถแสดงภาพที่แยกแยะความแตกต่างของแต่ละบริเวณที่มีธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกันได้ หัววัด BED เป็นแบบ retractable สั่งการให้เลื่อนเข้าไปยังตำแหน่งเหนือชิ้นงานในระหว่างใช้งานและเลื่อนออกเมื่อไม่ได้ใช้งานได้เพื่อความปลอดภัยของหัววัด

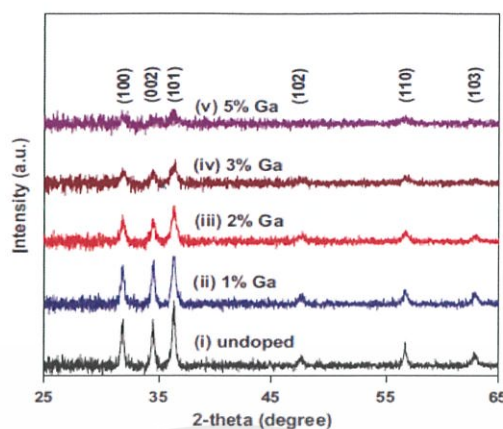
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(3) Transmission Electron Image (TEI) เป็นสัญญาณภาพที่ได้จาก Transmission Electron Detector (TED) อาศัยหลักการของ Transmission Electron Microscope (TEM) ประยุกต์มาติดตั้งในระบบของ FESEM โดย TED จะอยู่ในตำแหน่งใต้ชิ้นงานเพื่อรับพลังงานจาก transmission electron ที่ทะลุผ่านชิ้นงาน ชิ้นงานจะต้องเตรียมด้วยเครื่องมือเฉพาะเพื่อให้ชิ้นงานมีขนาดบางเพื่อให้อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านไปยัง TED ได้ ภาพที่ได้จะแสดงถึงรูปร่างโครงสร้างภายในของชิ้นงาน สามารถเพิ่มกำลังขยายได้ถึงประมาณ 300,000 เท่า

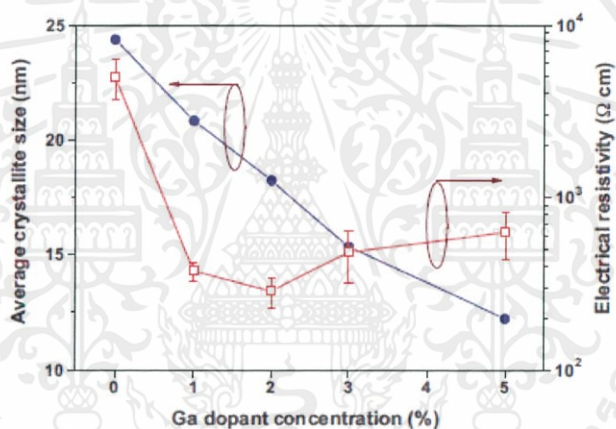
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยในปัจจุบันให้ความสนใจทางด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง งานวิจัยหลายงานวิจัยได้ใช้วัสดุสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (IZO) สารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม (GZO) และสารกึ่งตัวนำซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม (IGZO) เข้ามาเป็นองค์ประกอบหลักในการทำงานวิจัยด้านการเตรียมฟิล์มบางให้มีสมบัติที่ดีตามวัตถุประสงค์ของการนำไปประยุกต์ใช้งาน เนื่องจากธาตุหมู่ 3 เป็นกลุ่มสารที่ได้รับความนิยมกลุ่มหนึ่งในการเจือเพื่อปรับปรุงสมบัติทางไฟฟ้า โดยไอออนของสารเจือจะมีโอกาสที่จะเข้าไปแทนที่ไอออนเจ้าบ้าน และทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระมากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น

Chien-Yie Tsay และคณะ [11] ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม โดยเตรียมฟิล์มบางจากกรรมวิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล แล้วเคลือบผิวสร้างชั้นฟิล์มด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating) โดยใช้สารตั้งต้นเป็น Zinc acetate dehydrate และ Gallium nitrate hydrate ละลายใน 2-methoxyethanol ที่ความเข้มข้น 0.25M และใช้ Diethanolamine (DEA) เป็นสารตรึง จากนั้นทำการปั่นกวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ 120 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปทำการเคลือบผิวสร้างชั้นฟิล์มด้วยวิธีการหมุนเคลือบ (Spin Coating) โดยใช้ความเร็ว 1000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปแอนนิลที่อุณหภูมิในช่วง 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาปริมาณการเจือแกลเลียมเข้าไปในซิงค์ออกไซด์ โดยกำหนดปริมาณการเจือแกลเลียมตั้งแต่ 0-5 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.10 พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมมีเฟสแบบเวอร์ไซด์ (Wurtzite) และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมมีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าที่ต่ำดังแสดงในรูปที่ 2.11 โดยฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม 2 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม มีค่าความต้านทานทางไฟฟ้าต่ำที่สุด ซึ่งเป็นสมบัติที่ดีในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง โดยผลึกในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือแกลเลียมจะมีขนาดเล็กลงเมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณการเจือของแกลเลียม



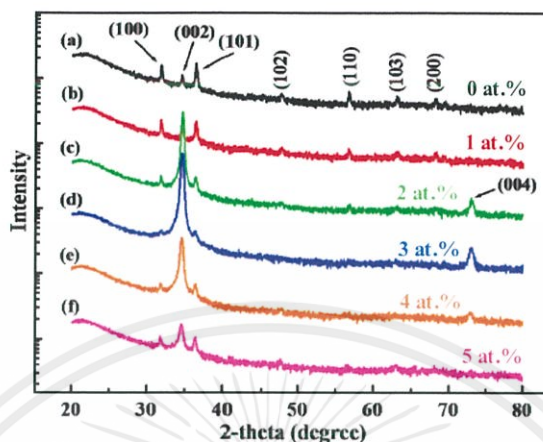
รูปที่ 2.10 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือแกกเปลี่ยนแตกต่างกัน



รูปที่ 2.11 ความต้านทานทางไฟฟ้าและขนาดเฉลี่ยของผลึกในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือแกกเปลี่ยนแตกต่างกัน

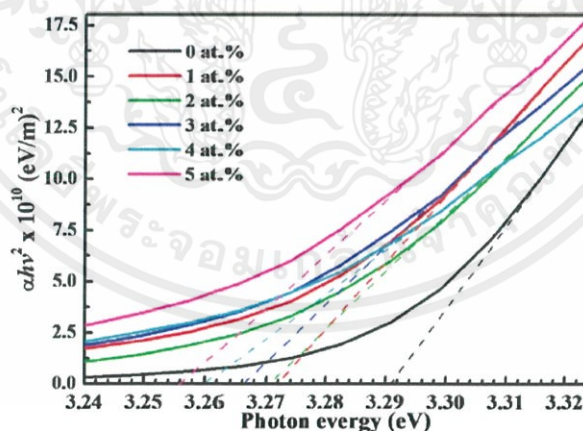
M.S. KIM และคณะ [17] ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมโดยเตรียมฟิล์มบางจากกรรมวิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล ด้วยวิธีการหมุนเคลือบ โดยใช้สารตั้งต้นเป็น Zinc acetate dehydrate ที่ความเข้มข้น 0.5 M ละลายลงใน 2-methoxyethanol ที่ความเข้มข้น 0.5 M เช่นเดียวกัน โดยผสมกันในอัตราส่วน 1:1 และใช้ Monoethanolamine (MEA) เป็นสารตั้งจากนั้นเติม Indium chloride ลงไป ที่ปริมาณการเจือตั้งแต่ 0-5 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม แล้วทำการปั่นกวนที่ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อเสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง นำสารละลายที่มีลักษณะเป็นโซลมาทำการหมุนเคลือบลงบนฐานรองรับกระจกด้วยความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 20 วินาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นนำไปแอนนิลที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ผลที่

ได้จากการศึกษาโครงสร้างผลึกพบว่า เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือของอินเดียมไปจนถึง 3% ที่จุดยอดหลักคือระนาบเลี้ยวเบน(100), (002), และ (101) เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จึงสรุปได้ว่าสามารถเพิ่มคุณภาพของผลึกได้โดยการเจืออินเดียมเข้าไป



รูปที่ 2.12 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจืออินเดียมแตกต่างกัน

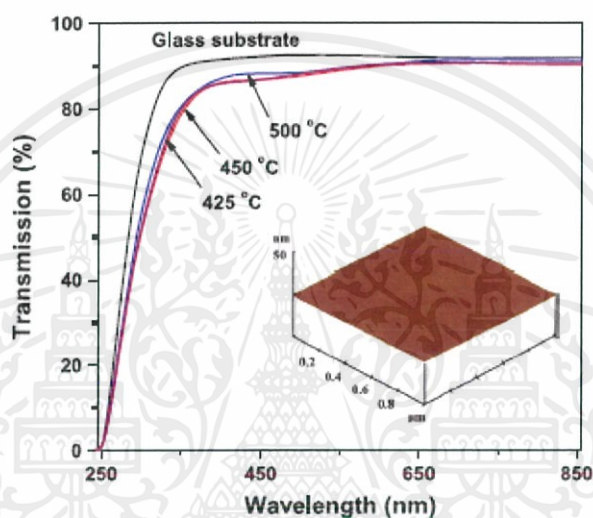
และผลที่ได้จากการศึกษาปริมาณการเจือของอินเดียมในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์แสดงดังรูปที่ 2.13 ซึ่งแสดงการพล็อตหาแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางโดยวิธีการ Tauc plot พบว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้ามลดลงจาก 3.2906 eV ถึง 3.2560 eV เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือของอินเดียม



รูปที่ 2.13 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม

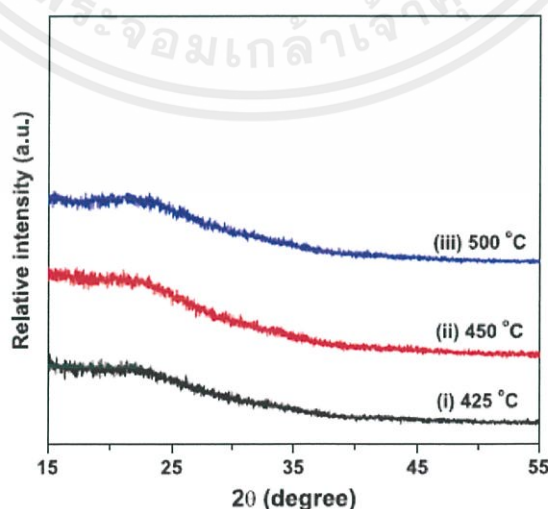
Chien-Yie Tsay และคณะ [12] ได้ทำการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม (IGZO) โดยเตรียมฟิล์มบางจากกรรมวิธีการสังเคราะห์แบบโซลเจล โดยใช้สารตั้งต้นเป็น Indium acetate hydrate, Gallium nitrate hydrate, และ Zinc acetate dihydrate ละลายใน 2-methoxyethanol ที่ความเข้มข้น 0.3M ซึ่งมีอัตราส่วนอะตอมของ In:Ga:Zn ในสารละลายเป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

0.7:0.3:1 และใช้ Diethanolamine (DEA) และ Acetylacetone เป็นสารตรึง จากนั้นทำการปั่น กวนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อเสร็จแล้วตั้งทิ้งไว้ 120 ชั่วโมงที่ อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปทำการเคลือบผิวสร้างชั้นฟิล์มด้วยวิธีการหมุนเคลือบโดยใช้ความเร็ว 1000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที แล้วอบที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ทำการหมุน เคลือบจนมีชั้นฟิล์มครบ 5 ชั้น และนำไปแอนนัลที่อุณหภูมิในช่วง 400-500 องศาเซลเซียส ภายใต้ บรรยากาศปกติเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยผลที่ได้จากการศึกษาอุณหภูมิในการแอนนัลแสดงดังรูปที่ 2.14 ที่แสดงการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางที่แอนนัลที่อุณหภูมิแตกต่างกันมีการทะลุผ่านของแสง ที่ใกล้เคียงกัน มีค่าการทะลุผ่านเฉลี่ยประมาณ 89% ส่วนรูปที่ 2.15 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของ



