

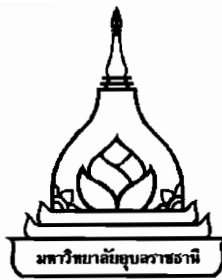
การสังเคราะห์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง Al-ZnO  
โดยวิธีไอระเหยความร้อน

จุไลพร วงศ์วัตถากรณ์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

พ.ศ. 2555

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี



**SYNTHESIS AND PHYSICAL PROPERTIES OF Al-ZnO THIN FILM  
BY THERMAL EVAPORATION**

**CHULAIPORN VONGWATTHAPORN**

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS  
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE  
MAJOR IN PHYSICS  
FACULTY OF SCIENCE  
UBON RATCHATHANI UNIVERSITY  
YEAR 2012**

**COPYRIGHT OF UBON RATCHATHANI UNIVERSITY**



ใบรับรองวิทยานิพนธ์  
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปริญญา วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต  
สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

เรื่อง การสังเคราะห์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน

ผู้วิจัย นางจุไลพร วงศ์วัตถาภรณ์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

..... อาจารย์ที่ปรึกษา  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุดม ทิพราช)

..... กรรมการ  
(รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภกร ภู่เกิด)

..... กรรมการ  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภควัฒน์ วงศ์วรรณวัฒนา)

..... คณบดี  
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ อินทรประเสริฐ)

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี รับรองแล้ว

.....  
(รองศาสตราจารย์ ดร.อุทิศ อินทร์ประสิทธิ์)

รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ  
ปฏิบัติราชการแทนอธิการบดี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี  
ปีการศึกษา 2555

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดีเพราะได้รับความช่วยเหลือจาก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุคม ทิพราช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ และการช่วยเหลือทุกด้านเป็นอย่างดี รวมถึงตรวจสอบแก้ไขวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ศุภกร ภู่เกิด กรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ และสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อุคม ทิพราช กรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ และสอบวิทยานิพนธ์ ดร. สุทธินาถ หนูทองแก้ว กรรมการสอบเค้าโครงวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภควัฒน์ วงศ์วรรณวัฒนา ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก

ขอขอบคุณ ภาควิชาฟิสิกส์และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัย อุบลราชธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจสอบวิเคราะห์และทดสอบประสิทธิภาพของ ตัวอย่างจากการทดลองในครั้งนี้ รวมถึงพี่ ๆ เพื่อน ๆ น้อง ๆ และผู้ที่มีส่วนช่วยสนับสนุน คอยเป็น กำลังใจ ให้คำปรึกษา และให้ความช่วยเหลือสำหรับการทำวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ข้าพเจ้าต้องขออภัย ที่ไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด

สุดท้ายนี้หากการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้ มีข้อบกพร่องประการใด ผู้วิจัยต้องขออภัย ไว้ ณ ที่นี้ด้วย

จุไรพร วงศ์วัตถาภรณ์  
(นางจุไรพร วงศ์วัตถาภรณ์)

ผู้วิจัย

## บทคัดย่อ

ชื่อเรื่อง : การสังเคราะห์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน  
โดย : จุฬาลพร วงศ์วัศถาภรณ์  
ชื่อปริญญา : วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา : ฟิสิกส์  
ประธานกรรมการที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุคม ทิพรราช

ศัพท์สำคัญ : ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์ ไอระเหยความร้อน ออกไซด์ตัวนำโปร่งใส

ฟิล์มบาง Al-ZnO ถูกสังเคราะห์โดยวิธีไอระเหยความร้อนซึ่งอะซีเตทและอลูมิเนียมคลอไรด์ ถูกใช้เป็นสารตั้งต้น กระบวนการสังเคราะห์ฟิล์มบางถูกทำในระบบสุญญากาศที่ประกอบไปด้วยปั๊มเพอร์ไอและโรตารีปั๊มที่ความดัน 50 มิลลิทอร์ร์ ฟิล์มถูกอบร้อนในความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นเวลา 30 นาที และได้นำไปศึกษาสมบัติบังคับด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ การวัดการทะลุผ่านของแสงและวัดความต้านทานด้วยเทคนิคสี่ขั้ว ฟิล์มมีโครงสร้างเป็นเฮกซะโกนอลและมีความต้านทานประมาณ 50 โอห์มต่อตารางพื้นที่ การยึดติดแน่นของฟิล์มอยู่ในเกณฑ์ดี และมีการส่งผ่านของแสงประมาณร้อยละ 80

## ABSTRACT

TITLE : SYNTHESIS AND PHYSICAL PROPERTIES OF Al-ZnO THIN FILM BY  
THERMAL EVAPORATION

BY : CHULAIORN VONGWATTHAPORN

DEGREE : MASTER OF SCIENCE

MAJOR : PHYSICS

CHAIR : ASST. PROF. UDOM TIPPARACH, Ph. D

KEYWORDS : ZINC OXIDE (ZnO) THIN FILMS / THERMAL EVAPORATION / TCO  
(TRANSPARENT CONDUCTING OXIDE)

Al-doped ZnO thin films were synthesized by thermal evaporation. Zinc acetate and aluminum chloride were used as precursors. The synthesis process was performed in a vacuum system equipped with a diffusion pump and rotary pump at the pressure of 50 mtorr. The films were annealed in atmospheric pressure at 450 °C for 30 min and characterized by means of X-ray diffraction, UV-visible spectrometry, and four-point probe measurement. The films show hexagonal structure and have resistance of 50 ohm/square. The adhesive of the films were good and the transmittance of the films was about 80%.

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญภาพ	ช
บทที่	
<b>1 บทนำ</b>	
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	1
1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.4 ขอบเขตการศึกษาค้นคว้า	2
1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ	2
<b>2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b>	
2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO	3
2.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)	4
2.2.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์	5
2.2.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์	6
2.2.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	6
2.2.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี	6
2.3 การนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) : AZO	8
2.4 การเคลือบฟิล์มบาง	9
2.5 ระบบการเคลือบฟิล์มบางแบบไอระเหยความร้อน การก่อเกิดฟิล์มบาง	12

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.6 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม	15
2.6.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า	15
2.6.2 วัดความต้านทานไฟฟ้าโดยเทคนิคโพร์พอยท์โพรบ	16
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
<b>3 วิธีดำเนินการวิจัย</b>	
3.1 บทนำ	18
3.2 กระบวนการผลิตฟิล์ม	19
3.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นแก้วกระจก	19
3.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO	20
3.3 การศึกษาโครงสร้างของฟิล์ม	22
3.4 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม	23
3.5 การวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม	24
<b>4 ผลการศึกษา</b>	
4.1 โครงสร้างทางคุณสมบัติของฟิล์มบาง Al-ZnO	25
4.2 การวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านของแสง	28
4.3 การวิเคราะห์ผลสภาพต้านทานไฟฟ้า	29
<b>5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ</b>	
5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา	31
5.2 ข้อเสนอแนะ	31
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	<b>32</b>
<b>ภาคผนวก</b>	<b>35</b>
<b>ประวัติผู้วิจัย</b>	<b>37</b>



## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง Al-ZnO	29

## สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
2.1	โครงสร้างแบบเวทซ์ไชท์ของ ZnO	3
2.2	ช่องว่างแถบพลังงานของสารที่เป็นไดอิเล็กทริกกึ่งตัวนำและโลหะ	4
2.3	คู่อิเล็กตรอนและโฮลในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน	5
2.4	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)	6
2.5	ตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน	7
2.6	แถบพลังงานสารกึ่งนำชนิดเอ็น	7
2.7	แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี	8
2.8	การทำพันธะของ (ก) ZnO (ข) AZO	9
2.9	แถบพลังงานของ (ก) ZnO (ข) AZO	9
2.10	ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ	10
2.11	ระบบไอระเหยความร้อน (Thermal Evaporation)	11
2.12	ขั้นตอนการเกิดฟิล์ม	13
2.13	การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอมและ หลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม	14
2.14	รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม	14
2.15	การวัดสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง A	15
2.16	ระบบการวัดของเครื่องโพร์พอยท์โพรบ	16
3.1	ขั้นตอนการศึกษางานวิจัย	18
3.2	การทำความสะอาดแก้วกระจกชิ้นงาน	19
3.3	ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน	20
3.4	ฟิล์มบาง Al-ZnO	21
3.5	การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบอะตอม	22
3.6	ระบบการวัดของเครื่องโพร์พอยท์โพรบ	23
3.7	เชื่อมคอนแทกกับชิ้นงาน	24
3.8	การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	24

## สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
4.1	รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง Al-ZnO ที่อุณหภูมิ 350 °C	25
4.2	รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง Al-ZnO ที่อุณหภูมิ 400 °C	26
4.3	รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง Al-ZnO ที่อุณหภูมิ 500 °C	27
4.4	การส่งผ่านแสงหลังจากอบร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ	28
4.5	แถบพลังงานของฟิล์มบาง Al-ZnO โด๊ปที่ 4% wt. อบร้อนที่อุณหภูมิ 500 °C	29
4.6	ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อน ที่อุณหภูมิต่างๆ	30

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การพัฒนาเทคโนโลยีด้านตัวนำโปร่งใส (transparent conducting) มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากตัวนำโปร่งใสสามารถประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์ต่างๆ อาทิเช่น photovoltaic cells, จอผลึกเหลว (liquid crystal displays), ตัวรับรู้ทางแสง (photo detectors) เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของวัสดุที่นำมาใช้ในการผลิตออกไซด์ตัวนำโปร่งใส นั้นควรมีสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำและการส่งผ่านแสงสูงและสอดคล้องกับสิ่งประดิษฐ์ที่ต้องการประยุกต์ใช้ [1]

โดยทั่วไปฟิล์มบางออกไซด์ตัวนำโปร่งใส (Transparent Conductive Oxide : TCO) ที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีอยู่ด้วยกัน 3 ชนิดคือ อินเดียมทินออกไซด์ (Indium Tin Oxide, ITO) ทินออกไซด์ (Tin Oxide, SnO<sub>2</sub>) และซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide, ZnO) ซึ่ง ZnO มีข้อได้เปรียบกว่า ITO และ SnO<sub>2</sub> โดยสามารถใช้เป็น TCO ที่มีราคาถูกที่สุด เพราะมีวัตถุดิบที่หาได้ง่าย สามารถเตรียมได้ที่อุณหภูมิต่ำประมาณ 100 °C - 150 °C และทนทานต่อสิ่งแวดล้อมที่มีไฮโดรเจนพลาสมา (Hydrogen plasma) ซึ่งมักจะใช้ในการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิกอน แม้สภาพต้านทานไฟฟ้า (Resistivity) ของ ZnO อยู่ในช่วง  $6 \times 10^{-3} - 5 \times 10^{-4} \Omega\text{cm}$  อาจดีน้อยกว่า ITO อยู่ก็ตาม แต่สภาพต้านทานของ ZnO มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตลอดระยะเวลา 1 ปี ในอุณหภูมิห้อง ดังนั้น ZnO จึงเหมาะที่จะนำมาใช้แทน ITO และ SnO<sub>2</sub>

นอกจากสมบัติดังกล่าวข้างต้น TCO ที่ดีควรกักเก็บแสงได้ดี การเตรียมฟิล์มทำได้หลายวิธี เช่น สเป็คเตอรริง [2], สเปรย์ไพโรไลซิส [3], ไอระเหยความร้อน [4-6] เป็นต้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเสนอการสังเคราะห์และสมบัติเชิงฟิสิกส์ของฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน

#### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1.2.1 เพื่อสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO ด้วยวิธีไอระเหยความร้อน
- 1.2.2 เพื่อศึกษาสมบัติการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง Al-ZnO
- 1.2.3 เพื่อศึกษาสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง Al-ZnO

### 1.3 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จะทำให้เข้าใจเทคนิคกระบวนการผลิตฟิล์มบาง Al-ZnO ด้วยวิธีไอระเหยความร้อน และได้ฟิล์มบาง Al-ZnO ที่โปร่งใสและนำไฟฟ้าได้

### 1.4 ขอบเขตการศึกษาค้นคว้า

- 1.4.1 เตรียมฟิล์มบาง Al-ZnO ด้วยวิธีไอระเหยความร้อนลงบนฐานรองกระจก
- 1.4.2 วัดการทะลุผ่านของแสงของฟิล์มบาง Al-ZnO
- 1.4.3 วัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง Al-ZnO
- 1.4.4 ประมวลผลและแสดงความสัมพันธ์ต่างๆที่วัดได้ในรูปของตารางและกราฟ
- 1.4.5 วิเคราะห์และสรุปผล

### 1.5 นิยามศัพท์เฉพาะ

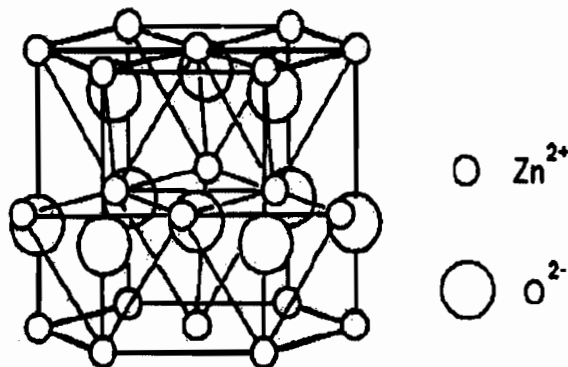
- 1.5.1 Al-ZnO หมายถึง ฟิล์มบางซิงค์ออกไซด์(ZnO) เจือด้วยอลูมิเนียม (Al)
- 1.5.2 Thermal Evaporation หมายถึง การเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีไอระเหยความร้อน
- 1.5.3 TCO หมายถึง ตัวนำไฟฟ้าโปร่งแสงออกไซด์
- 1.5.4 eV หมายถึง พลังงานที่ใช้งานในการทำให้อิเล็กตรอนหนึ่งตัววิ่งผ่านสนามศักย์ไฟฟ้า 1 โวลต์

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับสมบัติและโครงสร้างของ ZnO

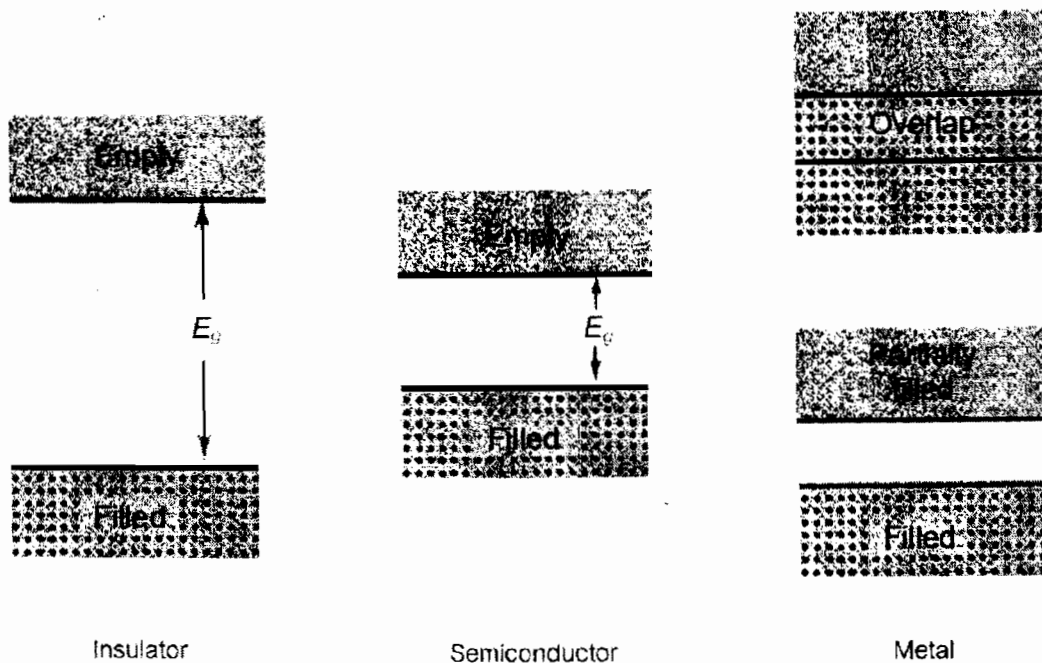
ซิงค์ออกไซด์ (Zinc Oxide : ZnO) : เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีช่องว่างแถบพลังงานประมาณ 3.37 eV โครงสร้างผลึกของ ZnO เป็นแบบเฮกซะโกนอลโคลสแพค (Hexagonal closed pack : hcp) ภายในโครงสร้างมีออกซิเจนไอออน (Oxygen ions :  $O^{2-}$ ) แทรกอยู่ตรงตำแหน่งกึ่งกลางระหว่างซิงค์ไอออน (Zinc ions :  $Zn^{2+}$ ) ซึ่งทำพันธะกันแบบเตตระฮีดรอล (Tetrahedral) เรียกว่าเวทซ์ไซท์ (Wurtzite structure) [7] ดังภาพที่ 2.1 ZnO มีค่าคงที่ผลึก (Lattice constants)  $a = 3.24 \text{ \AA}$  และ  $c = 5.19 \text{ \AA}$  [8]



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างแบบเวทซ์ไซท์ของ ZnO

## 2.2 สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor)

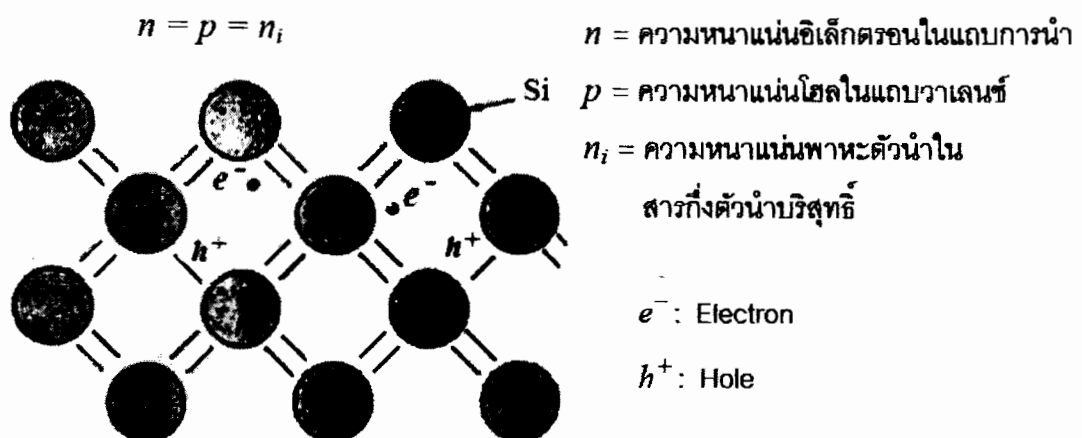
สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่มีสภาพนำไฟฟ้าสูงกว่าไดอิเล็กทริก แต่ต่ำกว่าตัวนำ ลักษณะแถบพลังงานกว้าง (Energy band) โดยทั่วไปจะประกอบด้วยแถบวาเลนซ์ (Valence band) และแถบการนำไฟฟ้า (Conduction band) มีช่องว่างพลังงาน (Energy gap :  $E_g$ ) ซึ่งมีความกว้างไม่เกิน 4 eV กั้นระหว่างแถบทั้งสองนี้ ดังภาพที่ 2.2 เมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ได้รับพลังงานมากพอที่จะสามารถข้ามช่องว่างพลังงานไปยังแถบการนำและทำให้เกิดการนำกระแสได้ ซึ่งสารกึ่งตัวนำแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor) และสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)



ภาพที่ 2.2 ช่องว่างแถบพลังงานของสารที่เป็นไดอิเล็กทริก กึ่งตัวนำและโลหะ [9]

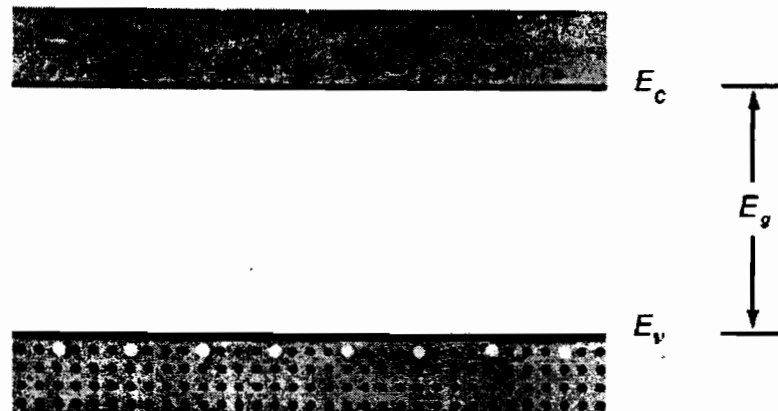
### 2.2.1 สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะโควาเลนต์ เช่น ซิลิกอน หรือเจอร์มาเนียม ซึ่งอยู่ในธาตุหมู่ 4A ดังภาพที่ 2.3 การนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้อธิบายได้โดยพิจารณาแถบพลังงาน ดังภาพที่ 2.4 ที่ 0 K สารกึ่งตัวนำมีแถบวาเลนซ์ที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็ม แต่แถบการนำจะว่างเปล่าไม่มีพาหะประจุอยู่เลย แต่ถ้าทำให้อุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ผลึกเกิดการสั่นสะเทือนและทำให้อิเล็กตรอนเกิดการเคลื่อนที่หลุดออกจากพันธะโควาเลนต์กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและสามารถเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ เนื่องจากช่องว่างพลังงานในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มีความกว้างไม่มากนัก ไม่จำเป็นต้องให้พลังงานสูงแก่อิเล็กตรอน อิเล็กตรอนก็สามารถเคลื่อนที่ไปยังแถบการนำได้ การเคลื่อนที่ของวาเลนซ์อิเล็กตรอนแต่ละตัวจะทำให้เกิดโฮล (Hole) เกิดขึ้น ตัวอย่างเช่น ซิลิกอนที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว เมื่อให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้น พลังงานความร้อนที่ระดับอุณหภูมิห้องก็เพียงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ การที่อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำจะทำให้เกิดโฮล ในแถบวาเลนซ์ ซึ่งโฮลที่เกิดขึ้นมีประจุเป็นบวกและเกิดอิเล็กตรอนในแถบการนำซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบโดยเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน – โฮล (Electron – hole pair) ดังภาพที่ 2.3 ดังนั้นสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จึงมีพาหะนำไฟฟ้า 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนและโฮล



ภาพที่ 2.3 คู่อิเล็กตรอนและโฮลในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน





ภาพที่ 2.4 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic semiconductor)

### 2.2.2 สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ (Extrinsic semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์สามารถแสดงคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้โดยการเติมสารเจือลงในอะตอมตัวทำละลาย ทำให้เกิดการละลายของแข็งแบบแทนที่หรือการแทรก สารเจือที่เติมลงไปช่วยให้อิเล็กตรอน หรือ โฮลเกิดขึ้นมาในแลตทิซ ก่อให้เกิดการนำไฟฟ้าได้โดยสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ ชนิดเอ็น (n) และชนิดพี (p)

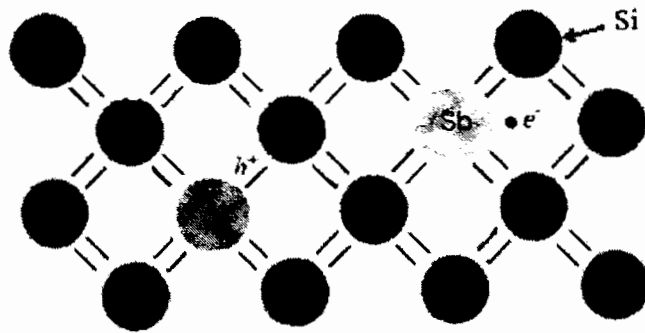
#### 2.2.2.1 สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดเอ็น (n-type semiconductor) คือ สารกึ่งตัวนำที่มีพาหะ ประจุลบมากกว่าพาหะประจุบวก เพราะมีอิเล็กตรอนเพิ่มมาจากสารเจือ ตัวอย่างเช่น พลวง (Sb) ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 5 ตัวถูกเติมลงไปในซิลิกอน (Si) ที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ดังภาพที่ 2.5 อิเล็กตรอนจากสองอะตอมจับคู่กันด้วยพันธะโควาเลนต์ 4 พันธะ และจะเหลือวาเลนซ์อิเล็กตรอนของพลวง 1 ตัวดึงดูดกับนิวเคลียสของพลวงอย่างหลวม ๆ ด้วยพลังงานพันธะเพียง 0.044 eV อิเล็กตรอนของพลวงต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นอีกเพียง 0.044 eV ก็จะกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระและสามารถนำกระแสได้ เรียกสารที่เจือพลวงว่า ตัวให้ (donor) โดยมีระดับพลังงานอยู่ใต้แถบการนำเรียกว่าระดับตัวให้ (Donor level :  $E_d$ ) ดังภาพที่ 2.6