รังสีเอกซ์ โดยจะเห็นว่าฟิล์มบางทั้งหมดที่ได้ออกมามีโครงสร้างเป็นอสัณฐาน (Amorphous)

รูปที่ 2.14 การทะลุผ่านของแสงในฟิล์มบางที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน



รูปที่ 2.15 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่แอนนัลด้วยอุณหภูมิแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ฟิล์มบางโปร่งใสเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์และเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกเลียม (IZO, GZO, และ IGZO) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการหมุนเคลือบลงบนฐานรองกระจกโบโรซิลิเกต โดยกำหนดปริมาณการเจือของอินเดียม (In) และแกเลียม (Ga) ในความเข้มข้นที่แตกต่างกัน คือ 0, 1, 2, 3, 4, และ 5 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม ลงในซิงค์ออกไซด์ (ZnO) โดยมีอุณหภูมิในการอบที่ระหว่างชั้นของการหมุนเคลือบ คือ 150 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปทำการแอนนیلที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียสในบรรยากาศปกติ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติต่างๆ ได้แก่ การวัดสมบัติทางโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เรย์ (X- ray Diffractometer) การวัดสมบัติทางพื้นผิวและการอนุมาณความหนาของฟิล์มจากภาพตัดขวางโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบฟิลด์อีมิสชัน (FE-SEM: Field emission scanning electron microscope) การวัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิค 4-point probe รวมไปถึงการวัดสมบัติทางแสงโดยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer

3.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

3.1.1 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

- (1) Zinc acetate dihydrate
- (2) Absolute ethanol
- (3) Diethanolamine (HN(CH₂CH₂OH)₂)
- (4) Gallium (III) nitrate hydrate
- (5) Indium (III) acetate

ตารางที่ 3.1 สารเคมีที่ใช้ในการสังเคราะห์สารละลายโซลเจล เมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์และเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกเลียม (IZO, GZO, และ IGZO)

ชื่อสารเคมี	สูตรเคมี	ความบริสุทธิ์	บริษัทผู้ผลิต
Zinc Acetate Dihydrate	Zn(CH ₃ COO) ₂ •2H ₂ O	99.00%	Ajax Finechem
Indium (III) Acetate	In(CH ₃ COO) ₃	99.99%	Alfa Aesar
Gallium (III) Nitrate Hydrate	Ga(NO ₃) ₃ •xH ₂ O	99.90%	Sigma-Aldrich
Absolute Ethanol	C ₂ H ₆ O	99.50%	Fisher Sciectific

3.1.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- (1) กระจกโบโรซิลิเกต
- (2) เครื่องซังสาร
- (3) เครื่องฮอทเพลทและแมกเนติกสเตอโร
- (4) เครื่องแก้วสำหรับห้องทดลอง
- (5) เครื่องอัลตราโซนิก
- (6) เครื่องเคลือบผิวแบบหมุนหึ่ง
- (7) เตาเผาอุณหภูมิสูง
- (8) เครื่องมือวัดสมบัติทางโครงสร้างผลึก (X-ray diffraction measurement)
- (9) เครื่องมือวัดสมบัติทางพื้นผิวและอนุมาณความหนาของฟิล์ม (Field emission scanning electron microscope)
- (10) เครื่องมือวัดสมบัติทางไฟฟ้า (Four-point probe)
- (11) เครื่องมือวัดสมบัติทางแสง (UV-Visible spectrophotometer)

3.2 สถานที่ทำการทดลอง

อาคารวิจัยนาโนเทคโนโลยีสิริธร วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร เริ่มทำการทดลองเมื่อเดือนกันยายน พ.ศ. 2559

3.3 วิธีการดำเนินงาน

3.3.1 การเตรียมฐานรองกระจกโบโรซิลิเกตสำหรับใช้ในการปลูกฟิล์ม

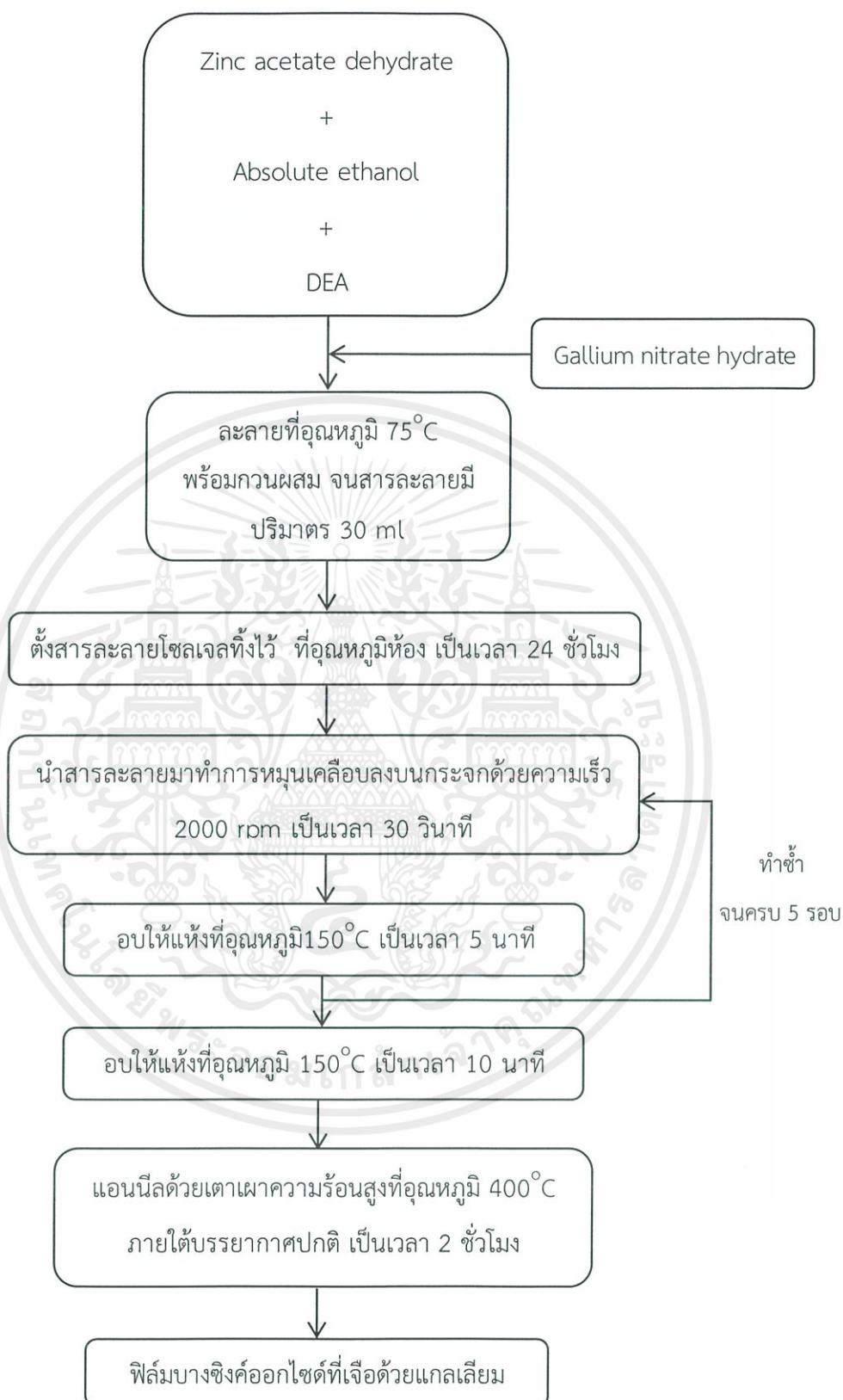
- (1) ตัดกระจกให้มีขนาด $1/2$ ของขนาดเดิม
- (2) ล้างด้วยน้ำยาล้างคราบไขมัน และล้างด้วยน้ำสะอาด ควรระมัดระวังคราบไขมันจากมือ
- (3) ล้างด้วยน้ำ DI เป็นระยะเวลา 10 นาที โดยเครื่องอัลตราโซนิก
- (4) ล้างด้วยอะซิโตน เป็นระยะเวลา 10 นาที โดยเครื่องอัลตราโซนิก
- (5) ล้างด้วยไอโซโพรพานอล เป็นระยะเวลา 10 นาที โดยเครื่องอัลตราโซนิก
- (6) อบให้แห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 20 นาที

3.3.2 การเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม (GZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ

- (1) ละลาย Zinc acetate dehydrate ความเข้มข้น 0.4M ลงใน Absolute ethanol 50 มิลลิลิตร และ Diethanolamine 1.7 มิลลิลิตร
- (2) ผสม Gallium nitrate hydrate ความเข้มข้น 0.4M แบ่งเป็นความเข้มข้นจาก 1-5 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม ดังแสดงในตารางที่ 3.2 ลงตามลำดับ และปั่นกวนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร
- (3) ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายโซลเจลสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง
- (4) นำสารละลายโซลเจลที่ได้ไปใช้ในระบบการปลูกฟิล์มโดยวิธีการหมุนเคลือบที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- (5) อบให้แห้งโดยกำหนดอุณหภูมิในการอบที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำตามข้อ (4) อีก 4 รอบ
- (6) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- (7) นำไปแอนนัลด้วยเตาเผาความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม

ตารางที่ 3.2 ปริมาณการเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมโซลเจล เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม (GZO) ณ ความเข้มข้น 0.4 M ที่ปริมาตร 50 ml

ปริมาณการเจือ Ga (at.%)	Gallium nitrate hydrate (กรัม)	ปริมาณ ZnO (at.%)	Zinc acetate dehydrate (กรัม)
1	0.082	99	4.346
2	0.164	98	4.302
3	0.246	97	4.258
4	0.327	96	4.214
5	0.410	95	4.171



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางเมทัลไดออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลเลียม (GZO)