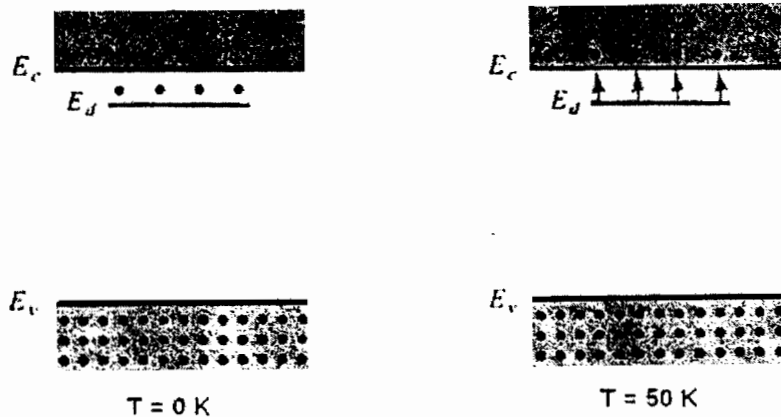
#### 2.2.2.2 สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor)

สารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ชนิดพี (p-type semiconductor) เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการเติมสารเอเพื่อให้มีพาหะประจุบวกมากกว่าพาหะประจุลบ ตัวอย่างเช่นการเติมธาตุหมู่ 3A อันได้แก่ อลูมิเนียม (Al) อินเดียม (In) ลงในซิลิกอน เมื่ออะตอมซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัวของสารเจือมี

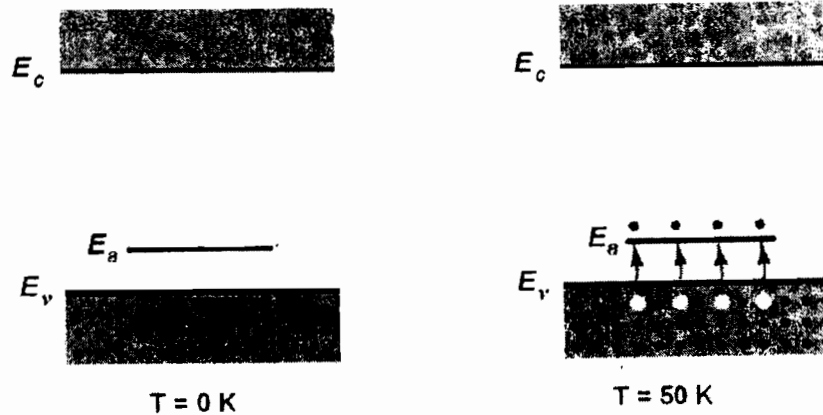
พันธะโควาเลนต์กับอะตอมที่มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 4 ตัว ทำให้เกิดโฮล 1 โฮลขึ้นในโครงสร้าง และพร้อมที่จะรับอิเล็กตรอน จึงเรียกสารเจือเหล่านี้ว่าตัวรับ (Acceptor) ดังภาพที่ 2.5 โดยมีระดับพลังงานเหนือแถบวาเลนซ์อิเล็กตรอนเล็กน้อยเรียกว่าระดับตัวรับ (Acceptor level :  $E_d$ ) ดังภาพที่ 2.6 อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับตัวรับนี้ได้ง่ายกว่าเข้าไปอยู่ในแถบการนำ เนื่องจากใช้พลังงานน้อยกว่า เมื่ออิเล็กตรอนออกไปจากแถบวาเลนซ์แล้วจะทำให้เกิดโฮลที่มีสภาพเคลื่อนที่ได้ซึ่งทำให้มีการนำไฟฟ้าเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้



ภาพที่ 2.5 ตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอนในพันธะโควาเลนต์ของผลึกซิลิกอน



ภาพที่ 2.6 แถบพลังงานสารกึ่งนำชนิดเอ็น

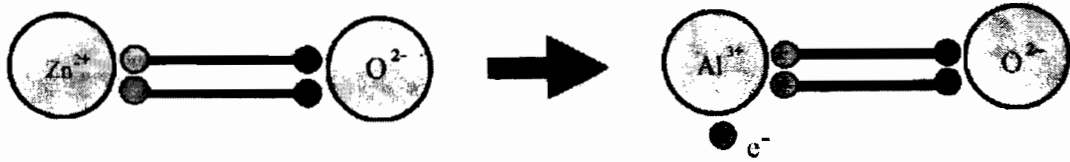


ภาพที่ 2.7 แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำชนิดพี

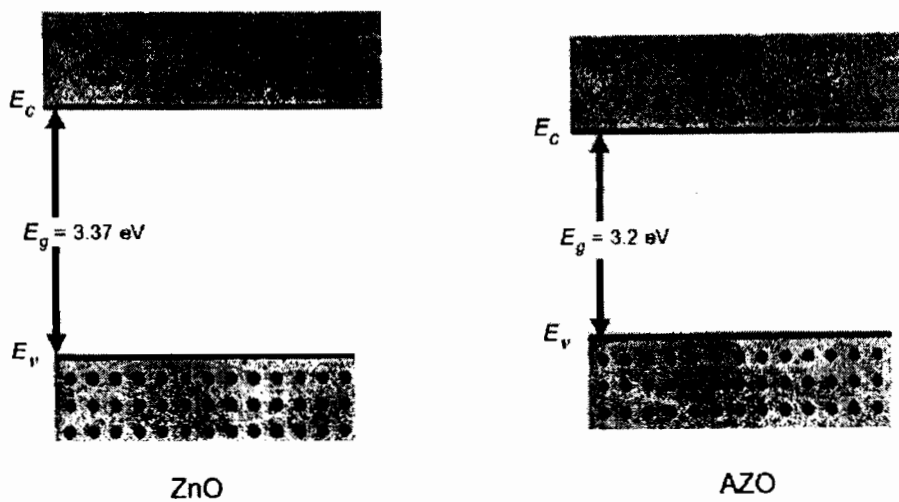
### 2.3 การนำไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เจือด้วยอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : AZO

คุณสมบัติทางไฟฟ้าของ ZnO ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของสารเจือในปริมาณน้อย ๆ และเงื่อนไขของอุณหภูมิผลึก เมื่อให้อุณหภูมิสูงขึ้น ZnO จะสูญเสียออกซิเจน (O) ไปทำให้อิเล็กตรอนของซิงค์ 2 อิเล็กตรอนไม่มีพันธะกับ O และเกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระ ซึ่งเป็นการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนอิสระให้มากขึ้น โมเดลก่อนหน้านี้เชื่อว่าผลของการที่ผลึกมีโครงสร้างไม่สมบูรณ์อันเนื่องมาจากอะตอมของ Zn แทรกอยู่ในโครงสร้าง ทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระ แต่ปัจจุบันเป็นที่ยอมรับว่าการนำไฟฟ้าของ ZnO เกิดจากการสูญเสีย O และที่อุณหภูมิห้องก็พอเพียงที่จะทำให้เกิดช่องว่าง O อิเล็กตรอนอิสระเหล่านี้เมื่อให้พลังงานกระตุ้นเพียงเล็กน้อยก็สามารถกระโดดขึ้นไปบนแถบการนำไฟฟ้าและสามารถนำไฟฟ้าได้

ในโครงสร้างของ ZnO อะตอมของ Zn และ O ทำพันธะกัน ดังภาพที่ 2.8 (ก) เมื่อเจือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ลงไปในโครงสร้างของ ZnO แล้วอลูมิเนียมอะตอม ( $\text{Al}^{3+}$ ) ซึ่งมีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว และมีขนาดเล็กกว่า จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ Zn และทำพันธะกับ O ในโครงสร้าง แต่เนื่องจาก Al มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 3 ตัว และ O มีวาเลนซ์อิเล็กตรอน 2 ตัว เมื่อทำพันธะกันแล้วจะมีอิเล็กตรอนของ Al เหลือ 1 ตัว ที่ไม่ได้ทำพันธะกับอะตอมของ O แต่จะเกาะอยู่กับนิวเคลียสของ Al อย่างหลวม ๆ ดังภาพที่ 2.8 (ข) เมื่อให้พลังงานกระตุ้นเข้าไปในปริมาณเล็กน้อยก็จะทำให้อิเล็กตรอนนี้กลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (Free electron) และสามารถนำไฟฟ้าได้ การนำไฟฟ้าของ Al เจือ ZnO อธิบายได้โดยพิจารณาช่องว่าง แถบพลังงานดังภาพที่ 2.9 ZnO มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง 3.37 eV เมื่อเจือ  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ลงไปใน ZnO ช่องว่างแถบพลังงานที่แคบลงจากการเติมสารเจือ ทำให้อิเล็กตรอนอิสระสามารถกระโดดขึ้นไปบนแถบการนำได้ง่ายขึ้น



ภาพที่ 2.8 การทำพันธะของ (ก) ZnO (ข) AZO [11]



ภาพที่ 2.9 แถบพลังงานของ (ก) ZnO (ข) AZO

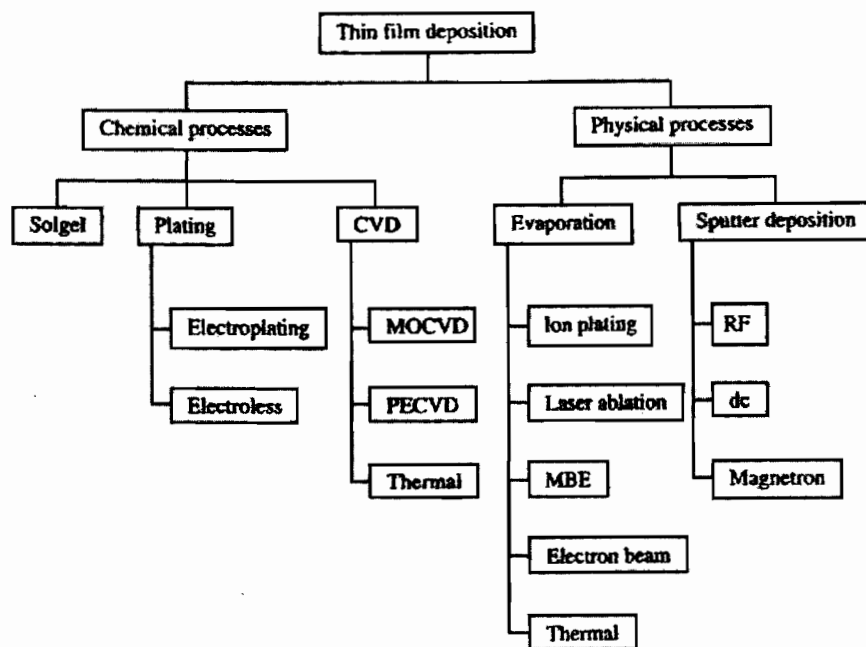
## 2.4 การเคลือบฟิล์มบาง

วิธีการเตรียมฟิล์มบางมีหลายแบบ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเทคโนโลยี ปริมาณและคุณภาพของฟิล์มบาง สำหรับเทคโนโลยีในการเตรียมฟิล์มบางนั้นแบ่งได้ 2 วิธี ดังภาพที่ 2.10 คือ

2.4.1 วิธีทางเคมี (Chemical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบน แผ่นรองรับ ซึ่งรวมถึงการพ่นสเปรย์ไพโรไลซิส (spray pyrolysis) กระบวนการเคลือบไอเคมี (Chemical vapor deposition) และวิธีโซลเจล (Sol-gel)

2.4.2 วิธีทางกายภาพ (Physical process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของแผ่นรองรับ โดยการ

ใช้ความร้อน (Thermal) และระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron beam evaporation) รวมถึงวิธีการใช้แสงเลเซอร์ (Laser ablation) วิธีการสปัตเตอริง (Sputtering)