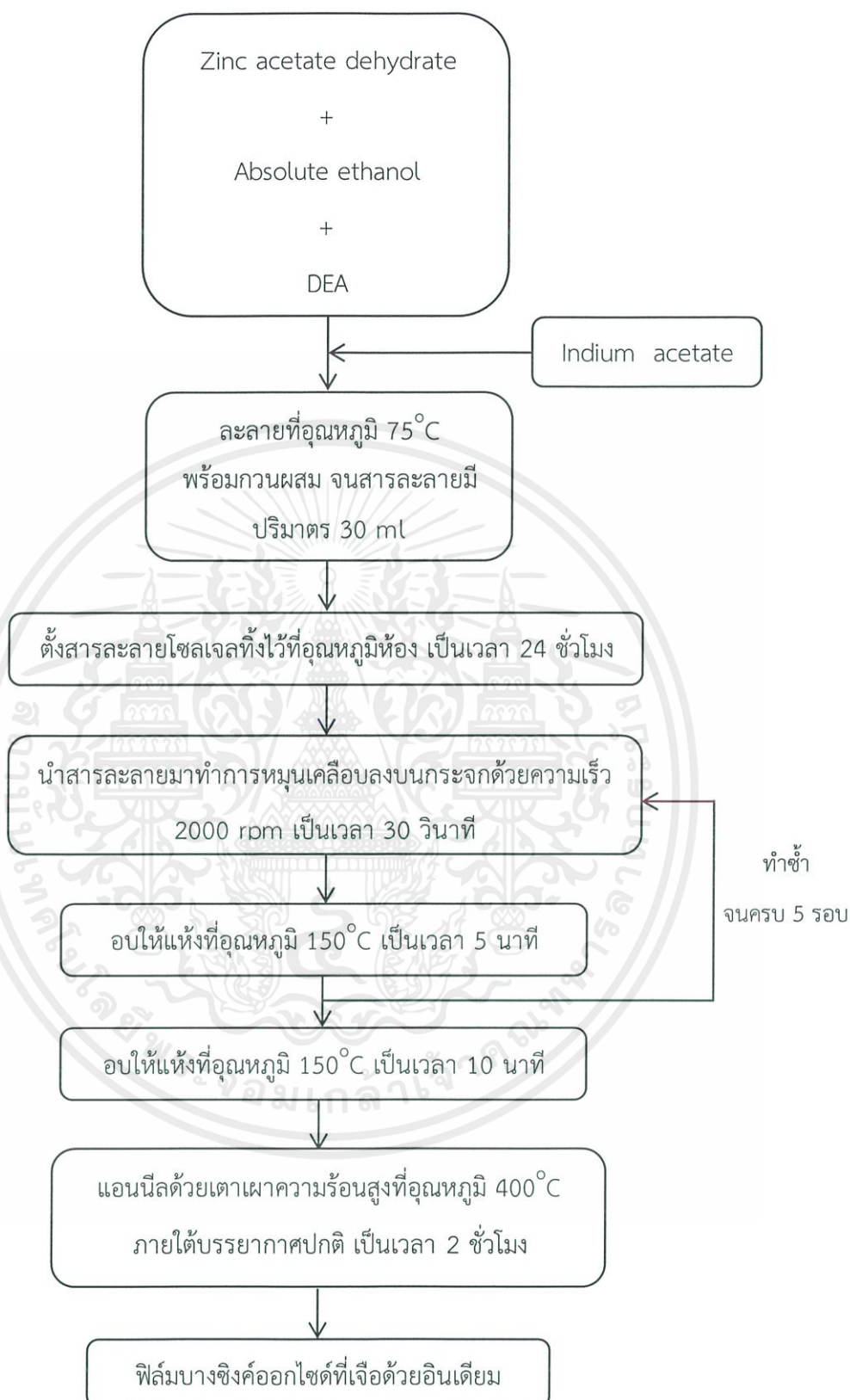
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (IZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ

- (1) ละลาย Zinc acetate dehydrate ความเข้มข้น 0.4M ลงใน Absolute ethanol 50 มิลลิลิตร และ Diethanolamine 1.7 มิลลิลิตร
- (2) ผสม Indium acetate ความเข้มข้น 0.4M แบ่งเป็นความเข้มข้นจาก 1-5 เปอร์เซ็นต์ โดยจำนวนอะตอม ดังแสดงในตารางที่ 3.3 ลงตามลำดับ และปั่นกวนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร
- (3) ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายโซลเจลสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง
- (4) นำสารละลายโซลเจลที่ได้ไปใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์มโดยวิธีการหมุนเคลือบที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- (5) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำตามข้อ (4) อีก 4 รอบ
- (6) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- (7) นำไปแอนนัลด้วยเตาเผาความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม

ตารางที่ 3.3 ปริมาณการเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมโซลเจล เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (IZO) ณ ความเข้มข้น 0.4 M ที่ปริมาตร 50 ml

ปริมาณการเจือ In (at.%)	Indium acetate (กรัม)	ปริมาณ ZnO (at.%)	Zinc acetate dehydrate (กรัม)
1	0.094	99	4.346
2	0.186	98	4.302
3	0.280	97	4.258
4	0.375	96	4.214
5	0.467	95	4.171



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (IZO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 การเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม (IGZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ

- (1) ละลาย Zinc acetate dehydrate ความเข้มข้น 0.4 M ลงใน Absolute ethanol 50 มิลลิลิตร และ Diethanolamine 1.7 มิลลิลิตร
- (2) ผสม Indium acetate และ Gallium nitrate hydrate ความเข้มข้น 0.4M แบ่งเป็นความเข้มข้นต่างๆ คือ 1:3, 3:1 และ 3:3 เปอร์เซ็นต์โดยจำนวนอะตอม ดังแสดงในตารางที่ 3.4 ลงตามลำดับ และปั่นกวนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายมีปริมาตร 30 มิลลิลิตร
- (3) ทิ้งไว้ ณ อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จะได้สารละลายโซลเจลสำหรับการเตรียมฟิล์มบาง
- (4) นำสารละลายโซลเจลที่ได้ไปใช้ในกระบวนการปลูกฟิล์มโดยวิธีการจุ่มเคลือบที่ความเร็ว 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- (5) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที แล้วทำซ้ำข้อ (4) อีก 4 รอบ
- (6) อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
- (7) นำไปแอนนิลด้วยเตาเผาความร้อนสูงที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศปกติ เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ฟิล์มบางเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม

ตารางที่ 3.4 ปริมาณการเตรียมสารตั้งต้นสำหรับการเตรียมโซลเจล เพื่อใช้ในการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคโดปซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม (IGZO) ณ ความเข้มข้น 0.4 M ที่ปริมาตร 50 ml

ปริมาณการเจือ In (at.%)	ปริมาณการเจือ Ga (at.%)	ปริมาณ ZnO (at.%)
1	3	96
3	1	96
3	3	94

โดย การเจืออินเดียม 1 at.% ใช้ Indium acetate ปริมาณ 0.094 กรัม

การเจืออินเดียม 3 at.% ใช้ Indium acetate ปริมาณ 0.280 กรัม

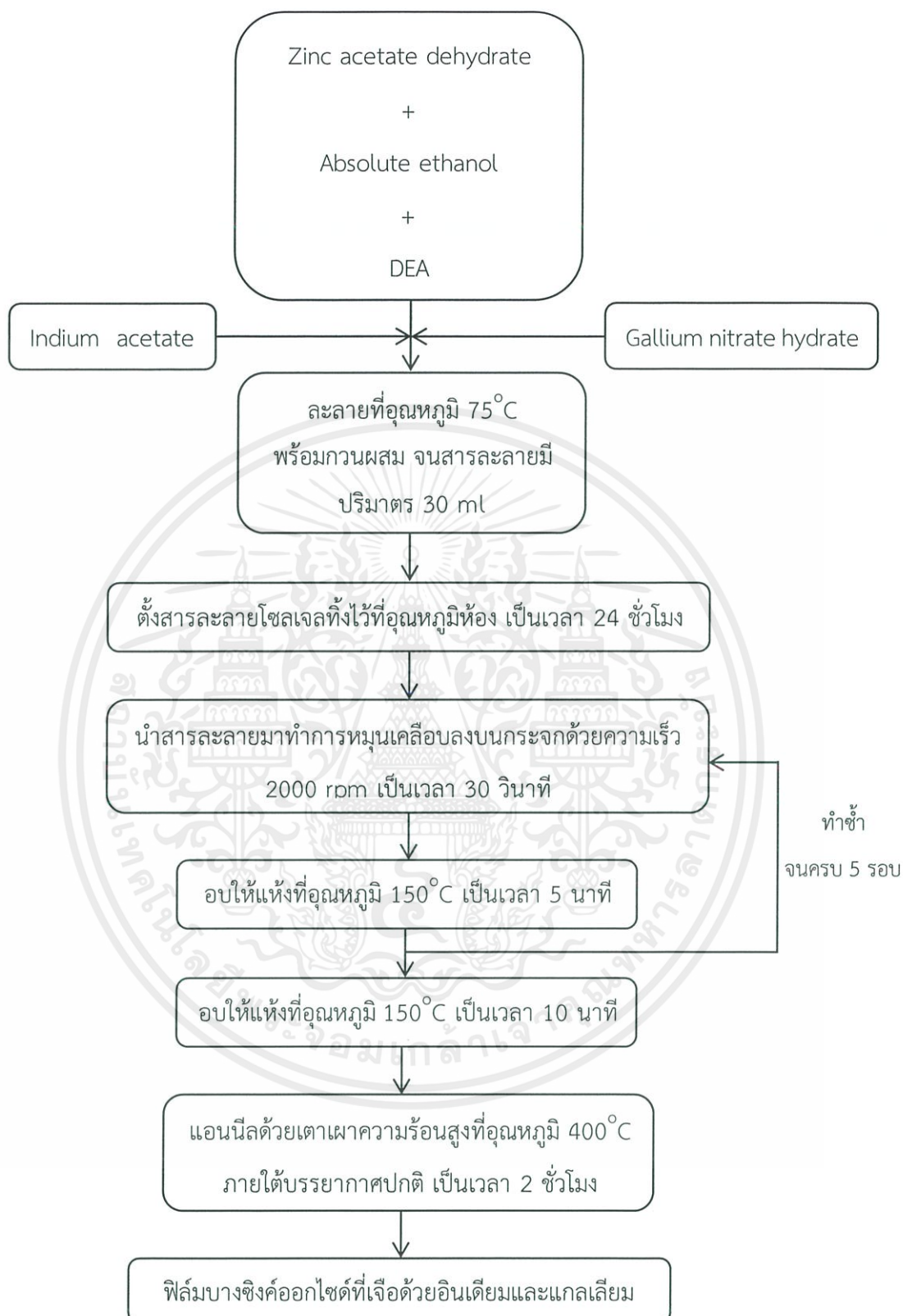
การเจือแกลเลียม 1 at.% ใช้ Gallium nitrate hydrate ปริมาณ 0.082 กรัม

การเจือแกลเลียม 3 at.% ใช้ Gallium nitrate hydrate ปริมาณ 0.246 กรัม

การเตรียมซิงค์ออกไซด์ 94 at.% ใช้ Zinc acetate dehydrate ปริมาณ 4.126 กรัม

การเตรียมซิงค์ออกไซด์ 96 at.% ใช้ Zinc acetate dehydrate ปริมาณ 4.214 กรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางเมทัลโคโคโบซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม

(IGZO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การวิเคราะห์สมบัติเฉพาะของฟิล์มบาง [8]

3.3.5.1 การวิเคราะห์เชิงโครงสร้างผลึกด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X- ray Diffractometer : XRD)

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยการวัดจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) คือระบบที่ใช้หลักการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ตามกฎของแบรกก์ ซึ่งธาตุหรือสารประกอบแต่ละชนิดจะมีมุมและลักษณะการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ต่อมุมเลี้ยวเบนภายในผลึกที่แตกต่างกัน ดังนั้นการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์ม จากการวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกนั้นสามารถมองผลึกว่าประกอบด้วยระนาบของอะตอมต่างๆอะไรบ้าง ซึ่งในงานวิจัยนี้เราตรวจสอบโครงสร้างของฟิล์มบางโดยระบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่อง XRD รุ่น BRUKER AXS : D8 DISCOVER ซึ่งให้ $\text{Cu K}\alpha$ เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ และมีความยาวคลื่น 1.5046 อังสตรอม ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 (a) เครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (b) ตำแหน่งในการวางตัวอย่างเพื่อทำการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD)

3.3.5.2 การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลื่อน (Field Emission Scanning Electron Microscope: FE-SEM)

การวิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวเป็นการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของตัวอย่างได้จากการบังคับอิเล็กตรอนให้กวาดไปบนพื้นผิวแล้วแสดงผลบนจอ (Cathode Ray Tube (CRT)) มีลักษณะของภาพเป็นภาพขาวดำ มีกำลังขยายถึง 500,000 เท่า ขึ้นอยู่กับชนิดของตัวอย่าง และความสามารถแยกแยะแจกแจงรายละเอียด (Resolution) ที่ 1.5 นาโนเมตร หลักการทำงานคือ อันตรกิริยาของอิเล็กตรอนกับตัวอย่าง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary Electron : SE) และจับสัญญาณโดยตัวตรวจจับสัญญาณ (Detector) นำสัญญาณที่ได้ไปขยายและสร้างภาพบนจอแสดงผล ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการ

วิเคราะห์สมบัติทางพื้นผิวของแผ่นฟิล์มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด Hitachi S4700
 ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบเลือนกราด

3.3.5.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบาง (Ultraviolet – Visible Spectrophotometer)

วิธีการวัดการทะลุผ่านของแสง (Transmittance (%)) เป็นเทคนิคการวิเคราะห์สารโดยใช้หลักการดูดกลืนแสงที่อยู่ในช่วงอัลตราไวโอเล็ต และช่วงที่ตามองเห็น ช่วงความยาวคลื่นที่สามารถวิเคราะห์ได้อยู่ที่ประมาณ 190-1000 นาโนเมตร โดยนำสารตัวอย่างวางในบริเวณใกล้แหล่งกำเนิดแสง สารตัวอย่างจะดูดกลืนรังสีหรือแสงบางส่วนไว้ แสงที่ไม่ถูกดูดกลืนจะผ่านออกมาถึงเครื่องวัดแสง (Photodetector) เครื่องวัดแสงจะทำการวัดปริมาณแสงที่ออกมา โดยการหักล้างกับปริมาณของแสงก่อนดูดกลืน จากนั้นจะทำการประมวลผลเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าทะลุผ่านกับค่าความยาวคลื่น (Wavelength) ในงานวิจัยนี้วิเคราะห์การทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านของแสง (UV-Vis Spectrophotometer) PG:T90+ ดังรูปที่ 3.6

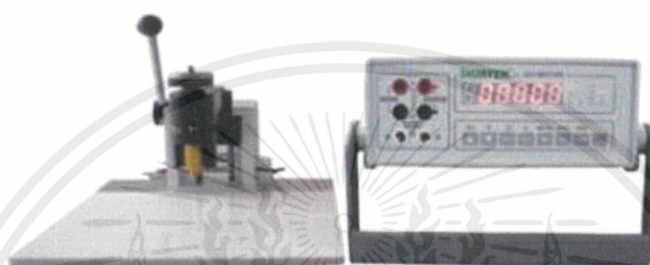


รูปที่ 3.6 เครื่องวัดการทะลุผ่านของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเทคนิค 4-point Probe (four-point probe technique)

หลักการวัดด้วยเทคนิค 4-point Probe นั้น สามารถกระทำได้โดยการใช้ขั้วโลหะ 4 ขั้ว ทำผิวสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำโดยที่ผิวสัมผัสด้านนอก 2 จุดนั้นเป็นส่วนที่ให้กระแสที่ทราบค่าไหลผ่าน ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าด้านใน 2 ขั้วนั้นใช้ในการวัดความต่างศักย์ โดยผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิคนี้สามารถนำไปวิเคราะห์หาสภาพความต้านทานของสารกึ่งตัวนำได้ โดยในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัด 4-point Probe รุ่น Quatek QTI-5601TSR ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 เครื่องวัด 4-point Probe

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปราย

4.1 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียม (GZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ

4.1.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD)

จากการวิเคราะห์สมบัติทางโครงสร้างของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียมซึ่งเตรียมด้วยวิธีหมุนเคลือบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นในการเจือที่ 1 at.%, 2 at.%, 3 at.%, 4 at.% และ 5 at.% ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อทำการพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง พบว่ามีความสอดคล้องกับระนาบเลี้ยวเบน (100), (002), (101), (102), (110), และ (103) หมายความว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ตไซต์ ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของโครงสร้างผลึกซิงค์ออกไซด์ โดยระนาบเลี้ยวเบนหลักที่มีจุดยอดสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ได้แก่ (100), (002), และ (101) เมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณการเจือของแกเลียม จะส่งผลให้ระนาบเลี้ยวเบนหลักลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งสามารถสังเกตได้จากช่วงความยาวบริเวณกึ่งกลางจากยอด (FWHM) ที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณความเข้มข้นของแกเลียม แสดงว่ามีผลทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มบางลดลง และขนาดของผลึกมีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงด้วยเช่นกัน เมื่อทำการคำนวณหาค่าเฉลี่ยขนาดของผลึกตามสมการของเชอเรอร์ (Scherrer's equation) ดังแสดงด้านล่าง [14]

$$D = \frac{0.9\lambda}{\beta \cos\theta} \quad (4.1)$$

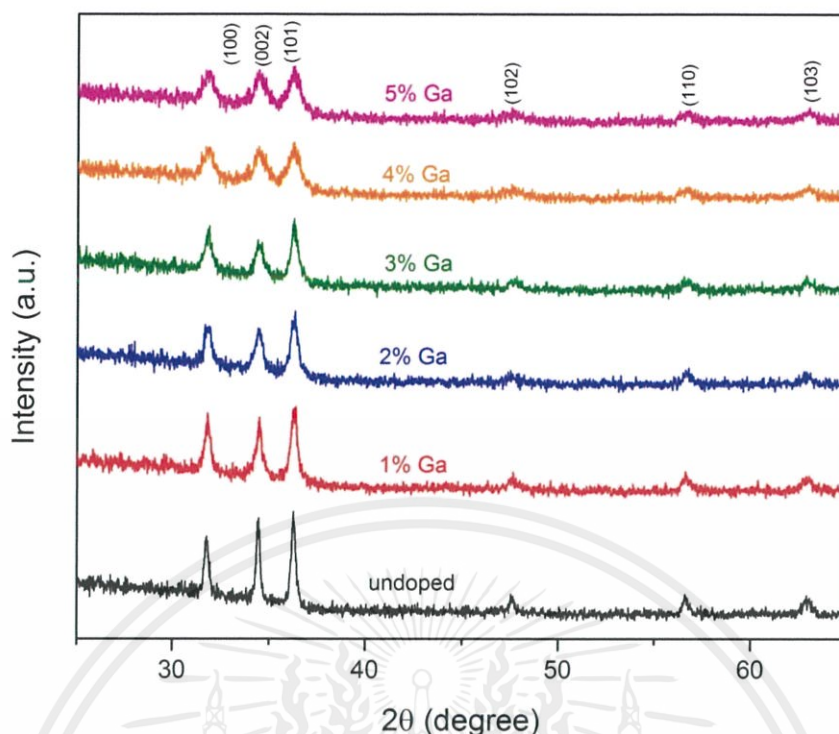
เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ซึ่งมีแหล่งกำเนิดจาก $\text{Cu K}\alpha$ ($\lambda = 0.15405 \text{ nm}$)

β คือ FWHM ในหน่วย radians และ

θ คือ มุมในการเลี้ยวเบนของจุดยอด

โดยค่าเฉลี่ยของขนาดผลึกลดลงจาก 26.82 นาโนเมตร ถึง 11.01 นาโนเมตร ซึ่งการลดลงของขนาดผลึกในฟิล์มบางนั้นอาจอธิบายได้ว่ามีสาเหตุมาจากความเครียด (Stress) ที่ปรากฏในโครงสร้างอันเกิดจากขนาดที่แตกต่างกันของไอออนระหว่างซิงค์และสารเจือ เมื่อเจือสาร อะตอมของสารเจือจะเข้าไปรวมภายในโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ โดยแทรกเข้าไปแทนที่ไอออนของซิงค์ ซึ่งเป็นไอออนหลักของโครงสร้าง ขนาดรัศมีไอออนของสารเจือที่น้อยกว่านั้นทำให้ยากต่อการแทรกเข้าไปแทนที่ไอออนหลักของโครงสร้างซึ่งมีรัศมีมากกว่า แต่ขณะเดียวกันก็จะไปเหนี่ยวนำให้บิดเบือนโครงสร้างของซิงค์ออกไซด์ และทำให้เกิดความเครียดในโครงสร้าง [11]

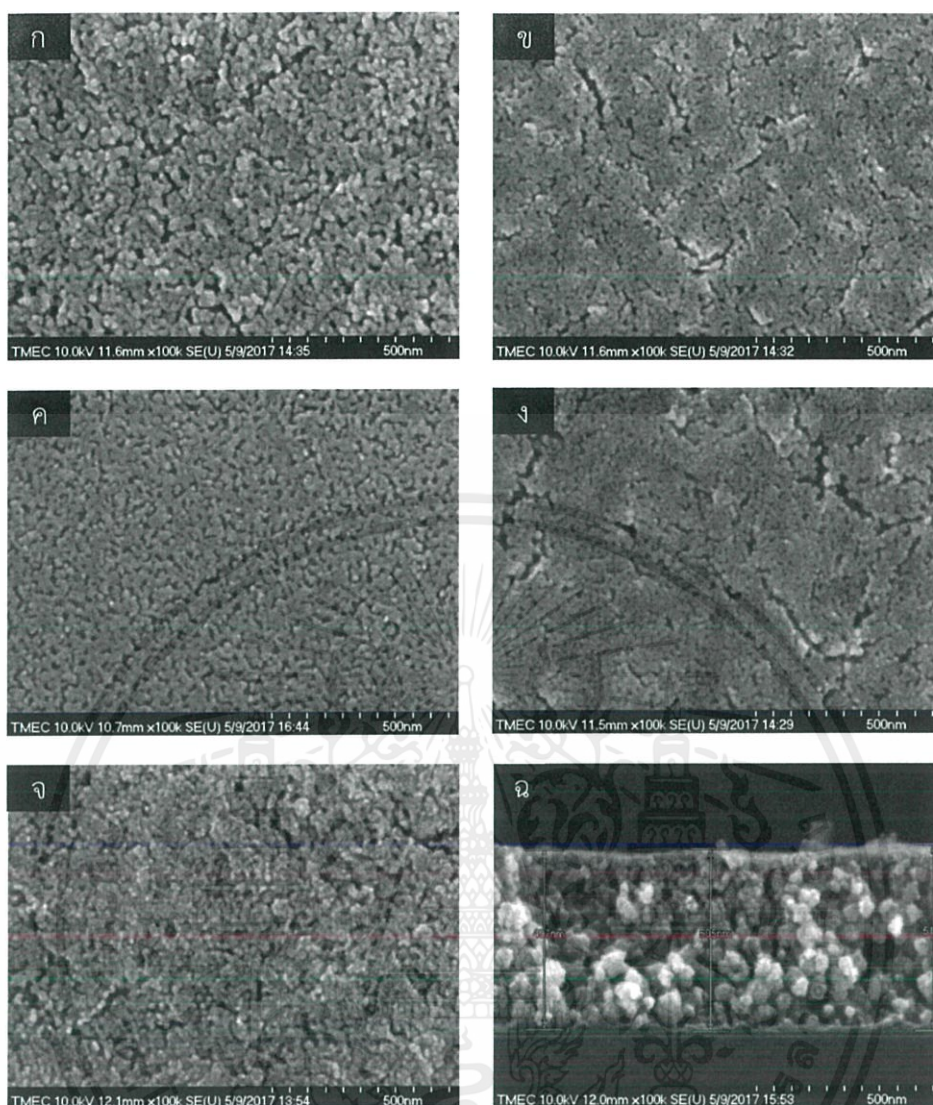
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือปนแกเลียมแตกต่างกัน

4.1.2 การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM: Field emission scanning electron microscope)

จากภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ ได้แก่ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ตามที่แสดงในรูปที่ 4.2 สามารถสังเกตเห็นผลึกเรียงตัวอย่างหนาแน่นและมีลักษณะโครงสร้างผลึกแบบพหุผลึก (Polycrystalline) ตามธรรมชาติ ความหนาของฟิล์มบางมีค่าประมาณ 500 นาโนเมตร เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือจะพบว่าขนาดของอนุภาคลดลงอย่างเห็นได้ชัดเจนและยึดเกาะชิดกันมากขึ้น ทำให้เกิดพื้นที่ว่างคล้ายรอยแยกของแต่ละเกรนขึ้น ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 (ก), 4.4 (ข), 4.4 (ง) และ 4.4 (จ) ส่วนรูปที่ 4.4 (ค) ซึ่งก็คือฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียม 3% จะมีการจัดเรียงตัวของผลึกเป็นระเบียบมากที่สุด