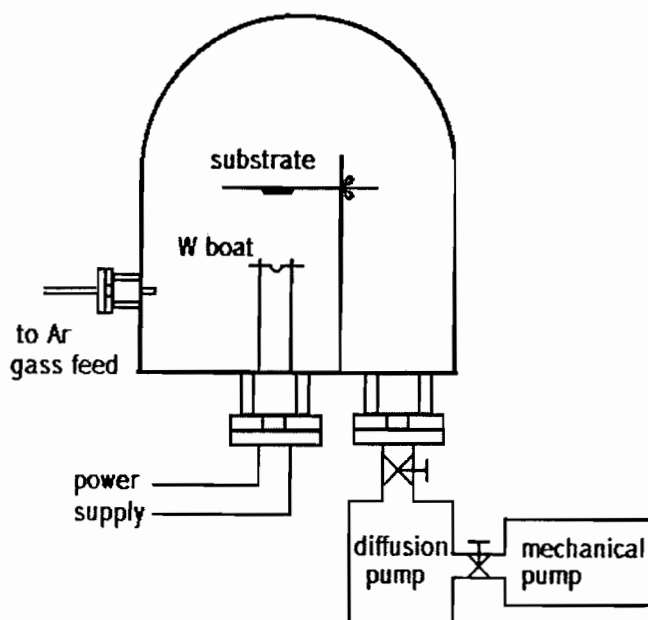


ภาพที่ 2.10 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ [12]

## 2.5 กระบวนการเคลือบฟิล์มบางไอระเหย(Evaporation)

การทำฟิล์มบางโดยวิธีไอระเหยทำได้หลายวิธี เช่น Thermal Evaporation โดยใช้ความร้อนจากหลอดความร้อน หรือเป่าหลอดความร้อน (นิยมทั้งสะเตน เรียกว่า W boat) จากกระแสไฟฟ้า หรือใช้เลเซอร์กำลังสูงเข้าไปโดยผ่านทางหน้าต่างที่เป็น quartz โดยทั่วไประบบถูกเซตอัปเดตภาพที่

2.11



ภาพที่ 2.11 ระบบไอระเหยความร้อน (Thermal Evaporation)

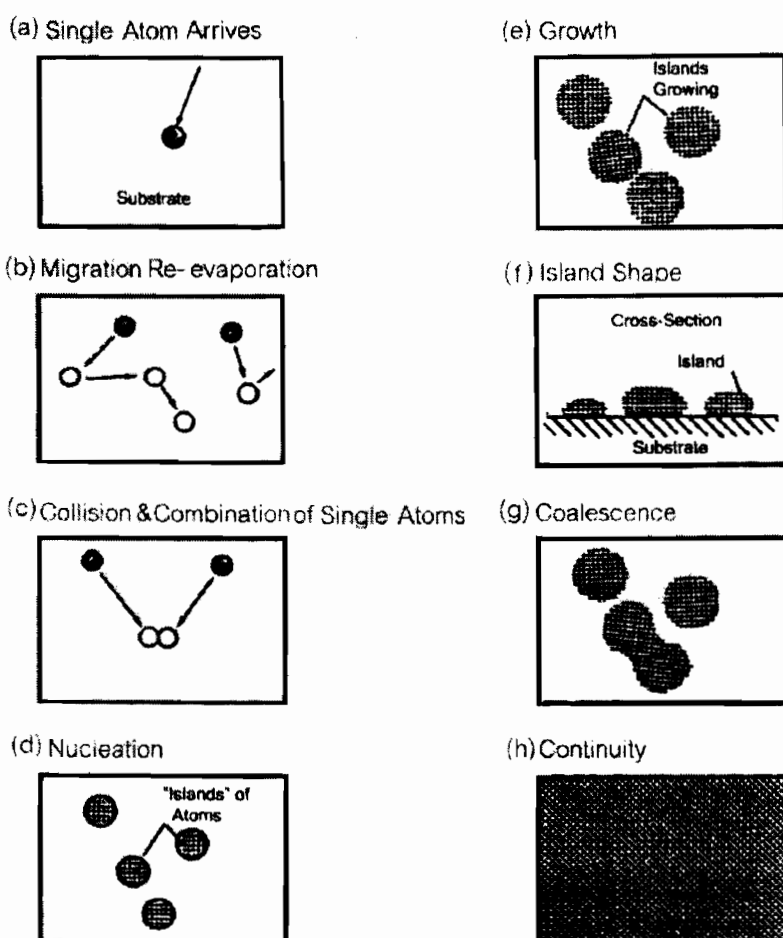
หลักการทำงานของ Thermal Evaporation ใช้หลักของขดลวดความร้อน หรือใช้เป่าหลอดความร้อนที่ความดันต่ำๆ จุดเดือดและจุดหลอมเหลวของโลหะจะต่ำ เมื่อได้รับความร้อนแล้ว จะระเหยกลายเป็นไอไปเกาะบนฐานรอง ทำให้ได้ฟิล์มบาง ความต้องการในทางปฏิบัติ เรานิยมนำก๊าซอาร์กอน (Ar) เข้าไปในระบบ เพื่อให้ได้ฟิล์มที่กระจายสม่ำเสมอบนฐานรอง เนื่องจาก Ar ทำให้ mean free path ของก๊าซและอะตอมภายในสั้น ทำให้อะตอมชนกันและพุ่งกระจายก่อน deposit เป็นฟิล์มบนฐานรอง ในบางกรณีเราอาจใช้วิธี reactive evaporation เช่น เติม reactive gas เข้าไป เช่น  $O_2$  หรือ  $N_2$  เช่น  $TiO_2$  ฟิล์มเราจำเป็นต้องใช้  $O_2$  เป็น reactive gas [13]

## 2.6 การก่อเกิดฟิล์มบาง

การเคลือบในสูญญากาศ สารเคลือบที่ตกกระทบผิวแผ่นรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล ดังภาพที่ 2.12(a) โดยพลังงานพันธะ (Bonding energy) ระหว่างอะตอม สารเคลือบกับแผ่นรองรับ และอุณหภูมิของแผ่นรองรับ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ของสารเคลือบบนผิวแผ่นรองรับ อะตอมสารเคลือบตกกระทบผิววัสดุในตำแหน่งที่เรียกว่า ตำแหน่งการดูดซับ (Absorption site) และเกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจฝ่าเข้าไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป ภาพที่ 2.12(b) อะตอมสารเคลือบอาจถูกชนจากอะตอมที่เข้ามาใหม่หรืออาจเกิดการระเหกลับและรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ เมื่ออะตอมรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ ดังภาพที่ 2.12(c) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว ทั้งนี้การรวมตัวกันของอะตอมจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราการเคลือบ (Deposition rate) อะตอมคู่ที่เกิดขึ้นอาจมีการรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวเกิดเป็นสามอะตอม (Triplets) สี่อะตอม (Quadruplets) อื่น ๆ การรวมตัวกันในลักษณะนี้เรียกว่า การเกิดนิวเคลียส ดังในภาพที่ 2.12(d) ซึ่งจะทำให้เกิดกลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-stable islands) จากนั้น กลุ่มอะตอมจะเริ่มเติบโตขึ้นจนกลายเป็นกลุ่มก้อนซึ่งเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Islands growth) ดังภาพที่ 2.12(e) และ ภาพที่ 2.12(f) กลุ่มอะตอมจะโตขึ้นเรื่อยๆจนเกิดการแตะและชนกับกลุ่มข้าง ๆ จะเกิดการรวมกันเป็นกลุ่มก้อนของกลุ่มอะตอมซึ่งเรียกว่า การรวมกันของกลุ่มอะตอม (Coalescence) ดังภาพที่ 2.12(g) ขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกัน พบว่าอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายกับของเหลว (Liquid like behavior) ในระหว่างการรวมกันของกลุ่มอะตอมจะมีการจัดเรียงตัวในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic orientation) การรวมกลุ่มของอะตอม จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (น้อยกว่า 0.1 วินาที) หลังจากการรวมกันของกลุ่มอะตอมพบว่าพื้นที่ของอะตอมที่รวมกลุ่มกันบนแผ่นรองรับ (Projected area) มีขนาดน้อยลง ดังภาพที่ 2.13 แต่ความสูงของกลุ่มอะตอม มีค่ามากขึ้นดังภาพที่ 2.14

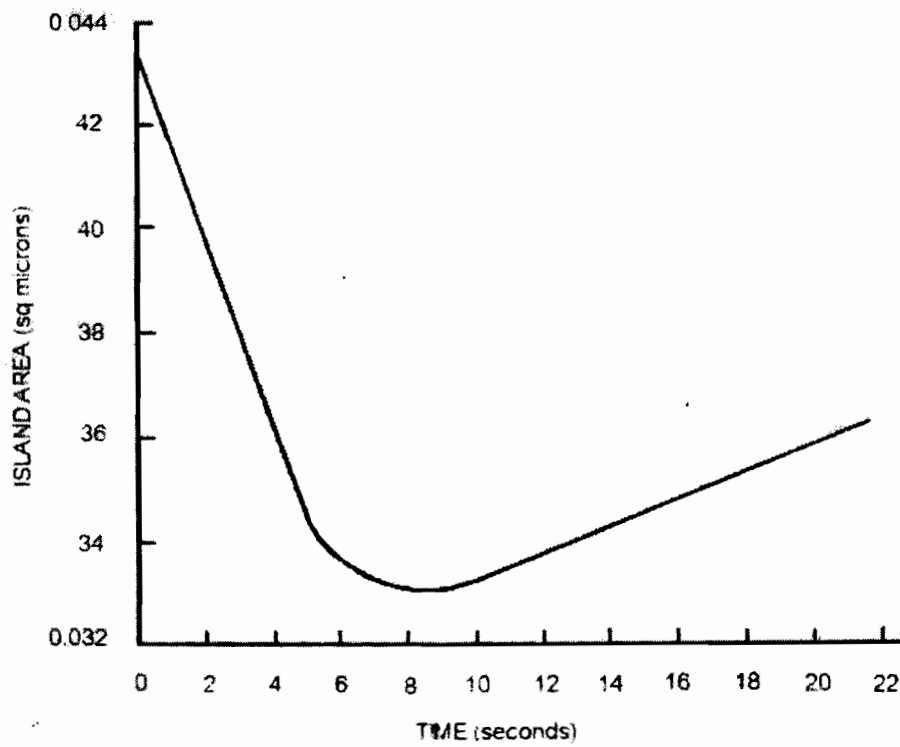
การรวมกันของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งฟิล์มเกิดการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องดังภาพที่ 2.12(h) ในบางกรณีการเชื่อมต่อของฟิล์มจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ 400-500 nm ลักษณะผิวของฟิล์มโดยทั่วไปในขณะเกิดการรวมกลุ่มของอะตอมจะมีลักษณะเป็นหุบเขาและเนินเขา การเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าแต่ละกลุ่มอาจจะเป็นผลึกเดี่ยวหรือมีจำนวนผลึกประกอบกันเพียง 2-3 ผลึก โดยถ้าเคลือบลงบนแผ่นรองรับที่เป็นหลายผลึกทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมจะเป็นแบบสุ่ม จะทำให้ได้ฟิล์มที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้าเคลือบลงบนแผ่นรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัว

ของฟิล์มจะเป็นไปตามโครงสร้างของแผ่นรองรับทำให้ได้ฟิล์มที่มีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยวเรียกกระบวนการนี้ว่า เอพิแทกซ์ (Epitaxy) ในขณะที่เคลือบฟิล์มอะตอมจะมีการเคลื่อนที่เพื่อเลือกไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่า โดยความสามารถในการเคลื่อนที่จะมีมากขึ้นถ้าอุณหภูมิที่ผิวแผ่นรองรับมีค่าสูงและพบว่าเมื่ออัตราการเคลือบลดลงช่วยทำให้การโตของผลึกเกิดได้ดีขึ้น อุณหภูมิของผิวแผ่นรองรับที่สูงและอัตราการเคลือบต่ำจะทำให้ฟิล์มเคลือบมีขนาดเกรนใหญ่มีความบกพร่อง (defect) ในเกรนน้อย

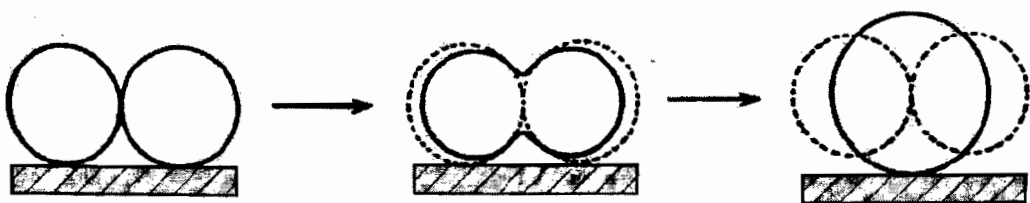


ภาพที่ 2.12 ขั้นตอนการเกิดฟิล์ม





ภาพที่ 2.13 การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่ขณะมีการรวมกันของกลุ่มอะตอมและหลังการรวมกันของกลุ่มอะตอม



ภาพที่ 2.14 รูปแบบขณะเกิดการรวมกันของกลุ่มอะตอม

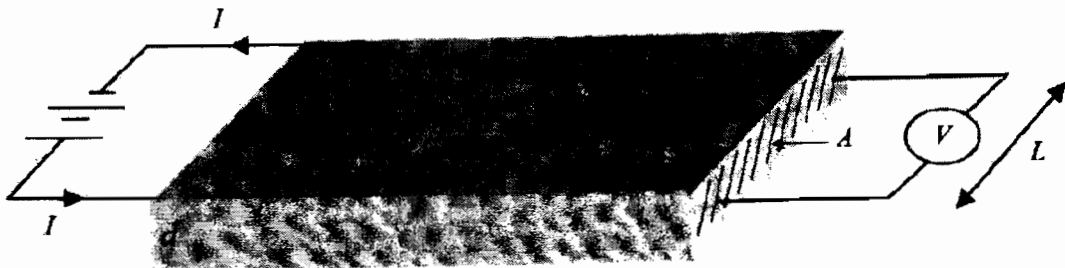
## 2.7 ทฤษฎีเบื้องต้นในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

ฟิล์มที่เตรียมได้จากการทดลองจะนำมาวัดสมบัติต่าง ๆ ดังนี้

### 2.7.1 สภาพต้านทานไฟฟ้า[14]

กระแสไฟฟ้าไหลในตัวนำที่เป็นของแข็งที่มีความต่างของศักย์ไฟฟ้า โดยปกติความหนาแน่น กระแส  $J$  เป็นสัดส่วนกับสนามไฟฟ้า  $E$  ;

$$J = \frac{E}{\rho} = \sigma E \tag{2.1}$$



ภาพที่ 2.15 การวัดสภาพการนำไฟฟ้าของตัวอย่างที่มีพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$

เมื่อ  $\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า และ  $\sigma$  คือ สภาพนำไฟฟ้า สมการ (2.1) เป็นสมการที่แสดงกฎของโอห์ม ในภาพที่ 2.15 แสดงการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า โดยที่มีกระแส  $I$  ผ่านแท่งตัวนำที่มีภาคตัดขวางคงที่  $A$  และความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้า ( $V_2 - V_1$ ) ซึ่งถูกวัดระหว่าง 2 จุด ความหนาแน่นกระแส  $J$  ในแท่งตัวนำเท่ากับ  $I/A$  และสนามไฟฟ้าเป็น  $\frac{V_2 - V_1}{L}$  และ

$$J = \frac{I}{A} = \frac{\sigma V_2 - V_1}{L} \tag{2.2}$$

กฎของโอห์มโดยทั่วไปเขียนสมการนำไฟฟ้าได้เป็น

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{(I/A)}{(V_2 - V_1)/L} \tag{2.3}$$

เมื่อ  $(V_2 - V_1) = IR$  เขียนสมการ (2.3) ได้เป็น

$$\sigma = \frac{(I/A)}{IR/L} \tag{2.4}$$

$$\sigma = \frac{L}{RA} \quad (2.5)$$

สมการความต้านทานไฟฟ้าของแท่งตัวนำยาว  $L$  ในภาพที่ 2.15 คือ

$$R = \frac{L}{\sigma A} = \frac{\rho L}{A} \quad (2.6)$$

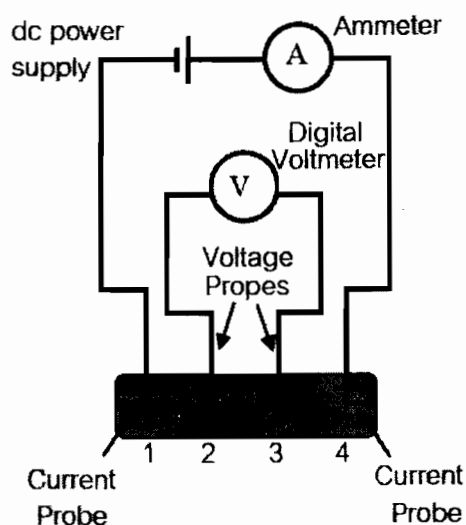
เมื่อพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  มีค่าเท่ากับ  $wd$  และ  $\rho = 1/\sigma$  จากสมการ (2.6) จึงเขียนสมการใหม่ได้เป็น

$$R = \frac{\rho L}{wd} = \frac{L}{wd} \frac{1}{\sigma} \quad (2.7)$$

เมื่อ  $R$  คือความต้านทานไฟฟ้า,  $L$  คือความยาว,  $w$  คือความกว้าง และ  $d$  คือความหนา

ความต้านทานไฟฟ้าขึ้นอยู่กับรูปร่างของวัสดุและสภาพต้านทานไฟฟ้าของวัสดุชนิดเดียวกันจะมีค่าเท่ากัน ความต้านทานไฟฟ้ามีหน่วยเป็น โอห์ม ( $\Omega$ ) สภาพต้านทานไฟฟ้า มีหน่วยเป็น โอห์มเซนติเมตร ( $\Omega\text{cm}$ ) และสภาพนำไฟฟ้ามีหน่วยเป็นต่อโอห์มเซนติเมตร ( $1/\Omega\text{cm}$ )

### 2.7.2 วัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe)



ภาพที่ 2.16 ระบบการวัดของเครื่องโฟร์พอยท์โพรบ

การวัดสภาพความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพร์พอยท์โพรบ โดยการป้อนไฟฟ้า กระแสตรงเข้าโพรบ 1 และ 1 กำหนดกระแสคงที่ที่  $1 \mu A$  แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโพรบ 2 และ 3 ด้วยมิเตอร์ระบบคิวิตอล ดังภาพที่ 2.16 แล้วระบบก็จะคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้า ออกมาให้อัตโนมัติ นำค่าความต้านทานที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้สมการ (2.7)

## 2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี พ.ศ. 2538 จินและคณะ [15] ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบาง ZnO:Al โดยวิธีไอระเหย บนฐานรองแก้ว แล้วทำการศึกษสมบัติทางโครงสร้าง, สมบัติทางแสง และสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าฟิล์มบางมีการส่งผ่านแสงได้ดี และมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงถึง  $2.3 \times 10^2 \Omega \text{cm}$

อีก 3 ปีถัดมา จินและคณะ [16] ได้พัฒนาฟิล์มบางจากเงื่อนไขการเพิ่มความเข้มข้นเดิม มาศึกษาผลของอุณหภูมิการอบร้อน พบว่าเมื่ออบร้อนที่อุณหภูมิห้อง ฟิล์มบางมีค่าความต้านทานไฟฟ้ามากกว่า  $10^2 \Omega \text{cm}$  และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการอบร้อนไปที่ 670 K ที่อุณหภูมิห้อง ค่าความต้านทานไฟฟ้าเพิ่มเป็น  $9 \times 10^4 \Omega \text{cm}$  ในทางตรงกันข้าม, อุณหภูมิการอบร้อนไปที่ 670 K ที่สุญญากาศเป็นเวลา 20 นาที ค่าค่าความต้านทานไฟฟ้าลดลงจาก  $3 \times 10^4 \Omega \text{cm}$  เป็น  $2 \times 10^{-1} \Omega \text{cm}$  แสดงว่า ค่าความต้านทานไฟฟ้าจะลดลงเมื่อนำฟิล์มบางไปอบร้อนในสุญญากาศ

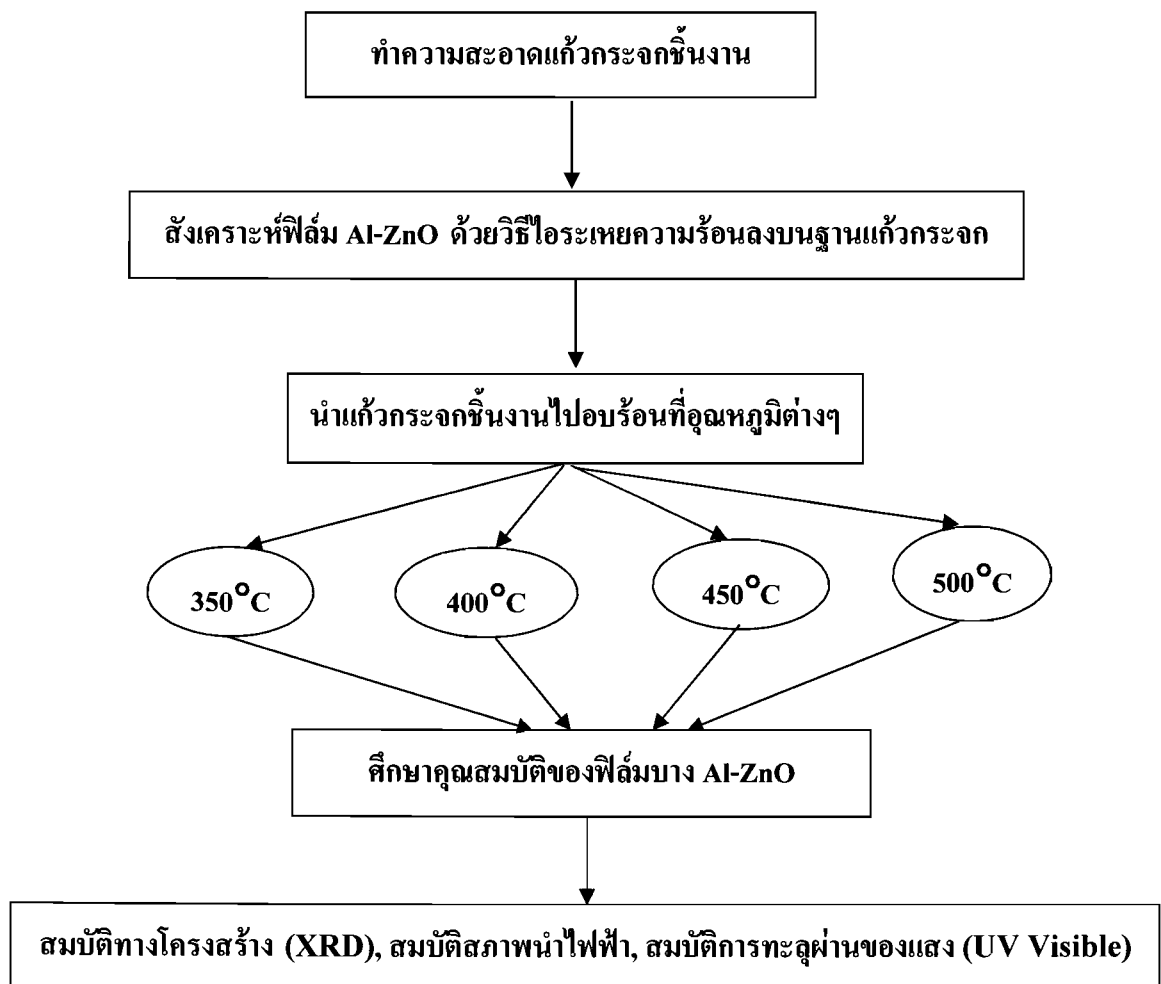
จากนั้น Zhiyun Zhang และคณะ [17] ได้ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่เคลือบฟิล์มบาง Al:ZnO บนฐานรองแก้วที่เตรียมโดยวิธีเมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง ว่าได้ผลแตกต่างกันหรือไม่ พบว่า ได้ค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่  $3.6 \times 10^{-4} \Omega \text{cm}$  และมีค่าเฉลี่ยการส่งผ่านแสงมากกว่า 85%

E. Fortunato และคณะ [18] ยังพบว่าฟิล์มบาง ZnO มีค่าแถบพลังงานที่แคบลงเมื่อเจือด้วย Al ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นตัวนำโปร่งใสออกไซด์ได้ดีในโซล่าเซลล์ ก๊าซเซ็นเซอร์หรือทรานซิสเตอร์แบบต่างๆได้

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 บทนำ

ในบทบทนี้ผู้วิจัยจะอธิบายขั้นตอนการศึกษาวิจัยทั้งหมดซึ่งประกอบด้วย การสังเคราะห์ฟิล์มของ Al-ZnO บนฐานรองแก้วกระจกด้วยวิธีไอระเหยความร้อน ศึกษาคุณสมบัติของฟิล์ม Al-ZnO โดยใช้เครื่อง UV- visible spectrometer , เครื่อง X-ray diffractometer (XRD) และเครื่องวัดการนำไฟฟ้า ซึ่งขั้นตอนในการดำเนินการศึกษาวิจัยพอสรุปได้ดังภาพที่ 3.1