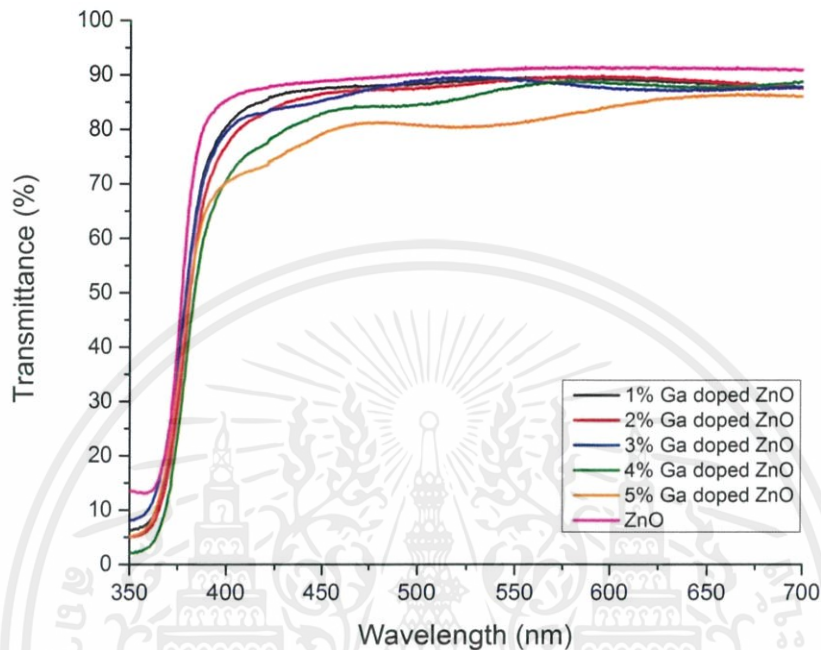


รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลเลียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ ได้แก่ (ก) 1% (ข) 2% (ค) 3% (ง) 4% (จ) 5% และ (ฉ) ภาพตัดขวางของฟิล์มบาง

4.1.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบาง (Ultraviolet – Visible Spectrophotometer)

รูปแบบการทะลุผ่านของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลเลียม (GZO) เตรียมโดยวิธีการโซล เจลแบบหมุนเคลือบ บนฐานรองกระจก ภายใต้ปริมาณการเจือ 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ที่ อุณหภูมิอบ 150 องศาเซลเซียส และแอนนัลในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ที่ช่วง ความยาวคลื่น 350 - 700 นาโนเมตร ตามที่แสดงในรูปที่ 4.3 ผลของความสัมพันธ์ของการทะลุผ่าน ของแสง พบว่าปริมาณการเจือแกเลเลียมมีผลต่อสมบัติทางแสงของฟิล์มบาง โดยฟิล์มบาง GZO มี ค่าเฉลี่ยของการส่งผ่านอยู่ในช่วง 75% ถึง 92% แต่จะแตกต่างกันในบริเวณขอบเขตการดูดกลืน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อีกทั้งยังพบว่าที่ปริมาณการเจือต่ำจะมีความโปร่งใสสูง และมีขอบเขตการดูดกลืนที่ชัดเจนอีกด้วย ซึ่งขอบเขตการดูดกลืนดังกล่าวอาจบ่งชี้ถึงความสมบูรณ์ของการก่อตัวของผลึกซิงค์ออกไซด์ เมื่อปริมาณการเจือเพิ่มมากขึ้น ขอบเขตการดูดกลืนจะมีการเลื่อนไปทางความยาวแสงที่เพิ่มขึ้น (Red shift)



รูปที่ 4.3 กราฟการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียมภายใต้สัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ

แถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียมสามารถอนุมานได้จากวิธีการพล็อตของทาว (Tauc plot) [14] ตามสมการด้านล่าง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{1/2} \quad (4.2)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

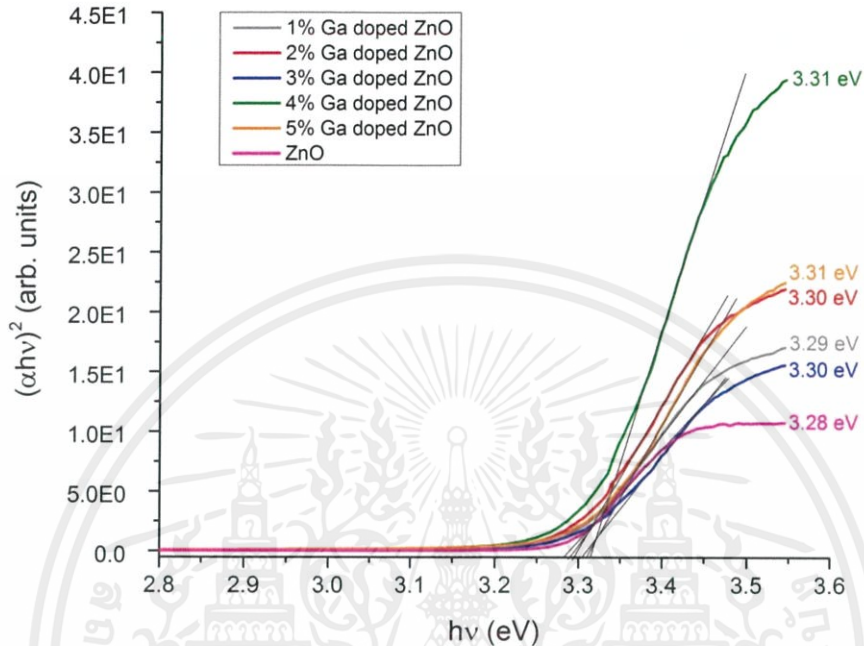
A คือ ค่าคงที่

E_g คือ แถบพลังงานทางแสง

ในรูปที่ 4.4 แสดงแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางที่ความเข้มข้นในการเจือต่างๆ โดยคำนวณหา

แถบพลังงานต้องห้าม $(\alpha h\nu)^2$ กับพลังงานของโฟตอน $(h\nu)$ และประมาณค่าช่องว่างของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางโดยการลากเส้นตรงตัดพลังงานโฟตอน พบว่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก 3.28 eV ถึง 3.31 eV เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือของแกลเลียม



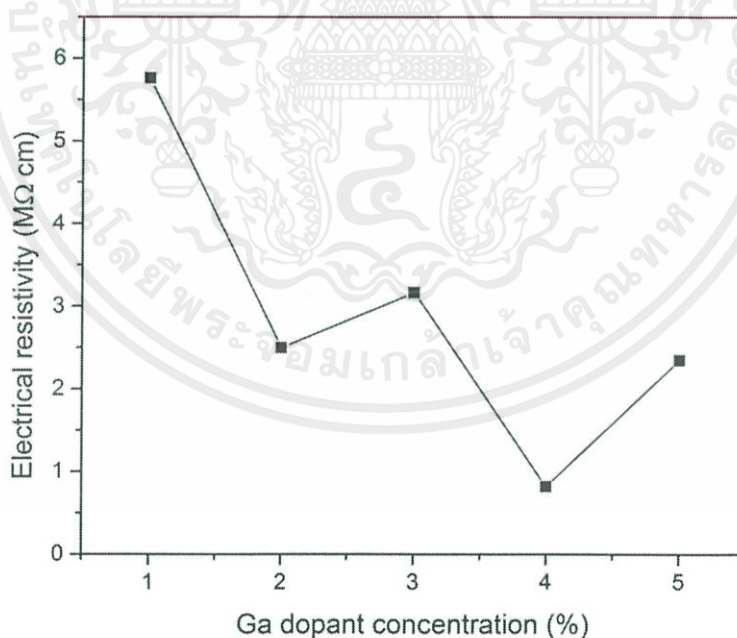
รูปที่ 4.4 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม (GZO)

สาเหตุที่อิทธิพลของสารเจือมีผลต่อแถบพลังงานต้องห้ามอาจเกิดจากการเสื่อมของการก่อดิสก์และการลดลงของขนาดเกรนของฟิล์มบาง ขอบเกรนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากขนาดเกรนที่ลดลงแต่มีพื้นที่เท่าเดิมจึงเป็นกับดักอิเล็กตรอนและทำให้ความเข้มพาหะลดลง [13] อย่างไรก็ตาม ผลการวิเคราะห์มีแนวโน้มที่แถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางที่เจือด้วยแกลเลียมเพิ่มมากขึ้น ไอออนของสารเจือซึ่งเป็นผู้ให้เข้าไปแทนที่ไอออนของซิงค์ในโครงสร้างผลึก และเพิ่มอิเล็กตรอนอิสระทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของความเข้มพาหะ อิเล็กตรอนเหล่านี้จะเข้าไปอยู่ที่ด้านล่างของแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) ซึ่งทำให้แถบพลังงานต้องห้ามกว้างขึ้น ดังนั้นอิทธิพลของความเข้มพาหะซึ่งเกิดจากการเพิ่มปริมาณการเจือจึงมีผลมากกว่า ซึ่งกลไกดังกล่าวนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เบอสไตน์-มอส (Burstein-Moss effect) [14] นอกจากนี้แถบพลังงานต้องห้ามที่กว้างขึ้นยังอาจเกิดจากอิทธิพลของปรากฏการณ์ผลของขนาดควอนตัม (Quantum Size Effect, QZE) โดยโครงสร้างผลึกขนาดนาโนจะประพฤติตนคล้ายกับบ่อศักย์ เมื่อโครงสร้างผลึกมีขนาดเล็กลงอันเนื่องมาจากการเจือสาร บ่อศักย์เสมือนก็จะแคบลง ส่งผลให้พลังงานมากขึ้นและทำให้แถบพลังงานต้องห้ามกว้างขึ้นด้วย [15]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Four-point probe

จากผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Four-point probe ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียมที่เตรียมโดยวิธีหมุนเคลือบ ภายใต้ปริมาณการเจือ 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ตามที่แสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าความต้านทานของฟิล์มบางจะลดลงเมื่อเจือสารในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยปรากฏในเงื่อนไขของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของแกเลียม 4% ซึ่งมีความต้านทานต่ำที่สุด คือ $0.8162 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$ อิทธิพลของแกเลียมต่อความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางเกิดจากช่องว่างของออกซิเจนและการแทนที่ของไอออนซิงค์ เมื่อไอออนของสารเจือเข้ามาแทนที่ Zn^{2+} ไอออนของสารเจือซึ่งเป็นธาตุในหมู่ 3 นั้น สามารถที่จะเพิ่มอิเล็กตรอนอิสระได้ 1 ตัว ซึ่งมากกว่าไอออนของ Zn^{2+} และนั่นเป็นผลให้สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางได้รับการปรับปรุงให้ดีขึ้น สำหรับในฟิล์มบางที่มีความเข้มข้นของสารเจือมากเกินไป ไอออนของสารเจืออาจเกิดการออกซิไดซ์และเปลี่ยนรูปไปเป็นอนุมูลฐาน ซึ่งมีสมบัติเป็นฉนวน ทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น อีกทั้งขนาดเกรนที่ลดลงยังทำให้เพิ่มการกระเจิงที่ขอบเกรนยังผลให้ความคล่องพาหะลดลงอีกด้วย ทำให้บริเวณขอบเกรนเกิดกำแพงศักย์และทำให้ความคล่องพาหะลดลง [16]