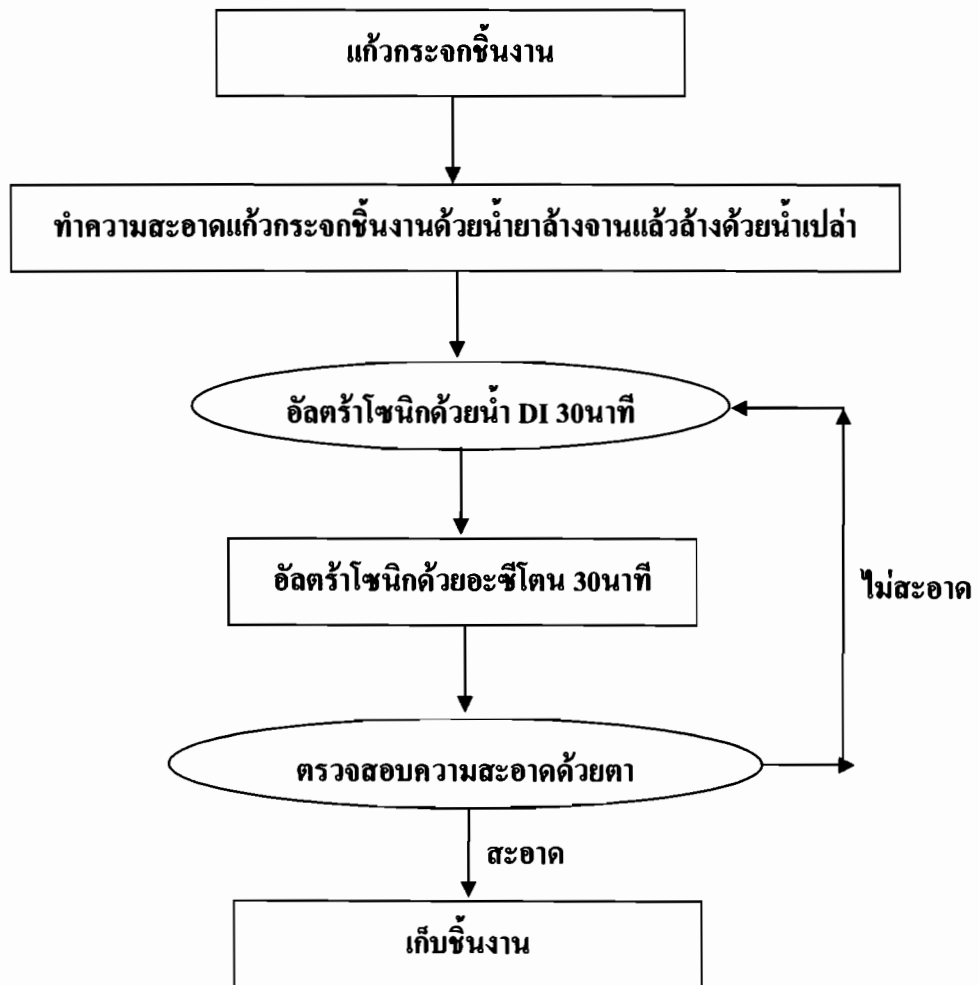


ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการศึกษาวิจัย

### 3.2 กระบวนการผลิตฟิล์ม

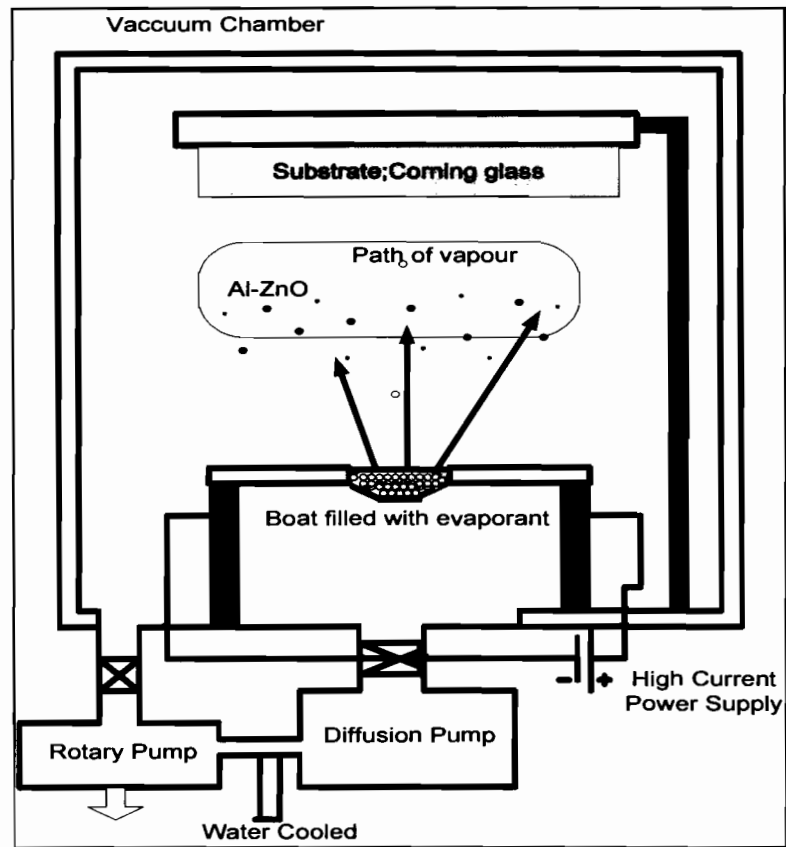
ในกระบวนการสังเคราะห์ฟิล์ม จะประกอบไปด้วยขั้นตอนการเตรียมแก้วกระจก ชิ้นงานที่จะทำการเคลือบฟิล์มลงไป และขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มเพื่อนำไปศึกษาสมบัติทางโครงสร้าง สมบัติการทะลุผ่านของแสงและสมบัติของสภาพการนำไฟฟ้าต่อไป

#### 3.2.1 ขั้นตอนการทำความสะอาดแผ่นแก้วกระจก



ภาพที่ 3.2 การทำความสะอาดแก้วกระจกชิ้นงาน

### 3.2.2 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO



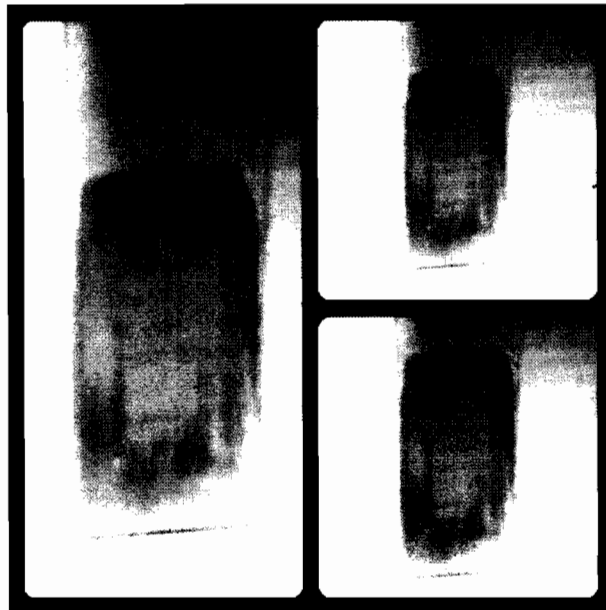
ภาพที่ 3.3 ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน

#### ขั้นตอนการสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน

ทำความสะอาดภายในภาชนะสุญญากาศ (Chamber) โดยเก็บเศษฝุ่นผงและเช็ดทำความสะอาดภายในที่เกิดขึ้นขณะไอระเหยความร้อนในครั้งที่ผ่านมาออกให้หมดด้วยอะซิโตน (Acetone) จนครบสกปรกหมด แล้วเช็ดตามด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ใช้ลูมิเนียมฟอยล์ปูผนังด้านในภาชนะสุญญากาศ เพื่อป้องกันคราบติดตามผนังขณะทำการไอระเหยความร้อน หลังจากนั้นก็นำแก้วกระจกที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแล้วนำมาวางที่แท่นวางแผ่นรองรับซึ่งอยู่ด้านบนของภาชนะสุญญากาศ โดยมีผง Al-Zn ในเบ้าทั้งสแตนโบ้ท และเพิ่มก๊าซออกซิเจนในขณะที่ไอระเหยความร้อน ดังภาพที่ 3.3 กำหนดระยะห่างระหว่างโบ้ทกับแผ่นรองรับ เป็น 6 cm และก่อนทำการไอระเหยความร้อนต้องปิดฝาภาชนะสุญญากาศให้สนิท

เตรียมชิ้นงานเสร็จแล้วก็เริ่มจากเปิดสวิตช์เครื่องสูบลม (Rotary pump: RP) ปัมจนได้ความดันที่  $10^{-1}$  mtorr และเปิดระบบน้ำหล่อเย็น เพื่อระบายความร้อนของเครื่องสูบบแบบเพอร์ไล (Diffusion pump: DF) ขณะทำการไอระเหยความร้อน พอได้ความดันตามต้องการก็ทำการเปิด

เครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump: DF) แล้วปั๊มจนได้ความดันที่  $10^{-3} - 10^{-6}$  mtorr และเราก็สามารถทำการไอระเหยความร้อนได้แล้ว เปิดระบบก๊าซออกซิเจน ( $O_2$ ) หมุนเปิดวาล์วที่ถึงก๊าซและปรับปริมาณการปล่อยก๊าซให้ได้ความดันจนเสถียร ป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าไปในระบบสุญญากาศ ค่อยๆ หมุนปรับเพิ่มกระแสไฟฟ้า (A) จนถึง 80 A จนสารในถังเตนโบ้ทหลอมละลายกลายเป็นไอไปติดที่แผ่นแก้วกระจก จากนั้นปรับกำลังไฟาลลดลงไปที่ศูนย์ทันที เสร็จแล้วปิดเครื่องสูบบแบบแพร่ไอ (Diffusion pump: DF) ที่งไว้สักพักก็นำฟิล์มออกจากภาชนะสุญญากาศ และตรวจสอบสมบัติต่างๆ ต่อไป สำหรับเครื่องสูบบกล (Rotary pump: RP) ต้องรองนกว่าระบบน้ำจะเป็นจึงสามารถปิดเครื่องได้



ภาพที่ 3.4 ฟิล์มบาง Al-ZnO

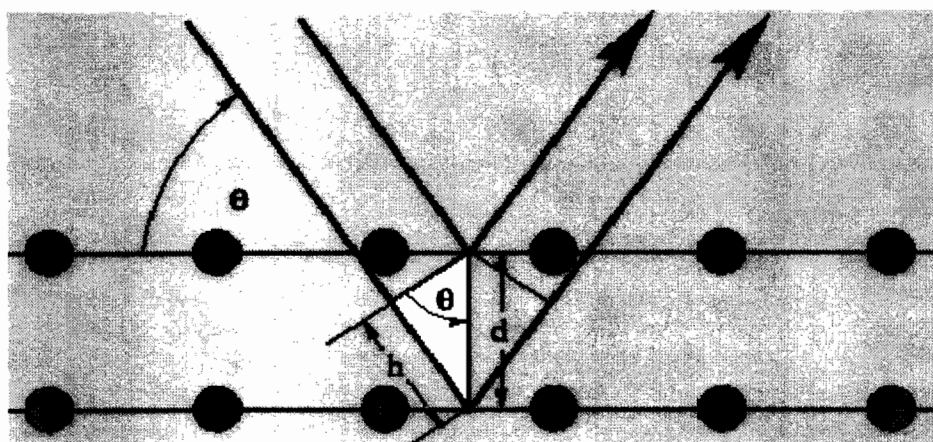


### 3.3 การศึกษาโครงสร้าง ( X-ray Diffract meter: XRD)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ เป็นเทคนิคหนึ่งที่ใช้ในการศึกษาวิเคราะห์โครงสร้างผลึกที่ไม่ทำลายชิ้นงานตัวอย่าง โดยรังสีเอ็กซ์จะเลี้ยวเบนไปตามช่องว่างระหว่างอะตอมภายในผลึกและจะถูกบันทึกค่า แล้วทำการวิเคราะห์ธรรมชาติของโครงสร้างผลึกนั้นๆ โดยระยะห่างระหว่างอะตอมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการของแบรกก์ (Bragg's law)

$$2d \sin \theta = n\lambda, n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.1)$$

- เมื่อ  $\lambda$  คือ ค่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์  
 $d$  คือ ระยะห่างระหว่างระนาบผลึก  
 $\theta$  คือ มุมตกกระทบของรังสีเอ็กซ์กับระนาบผลึก