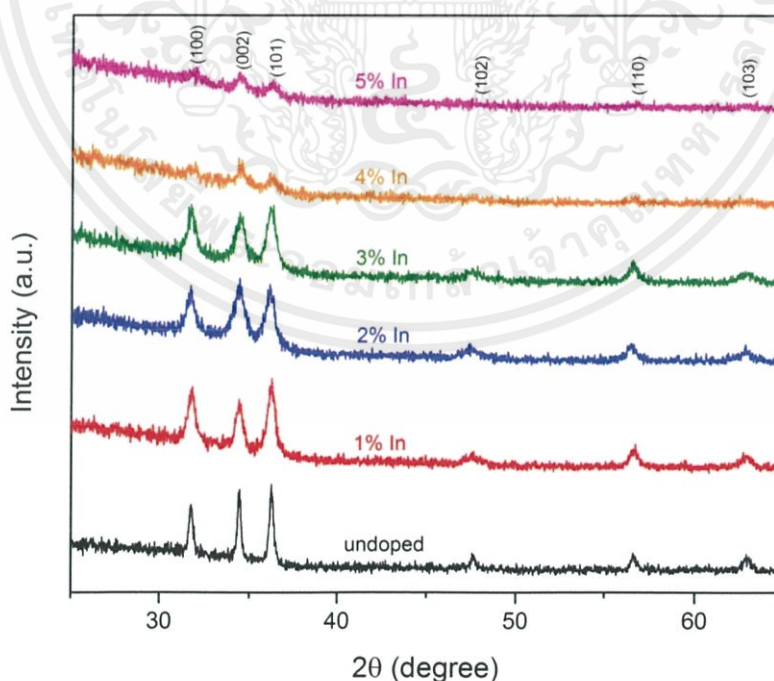


รูปที่ 4.5 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโปร่งใสซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกเลียม (GZO)

4.2 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (IZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ

4.2.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD)

รูปที่ 4.6 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่สัดส่วนปริมาณการเจือ 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% เมื่อทำการพิจารณารูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง พบว่ามีความสอดคล้องกับระนาบเลี้ยวเบน (100), (002), (101), (102), (110), และ (103) หมายความว่าฟิล์มบางมีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอลเวิร์ตไซด์ ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของโครงสร้างผลึกซิงค์ออกไซด์ โดยระนาบเลี้ยวเบนหลักที่มีจุดยอดสังเกตเห็นได้อย่างชัดเจน ได้แก่ (100), (002), และ (101) เมื่อเพิ่มสัดส่วนปริมาณการเจือของอินเดียม จะส่งผลให้ระนาบเลี้ยวเบนหลักลดลงอย่างเห็นได้ชัดเช่นเดียวกันกับฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียม ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ตามที่แสดงในรูปที่ 4.7 และเมื่อคำนวณหาค่าเฉลี่ยของขนาดผลึกตามสมการของเชอเรอร์ (Scherrer's equation) ดังแสดงในสมการที่ 4.1 ขนาดเฉลี่ยของผลึกมีการลดลงจาก 17.33 นาโนเมตร ถึง 10.90 นาโนเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับสารที่เจือด้วยแกลเลียม ผลจากการเจือด้วยอินเดียมจะมีขนาดของผลึกในฟิล์มบางที่เล็กกว่า

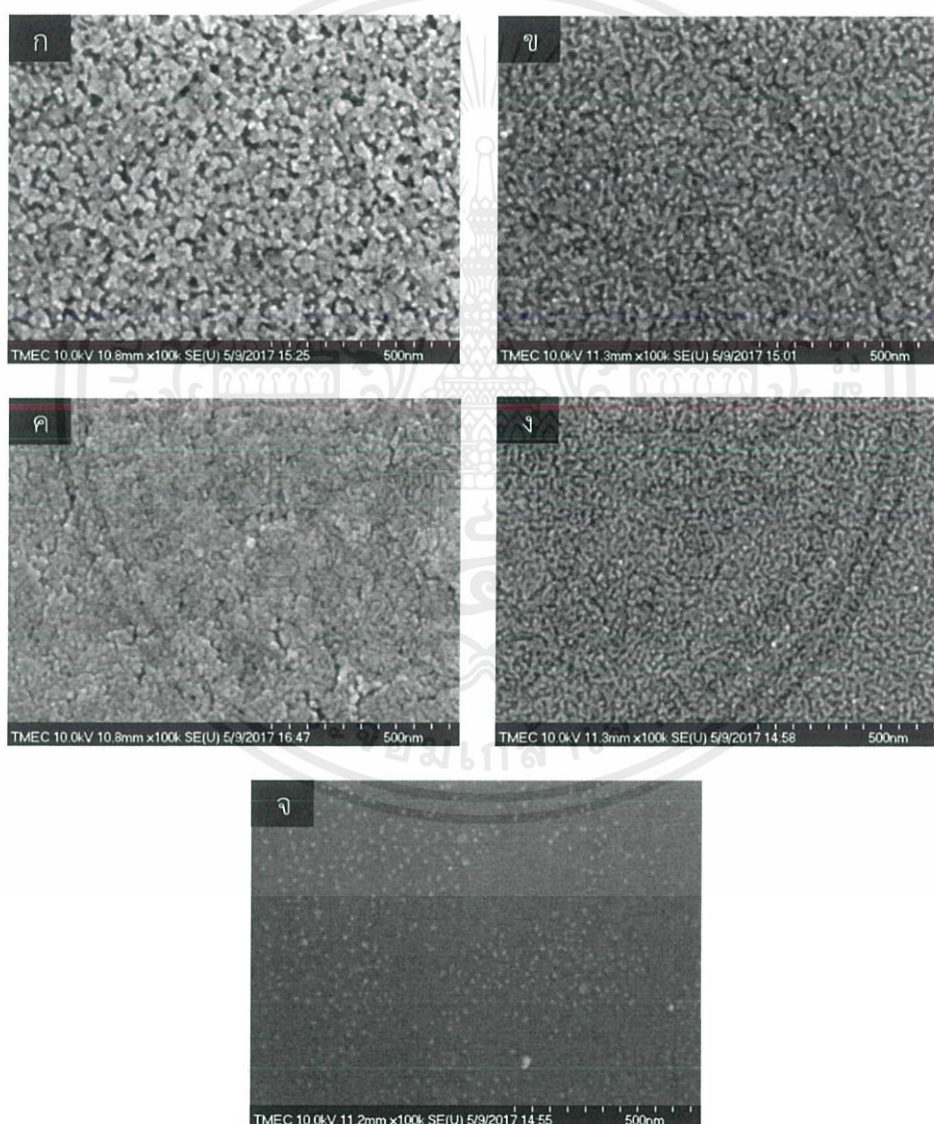


รูปที่ 4.6 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจืออินเดียมแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM: Field emission scanning electron microscope)

จากภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม ภายใต้ปริมาณการเจือ 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ตามที่แสดงในรูปที่ 4.7 จะสังเกตเห็นว่าการก่อตัวของฟิล์มนั้นมีการจัดเรียงตัวอย่างหนาแน่นและสม่ำเสมอ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณการเจือของอินเดียม พบว่าเนื้อฟิล์มที่ก่อตัวขึ้นจะเกาะกันหนาแน่นมากขึ้น และอนุภาคมีขนาดเล็กลง แต่ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม 5% จะมีลักษณะกระจายตัวแบบไม่เป็นระเบียบ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการที่เจืออินเดียมเข้าไปในปริมาณที่มากเกินไป จึงทำให้อินเดียมไปขัดขวางการก่อตัวเป็นผลึกของซิงค์ออกไซด์

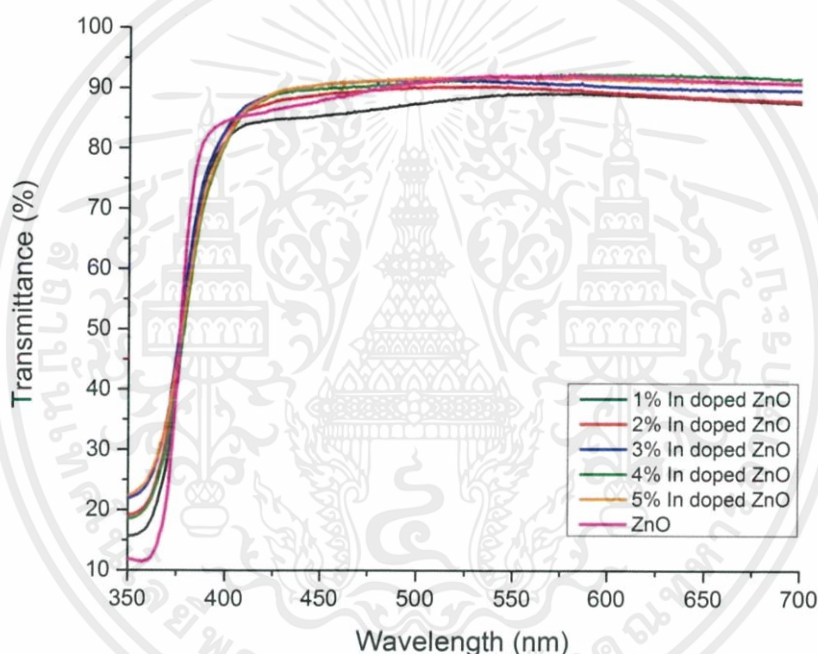


รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ ได้แก่ (ก) 1% (ข) 2% (ค) 3% (ง) 4% และ (จ) 5%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบาง (Ultraviolet – Visible Spectrophotometer)

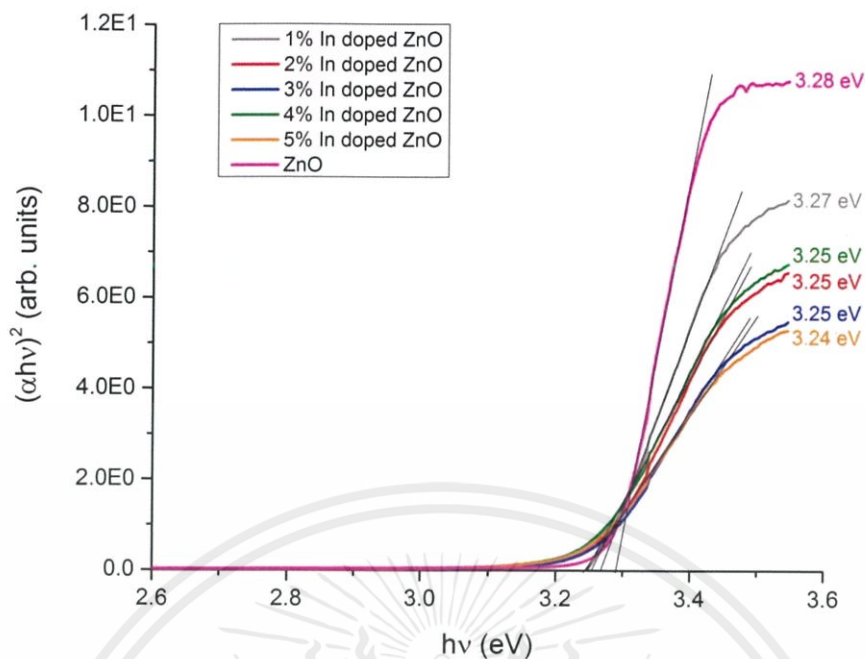
จากผลวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่องวัดการทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่อง Ultraviolet – Visible Spectrophotometer ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมโดยวิธีหมุนเคลือบ ภายใต้ปริมาณการเจือ 0%, 1%, 2%, 3%, 4% และ 5% ที่อุณหภูมิอบ 150 องศาเซลเซียส และแอนนัลในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.8 สเปกตรากการทะลุผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตรของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมที่ความเข้มข้นในการเจือต่างๆ พบว่ามีค่าเฉลี่ยของการส่งผ่านอยู่ในช่วง 85% ถึง 92% โดยฟิล์มบางที่มีปริมาณการเจือเพิ่มมากขึ้น จะมีความโปร่งใสเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน



รูปที่ 4.8 กราฟการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมภายใต้สัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ

แถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมสามารถอนุมานได้จากวิธีการพล็อตของ ทาว (Tauc plot) โดยค่าแถบพลังงานต้องห้ามที่ได้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงระดับพลังงานที่อิเล็กทรอนิกส์ในแถบวาเลนซ์ต้องการใช้กระตุ้นเพื่อย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบการนำไฟฟ้า จากในรูปที่ 4.9 ซึ่งแสดงแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางที่ความเข้มข้นในการเจือต่างๆ ผลปรากฏว่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม มีแนวโน้มลดลงจาก 3.28 eV ถึง 3.24 eV เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือของอินเดียม ซึ่งจะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแคลเซียม

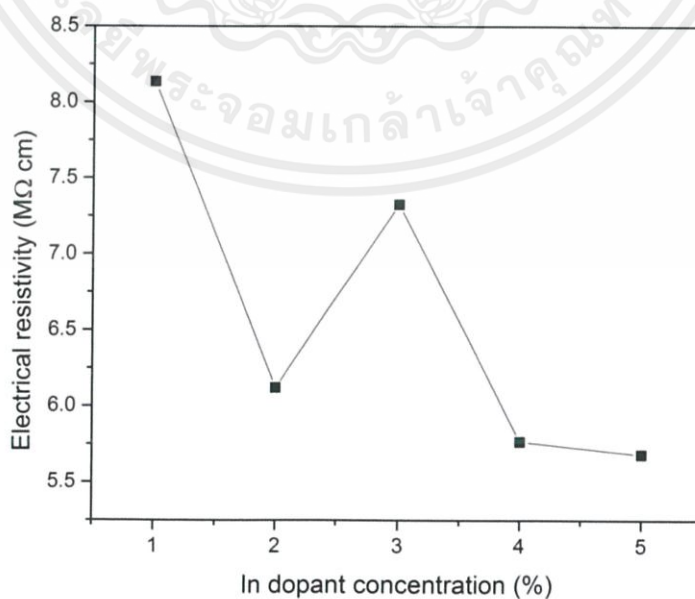
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (IZO)

4.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Four-point probe

ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโปร่งใสซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมในสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ ตั้งแต่ 1% - 5% ตามที่แสดงในรูปที่ 4.10 พบว่าความต้านทานของฟิล์มบางจะลดลงเมื่อเจือสารในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยปรากฏในเงื่อนไขของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของอินเดียม 5% ซึ่งมีความต้านทานต่ำที่สุด คือ $5.682 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$



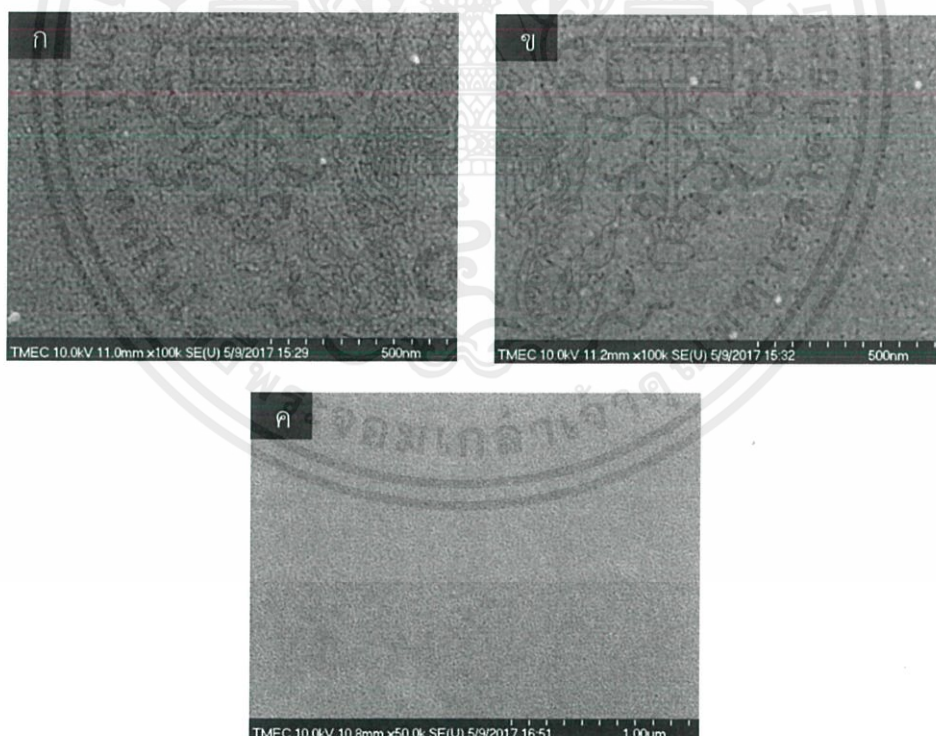
รูปที่ 4.10 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโปร่งใสซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียม (IZO)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การวิเคราะห์สมบัติพื้นฐานของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและ แกเลียม (IGZO) โดยวิธีการหมุนเคลือบ

4.3.1 การวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM: Field emission scanning electron microscope)

จากภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกเลียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ ได้แก่ 1:3%, 3:1% และ 3:3% ตามที่แสดงในรูปที่ 4.11 สามารถสังเกตเห็นได้ว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกเลียมที่สัดส่วนปริมาณการเจือ 1:3 และ 3:3 จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกที่เป็นระเบียบและหนาแน่น โดยที่ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกเลียมที่สัดส่วนปริมาณการเจือ 1:3 จะมีขนาดของอนุภาคจะมีขนาดใหญ่กว่าอนุภาคของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกเลียมที่สัดส่วนปริมาณการเจือ 3:3 ส่วนฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกเลียมที่สัดส่วนปริมาณการเจือ 3:1 จะมีลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกที่ไม่แน่นอน ซึ่งลักษณะการจัดเรียงตัวของผลึกที่พื้นผิวของฟิล์มบางนี้ส่งผลให้สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางที่สัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ มีความแตกต่างกัน

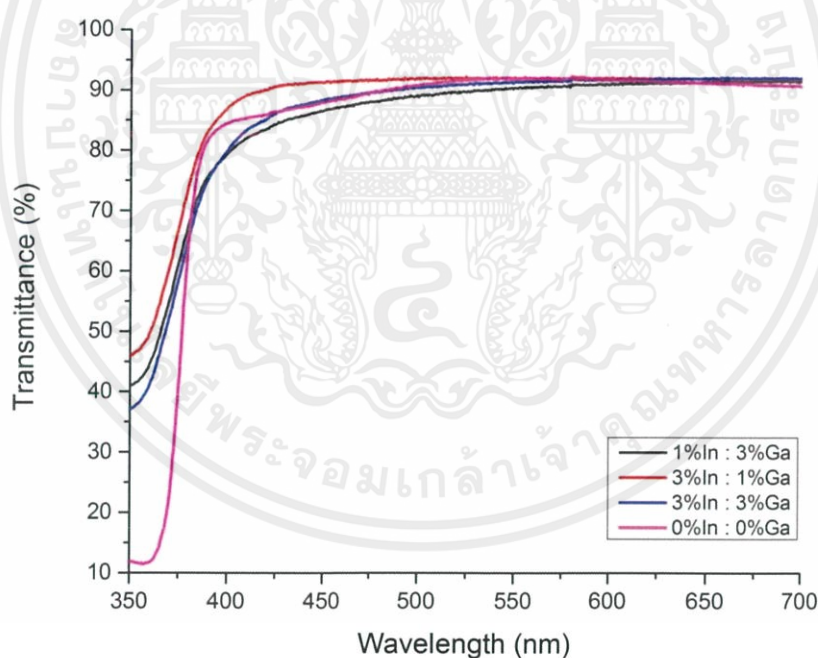


รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายลักษณะทางสัณฐานวิทยาของพื้นผิวฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกเลียมภายใต้เงื่อนไขสัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ ได้แก่ (ก) 1:3% (ข) 3:1% และ (ค) 3:3%

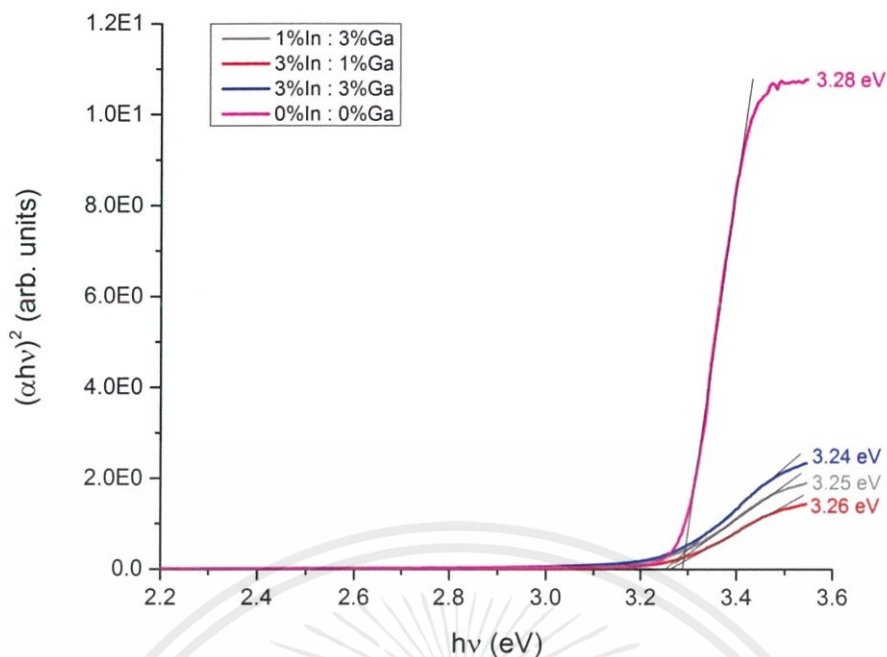
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของสารที่เตรียมได้ด้วยเทคนิค UV-Vis Spectroscopy

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงจากเครื่องวัดการทะลุผ่านของแสงด้วยเครื่อง Ultraviolet – Visible Spectrophotometer ของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกลเลียมโดยวิธีหมุนเคลือบ ภายใต้สัดส่วนปริมาณการเจือ 0:0%, 1:3%, 3:1%, และ 3:3% ที่อุณหภูมิอบ 150 องศาเซลเซียส และ แอนนีสในบรรยากาศปกติที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ตามที่แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่าสเปกตรากการทะลุผ่านของแสงในช่วงความยาวคลื่น 350 นาโนเมตร ถึง 700 นาโนเมตรของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกลเลียมที่สัดส่วนความเข้มข้นในการเจือต่างๆ มีค่าเฉลี่ยของการส่งผ่านอยู่ในช่วง 85% ถึง 92% ซึ่งบ่งบอกว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้มีความโปร่งใสสูง และมีแนวโน้มว่าปริมาณการเจือที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มความโปร่งใสของฟิล์มบางได้ แถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกลเลียมสามารถอนุมานได้จากวิธีการพล็อตของทาว ตามสมการที่ 4.1 ผลปรากฏว่าแถบพลังงานต้องห้ามในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือรวมด้วยอินเดียมและแกลเลียม จะมีค่าต่ำที่สุดเมื่อมีปริมาณการเจือของอินเดียมและแกลเลียมเท่ากัน คือ 3:3% โดยมีค่าของแถบพลังงานต้องห้ามเป็น 3.24 eV ตามที่แสดงในรูปที่ 4.13