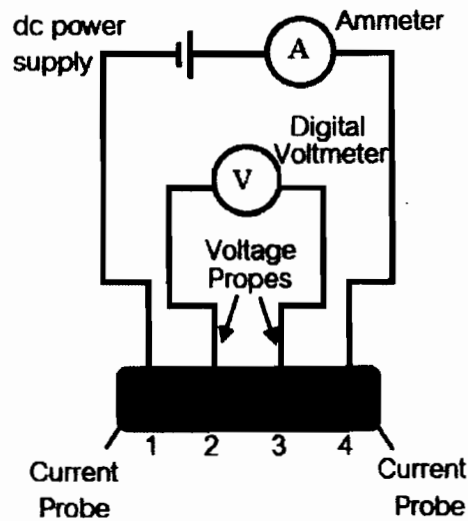


ภาพที่ 3.5 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบของอะตอม

ตัวอย่างจะถูกวางในเครื่อง XRD แล้วฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ รังสีที่เกิดการเลี้ยวเบนจะถูกบันทึกลงบนแผ่นฟิล์มหรือคอมพิวเตอร์ ข้อมูลที่ได้จะถูกรวบรวมแล้วนำมาสร้างเป็นแผนผังของความหนาแน่นอิเล็กตรอนของโมเลกุล หลังจากนั้นอะตอมจะถูกปรับค่าตัวแปรต่างๆ เช่น ตำแหน่งเทียบกับผังความหนาแน่นเพื่อให้ได้ค่าที่เหมาะสมที่สุด ค่าความเข้มที่มุมต่างๆจะถูกนำมาเขียนกราฟจนได้กราฟที่เรียกว่า diffractogram ซึ่งแต่ละพีคที่เกิดขึ้นจะเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุแต่ละชนิด ด้วยหลักการการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ ทำให้เราได้ทราบถึงข้อมูลของวัสดุที่ต้องการศึกษาทั้งทางด้านกายภาพ และทางด้านเคมี [19]

### 3.4 สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์ม

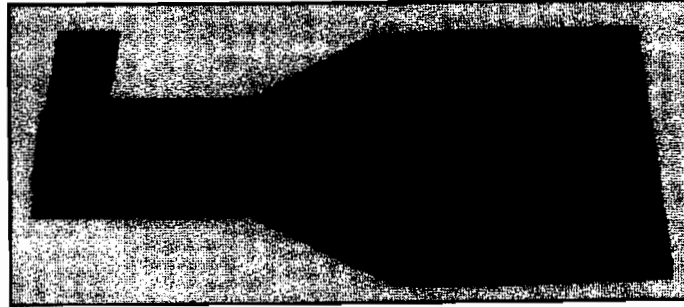
วัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคโพรบสี่จุด (Four point probe) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วย เทคนิคโพรบสี่จุด เริ่มจากนำชิ้นงานตัวอย่างตัดให้ได้ขนาด  $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$  แล้วจึงนำมาวัดด้วยเทคนิคโพรบสี่จุด โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าโพรบ 1 และ 4 กำหนดกระแสที่  $1 \mu\text{A}$  แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโพรบ 2 และ 3 ด้วยมิเตอร์ระบบดิจิทัล ดังภาพที่ 30 แล้วระบบก็จะคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าออกมาให้อัตโนมัติ นำค่าความต้านทานที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้สมการ (2.7)



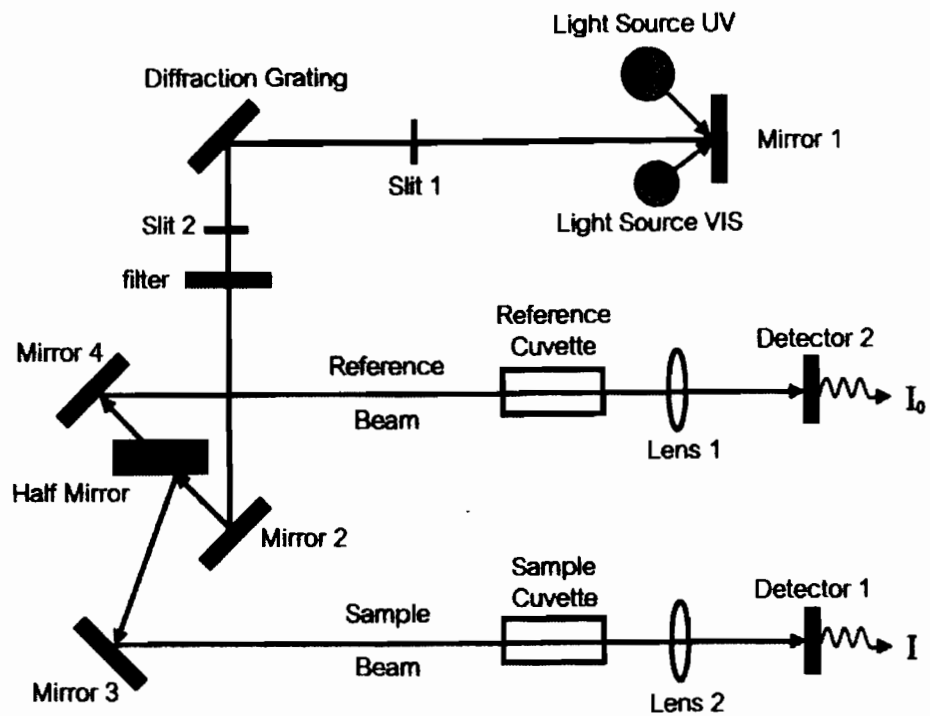
ภาพที่ 3.6 ระบบการวัดของเครื่องโพรบสี่จุด

### 3.5 การวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์ม

ขั้นตอนนี้ การวัดค่าการส่งผ่านแสงของฟิล์มสามารถวัดโดยเครื่องทดสอบการส่งผ่านแสง (UV-VIS spectrophotometer) ซึ่งเป็นแบบลำแสงคู่ แสงออกจากแหล่งกำเนิด (Deuterium) [20]



ภาพที่ 3.7 เชื่อมคอนแทกกับชิ้นงาน



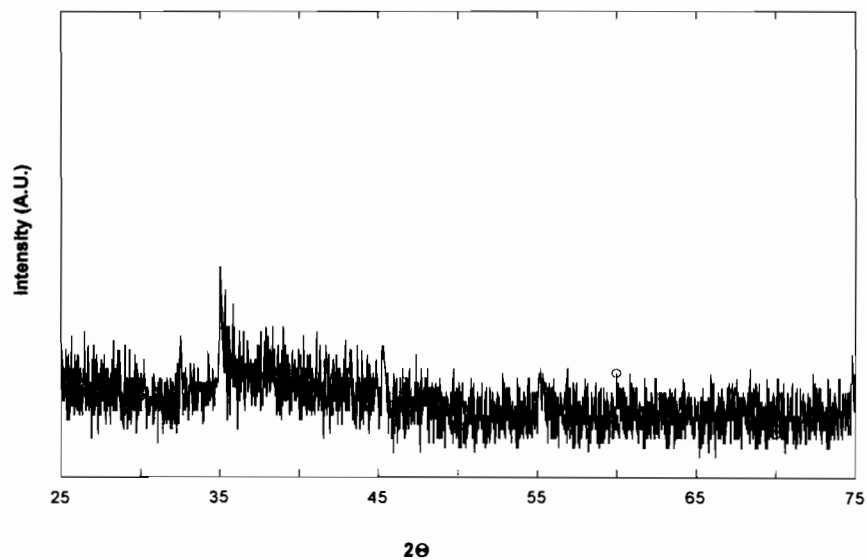
ภาพที่ 3.8 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

## บทที่ 4

### ข้อมูลและผลการวิเคราะห์ข้อมูล

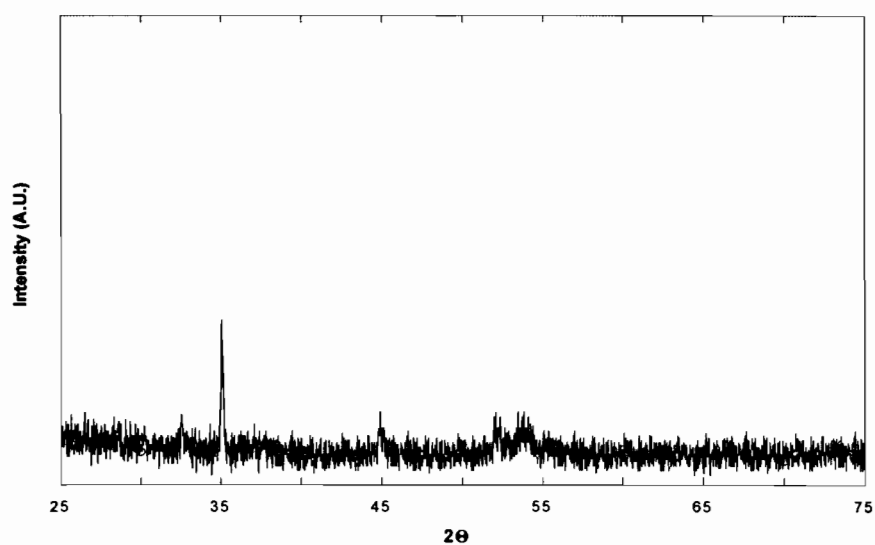
ในบทนี้ ผู้วิจัยจะนำเสนอผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคทางการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ ผลของการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง การคำนวณแถบช่องว่างพลังงาน การวัดความต้านทานไฟฟ้าเชิงแผ่นของฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน และการอภิปรายผลการวิจัย

#### 4.1 โครงสร้างทางคุณสมบัติของฟิล์มบาง Al-ZnO



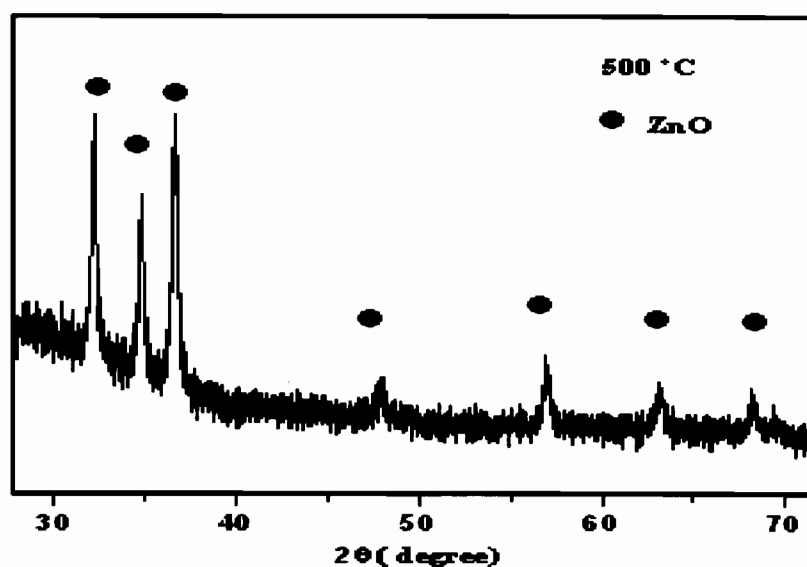
ภาพที่ 4.1 รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิ 350 °C

จากภาพที่ 4.1 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิ 350 °C ข้อมูลแสดงให้เห็นว่ามีพีค (002) ของ ZnO ที่ประมาณ 35°



ภาพที่ 4.2 รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C

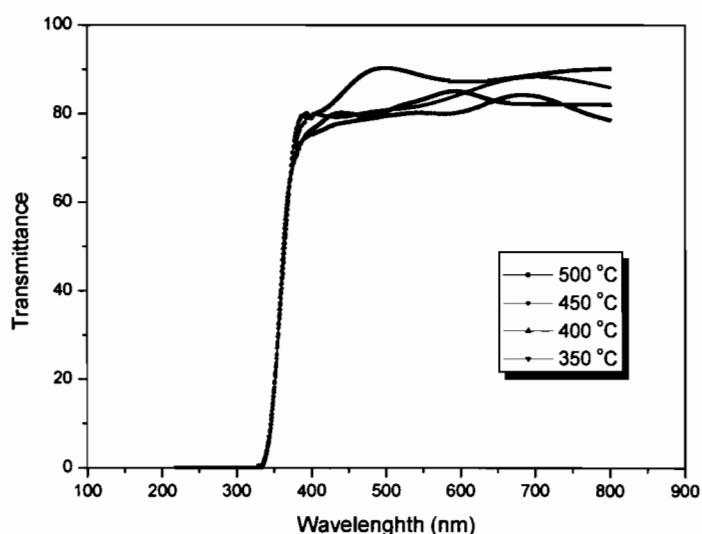
เมื่อนำฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C ผลที่ได้ปรากฏว่าเกิดพีค (002) โดดเด่นขึ้น ขณะเดียวกันก็ปรากฏพีค (100), (110) เกิดขึ้น แสดงให้เห็นว่าเกิดโครงสร้างเป็น polycrystal ของ Al-ZnO