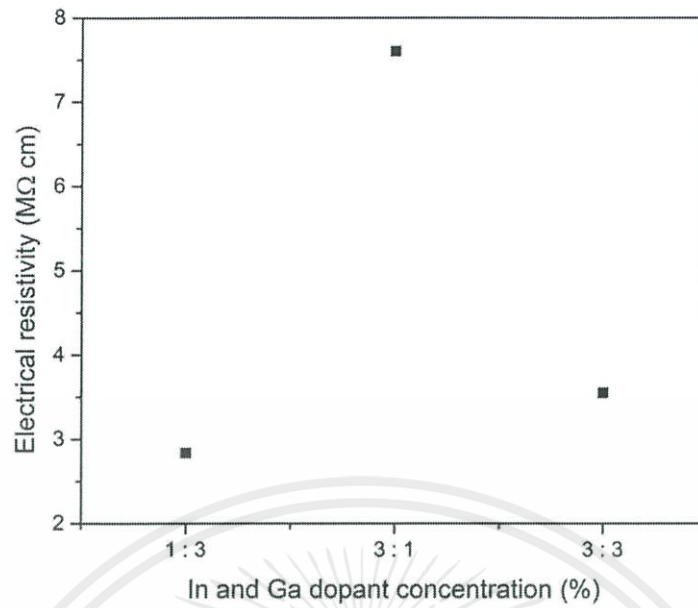
รูปที่ 4.12 กราฟการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียมภายใต้สัดส่วนปริมาณการเจือต่างๆ



รูปที่ 4.13 การหาค่าแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกเลเลียม (IGZO)

4.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่อง Four-point probe

จากผลวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกเลเลียมที่เตรียมโดยวิธีหมุนเคลือบ ภายใต้ปริมาณการเจือ 1:3%, 3:1% และ 3:3% ตามที่แสดงในรูปที่ 4.13 พบว่าความต้านทานของฟิล์มบางจะลดลงเมื่อเจือสารในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสมโดยปรากฏในเงื่อนไขของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของอินเดียมและแกเลเลียมเป็น 1:3% ซึ่งมีความต้านทานต่ำที่สุด คือ $2.836 \times 10^6 \Omega \cdot cm$ ลำดับถัดมาคือฟิล์มบางที่มีปริมาณการเจือของอินเดียมและแกเลเลียมเป็น 3:3% และลำดับสุดท้ายคือฟิล์มบางที่มีปริมาณการเจือของอินเดียมและแกเลเลียมเป็น 3:1% โดยเรียงลำดับจากความต้านทานต่ำไปสูง ความต้านทานทางไฟฟ้าของฟิล์มบางจะมีความสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ทางสัญญาณวิทยาของพื้นผิว คือฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของอินเดียมและแกเลเลียมเป็น 1:3% ซึ่งมีความต้านทานต่ำที่สุด มีขนาดของอนุภาคใหญ่ที่สุด เกรนจึงมีขนาดใหญ่ไปด้วย ส่งผลให้ความคล่องตัวของพาหะมีมากและสามารถนำไฟฟ้าได้ดีกว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของอินเดียมและแกเลเลียมเป็น 3:1% และ 3:3%



รูปที่ 4.14 ความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบางโปร่งใสซึ่งค้ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและ
แกเลเลียม (IGZO)

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยที่ได้มีการเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียม ด้วยวิธีการโซลเจลแบบหมุนเคลือบ ภายใต้เงื่อนไขการเปลี่ยนแปลงปริมาณการเจือ จากนั้นทำการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนด้วยรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction : XRD) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Field emission scanning electron microscope : FE-SEM) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อสัดส่วนปริมาณการเจือของอินเดียมและแกลเลียมเพิ่มมากขึ้น จะมีผลทำให้ความเป็นผลึกของฟิล์มบางลดลง และขนาดของผลึกมีแนวโน้มที่จะมีขนาดเล็กลงเช่นเดียวกัน เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลจากการเจือด้วยแกลเลียมกับผลจากการเจือด้วยอินเดียม สามารถสรุปได้ว่าการเจือด้วยอินเดียมจะมีขนาดของผลึกในฟิล์มบางที่เล็กกว่า แล้วทำการวิเคราะห์สมบัติทางแสงด้วยเครื่องวัดการทะลุผ่านทางแสงของฟิล์มบาง (Ultraviolet – Visible Spectrophotometer) พบว่าฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมในปริมาณการเจือต่ำจะมีความโปร่งใสสูง และแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยแกลเลียมมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเจือ ส่วนในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมจะมีความโปร่งใสเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณการเจือสูง และแถบพลังงานต้องห้ามของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณของสารเจือ ส่วนในฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกลเลียมที่สัดส่วนความเข้มข้นในการเจือต่างๆ มีความโปร่งใสสูง และมีแนวโน้มว่าปริมาณการเจือที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มความโปร่งใสของฟิล์มบางได้ จากการวิเคราะห์สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยเครื่อง Four-point probe แสดงให้เห็นว่าความต้านทานของฟิล์มบางจะลดลงเมื่อเจือสารในปริมาณความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยปรากฏในเงื่อนไขของฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของแกลเลียม 4% ซึ่งมีความต้านทานคือ $0.8162 \times 10^6 \Omega \cdot cm$ ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของอินเดียม 5% ซึ่งมีความต้านทาน คือ $5.682 \times 10^6 \Omega \cdot cm$ และฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่มีปริมาณการเจือของอินเดียมและแกลเลียมเป็น 1:3% ซึ่งมีความต้านทาน คือ $2.836 \times 10^6 \Omega \cdot cm$ ซึ่งผลการศึกษานี้ทั้งหมดนี้ทำให้ทราบถึงเทคนิค กระบวนการ ตัวแปรและเงื่อนไขของการสังเคราะห์ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอินเดียมและแกลเลียมที่เหมาะสม อีกทั้งการวิจัยนี้ยังสามารถใช้เป็นแนวทางที่จะทำการศึกษาและพัฒนาเพื่อให้ได้วัสดุที่ดีขึ้นสำหรับการนำไปใช้ในงานเฉพาะทางต่อไป

5.2 ปัญหาและแนวทางแก้ไข

5.2.1 ในขั้นตอนการเตรียมสารละลายโซลเจล เมื่อสภาพอากาศมีความชื้นสูง จะส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสาร โดยจะใช้เวลาในการละลายมากขึ้น วิธีแก้ไขคือควรเตรียมสารละลายโซลเจลในบริเวณที่มีการควบคุมความชื้น

5.2.2 การแอนนิลฟิล์มบางในเตาเผาที่มีบรรยากาศปกติ ทำให้ฟิล์มบางมีค่าการนำไฟฟ้าที่ต่ำ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและก๊าซอื่นๆในบรรยากาศ จึงอาจก่อตัวเป็นสิ่งเจือปนขึ้นมาได้ ควรแก้ไขโดยการแอนนิลฟิล์มบางในเตาเผาที่มีบรรยากาศเป็นไนโตรเจน อาร์กอน หรือสุญญากาศ

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เพื่อยืนยันลักษณะโครงสร้างของสารที่เตรียมได้ในฟิล์มบางซึ่งค่อนข้างดีที่เจือร่วมด้วยอินเดียมและแกเลเลียม (IGZO) ควรทำการวัดด้วยเทคนิคเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD)

5.3.2 ควรสร้างระบบให้มีความเสถียรเพื่อการเคลือบฟิล์มจะได้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

5.3.3 เมื่อได้ฟิล์มบางแล้ว ควรนำไปทำการวิเคราะห์ผลทันที เพราะหากทิ้งไว้เป็นเวลานาน อาจทำให้ฟิล์มบางเกิดการเสื่อมสภาพ และจะทำให้ผลการวิเคราะห์มีความไม่แม่นยำ

บรรณานุกรม

- [1] A. Stadler, “Transparent Conducting Oxides An Up-To-Date Overview”, Materials, Vol. 5 (2012), pp. 661-683
- [2] 2007. มารู้จักกับจอภาพมีดือแบบ Active-matrix และ Passive-Matrix. [Online]. Available : <http://technology.thaiza.com/มารู้จักกับจอภาพมีดือแบบ-Passive-Matrix/19662>.
- [3] กฤษณะ ช่องศรี. 2554. การเตรียมฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์:แมกนีเซียม (ZnO:Mg) ด้วยวิธีการหมุนเคลือบและเพิ่มประสิทธิภาพทางแสงด้วยการเจือไนโตรเจน (N) และ อะลูมิเนียม (Al). วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [4] A. Kalaivanan, S.Perumal, N.NeelakandaPillai, “Characteristics of GZO thin films deposited by sol-gel dip coating”, Materials Science in Semiconductor Processing, Vol. 14 (2011), pp. 94-96.
- [5] 2016. Indium. [Online]. Available : <https://en.wikipedia.org/wiki/Indium>.
- [6] กนกกร ภักพิทักษ์. 2555. การเตรียมฟิล์มทังสเตนออกไซด์เพื่อใช้เป็นชั้นอิเล็กทรอนิกส์ของโพโตอิเล็กทรอนิกส์เซลล์แบบกึ่งของแข็ง. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] เอกรัตน์ วงษ์แก้ว. 2557. การสังเคราะห์ฟิล์มโลหะออกไซด์ผสมเพื่อคุณสมบัติการกระตุ้นด้วยแสงสำหรับใช้งานกระจกไร้คราบ. ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
- [8] วรุตดี คำอ่อน. 2556. การเตรียมฟิล์มบางโปร่งใส M-doped ZnO (M=Al, Ga) โดยวิธีการโซลเจลเพื่อประยุกต์เป็นชั้นเคลือบป้องกันการสะท้อนในเซลล์สุริยะ. วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [9] ภาณุวัฒน์ ครองอารมณ์. 2556. การพัฒนาฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ที่เจือด้วยอะตอมบิสมีทโดยวิธีเคลือบผิวด้วยแรงเหวี่ยงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. สาขาวิชาวิศวกรรมเซรามิก มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
- [10] Field Emission Scanning Electron Microscope. [Online]. Available : <http://thep-center.org/src2/files/eq/fesem.pdf>
- [11] C. Tsay, K. Fan, C. Lei, “Synthesis and characterization of sol-gel derived gallium-doped zinc oxide thin films”, Journal of Alloys and Compounds, Vol. 512 (2012), pp. 216-222

- [12] C. Tsay, T. Yan, "Solution processed amorphous InGaZnO semiconductor thin films and transistors", *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, Vol. 75(2014), pp. 142–147
- [13] C. Tsay, C. Wu, C. Lei, F. Chen, "Microstructural and optical properties of Ga-doped ZnO semiconductor thin films prepared by sol–gel", *Thin Solid Films*, Vol. 519 (2010), pp. 1516–1520.
- [14] J. Sengupta, R. Sahoo, C. Mukherjee, "Effect of annealing on the structural, topographical and optical properties of sol–gel derived ZnO and AZO thin films", *Material Letter*, Vol. 83 (2012), pp. 84–87.
- [15] R.E. Marotti, , P. Giorgi, G. Machado, E.A. Dalchiele, "Crystallite size dependence of band gap energy for electrodeposited ZnO grown at different temperatures", *Solar Energy Materials & Solar Cells*, Vol. 90 (2006), pp. 2356–2361.
- [16] K. Lee, M. Wang, E. Kim, "Structural, electrical and optical properties of sol–gel AZO thin films", *Current Applied Physics*, Vol. 9 (2009), pp. 683–687.
- [17] M.S. Kim, K.G. Yim, S. Kim, G. Nam, D.-Y. Lee, Jin Soo Kim, Jong Su Kim, J.-Y. Leem, "Growth and characterization of indium-doped zinc oxide thin films prepared by sol-gel method", *Applied Physics and Materials Science*, Vol. 121 (2012) pp. 217-220

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวกมลชนก เรืองอ่อน
วัน เดือน ปีเกิด	วันที่ 27 มิถุนายน พ.ศ. 2537
ประวัติการศึกษา	สำเร็จการศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาตอนปลาย ในปีการศึกษา 2555
ผลงานทางวิชาการ	เข้าร่วมประชุมวิชาการระดับนานาชาติที่ชื่อว่า 4 th Southeast Asia Conference on Thermoelectric 2016 โดยนำเสนอโพสเตอร์ ในหัวข้อ “Influence of Baking Temperature on Relevant Properties of Sol-gel Ga-doped ZnO Thin Films Annealed at Low Temperat”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้