ภาพที่ 4.3 รูปแบบ XRD ของฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิ 500 °C

เมื่อนำฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิ 500 °C ผลที่ได้ปรากฏว่าเกิดเป็น polycrystal และแสดงพีค (100), (002), (101), (102), (110), (103), (112) และ (201) ผลการวิเคราะห์พบว่า ฟิล์มบาง Al-ZnO มีโครงสร้างเวทซ์ไฮท์ และมีแลชทิจพารามิเตอร์ ในระบบ P63mc,  $a = b = 3.24 \text{ \AA}$  และ  $c = 5.20 \text{ \AA}$  พีคที่เกิดขึ้นพบว่าคล้ายกับ โครงสร้างของฟิล์มบาง ZnO ดังภาพที่ 4.3

## 4.2 การวิเคราะห์สมบัติการส่งผ่านของแสง



ภาพที่ 4.4 การส่งผ่านแสงหลังจากอบร้อนที่อุณหภูมิ 350 °C, 400 °C, 450 °C และ 500 °C ตามลำดับ

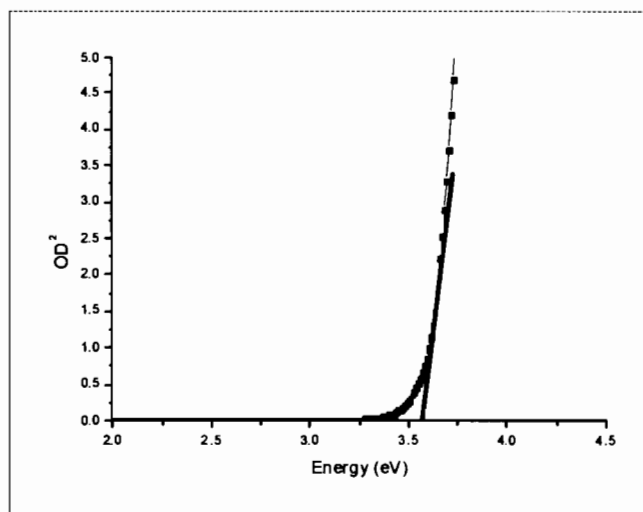
การวิเคราะห์ผลของค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงโดยใช้ Perkin UV-visible spectrometer ในการตรวจสอบ โดยวัดค่าความยาวคลื่นของแสงในช่วง 200-800 นาโนเมตร ซึ่งพบว่า การส่งผ่านแสงของฟิล์มบาง Al-ZnO หลังจากทำการอบร้อนที่อุณหภูมิ 350 °C, 400 °C, 450 °C และ 500 °C ตามลำดับ มีค่าแตกต่างกัน คือ ค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงดีที่สุดในค่ามากกว่า 80% ของฟิล์มบาง Al-ZnO หลังจากทำการอบร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C ดังภาพที่ 4.4

แถบพลังงานสามารถหาได้จาก Tauc 's plot

$$(\alpha h\nu)^{1/2} = A(h\nu - E_g) \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\alpha$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน ( $\text{cm}^{-1}$ ),  $A$  คือ ค่าคงที่ซึ่งไม่ขึ้นกับพลังงานโฟตอน, และ  $h\nu$  คือ พลังงานกระตุ้น

และนำไปวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง optical density(OD) ( $=\log(100/T)$ ) กับ Energy(eV) ซึ่งค่าที่ได้มีค่าอยู่ระหว่าง 3.5-3.6 eV ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 แถบพลังงานของฟิล์มบาง Al-ZnO โคปที่ 4% wt. อบร้อนที่อุณหภูมิ 500 °C

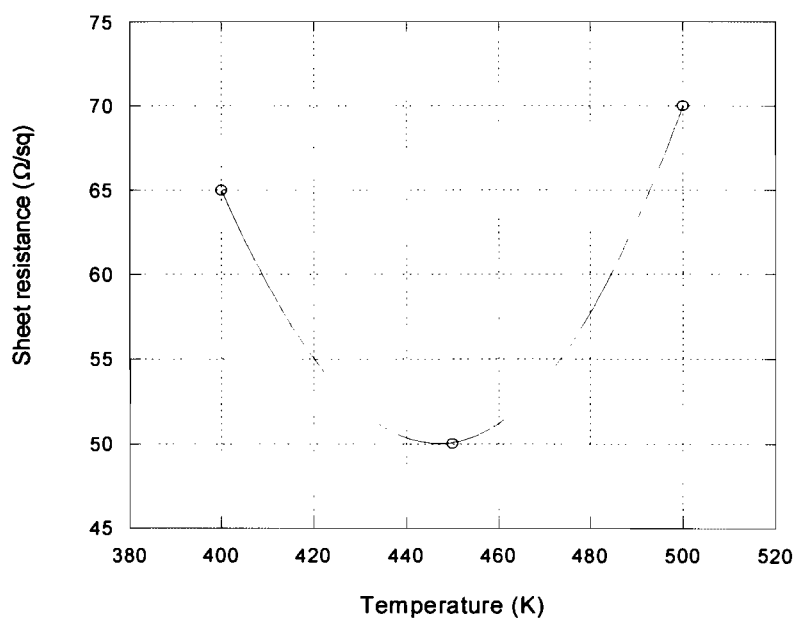
### 4.3 การวิเคราะห์ผลสภาพต้านทานไฟฟ้า

ตารางที่ 4.1 ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง Al-ZnO ที่อุณหภูมิต่างๆ

ความเข้มข้นของการโคป Al 4% wt.	สภาพต้านทานไฟฟ้า ( $\Omega/\text{sq}$ )
350 °C	NA
400 °C	65
450 °C	50
500 °C	70



ค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง Al-ZnO โด๊ปที่ 4% wt. และอบร้อนที่อุณหภูมิ 400 °C, 450 °C และ 500 °C ตามลำดับ พบว่าค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้ามีค่าเป็น 65, 50 และ 70 Ω/sq ตามลำดับ แสดงว่าเมื่อนำฟิล์มบาง Al-ZnO ที่ได้ไปอบร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C จะได้ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำที่สุด ดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.6 ค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

## บทที่ 5

### สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปและอภิปรายผลการศึกษา

จากการสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน โดยใช้ผงซิงค์ (Zinc powder) และผงอลูมิเนียม (Aluminium powder) เป็นสารตั้งต้นในสุญญากาศความดันประมาณ 50 มิลลิทอร์นในบรรยากาศออกซิเจน บนแผ่นแก้วกระจก ฟิล์มที่ได้นำไปอบร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ผลการวิเคราะห์ข้อมูล XRD พบว่า ได้ฟิล์มบาง Al-ZnO ที่มีโครงสร้างแบบวิทซ์ไซท์ (Wurtzite structure) เมื่อนำไปศึกษาสมบัติทางแสงโดยการวัดสัมประสิทธิ์การทะลุผ่านของแสง (T) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ พบว่า แสงที่ความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (visible light) สามารถทะลุผ่านได้มากกว่าร้อยละ 80 และทะลุผ่านได้ดีที่สุดเมื่อฟิล์มบาง Al-ZnO อบร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C ผลการวัดความต้านทานเชิงแผ่น (sheet resistance) ของฟิล์มบาง Al-ZnO พบว่า ฟิล์มบางมีความต้านทานต่ำที่สุดเมื่ออบร้อนที่อุณหภูมิ 450 °C

การวิจัยนี้ทำให้เราทราบเทคนิคและวิธีการปลูกฟิล์มบาง Al-ZnO ซึ่งจะสามารถนำไปใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ เลเซอร์ไดโอด จอแสดงผลคอมพิวเตอร์ เป็นต้น เนื่องจากฟิล์มที่ได้สามารถให้แสงผ่านได้ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80 และในขณะเดียวกันสามารถนำไฟฟ้าได้โดยมีความต้านทานไฟฟ้าประมาณ 50  $\Omega$ /sq. ซึ่งถือว่าอยู่ในระดับมาตรฐาน

#### 5.2 ข้อเสนอแนะ

ในขณะที่ทำการสังเคราะห์ฟิล์มบาง Al-ZnO โดยวิธีไอระเหยความร้อน เราควรใส่สารในถังสแตนไบท์ให้พอดี เพราะถ้าใส่มากเกินไป เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้า ทำการไอระเหยความร้อน สารในถังสแตนไบท์จะกระเด็นออกจากเบ้าหลอมหมด

เราอาจนำฟิล์มที่สังเคราะห์ได้ไปอบร้อนในสภาวะก๊าซออกซิเจน หรือก๊าซออกซิเจนผสมก๊าซอาร์กอน เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น เนื่องจากการเป็นผลึกมากขึ้นส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การส่องผ่านแสงมีค่ามากขึ้น อีกทั้งค่าสภาพความต้านทานก็มีค่าลดลง [18]

เอกสารอ้างอิง

## เอกสารอ้างอิง

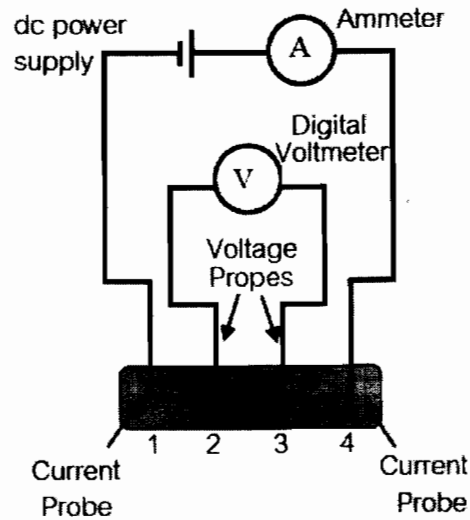
- [1] S. - M. Hyun, K.Hong, B. – H. Kim. “Preparation and characterization of Al doped ZnO transparent conducting thin film by sol-gel precessing”, J. Korean Ceram. Soc. 33: 149-154, 1996.
- [2] ZHOU Y and et al. “The characteristics of aluminium-doped zinc oxide films prepared by pulsed magnetron sputtering from powder targets [J]”, Thin Solid Films. 447-448: 33-39, 2004.
- [3] Lee J H, PARK B O. “Characteristics of Al-doped ZnO thin films obtained by ultrasonic spray pyrolysis: effects of Al doping and an annealing treatment [J]”, Mater. Sci. Eng. B. 106(3): 242-245, 2004.
- [4] H. Watanabe, Jpn. “The Influence of Ambient Oxygen on the Electronic Conductivity of ZnO Thin Films”, J. Appl. Phys. 9: 418, 1970.
- [5] H. Gopala Swamy, P. Rayarama Reddy. “Preparation of ZnO Films by Activated Reactive Evaporation”, Semicond. Sci. Technol. 5: 980, 1990.
- [6] G.S. Belo and et al. “A simplified reactive thermal evaporation method for indium thin oxide electrodes”, Applied Surface Science. 255: 755-757, 2008.
- [7] Madedlung, O. “Semiconductor Group IV Element and III-V Compound”, n.p.: Springer-Verlag. 26: 334-340, 1993.
- [8] Hartnagel H. L; et al. “Semiconducting Transparent Thin Films.”, Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia. 17, 1996.
- [9] Ben G. Streetman. Solid State Electronic Devices. New jersey: Prentice-Hall international, 1995.
- [10] อ้อมตะวัน แสงจักรวาท. อิทธิพลของกรดสเดียริกและโพลีเมทิลเมทาไครเลตต่อโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางไฟฟ้าของเซรามิกส์ซิงค์ออกไซด์เจือด้วยอลูมิเนียม. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ, 2522.
- [11] Guojia, Fang; Dejie, Li; & Bao-Lun Yao. “Fabrication and vacuum annealing of transparent conductive AZO thin films prepared by DC magnetron sputtering”, Vacuum. 68: 363-372, 2003.
- [12] Milton Ohring. “Thin Film Technology”, The Materials Science of Thin films. 2, 1997.

### เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [13] อุดม ทิพราช. “กระบวนการทำฟิล์มบาง”, ใน เทคนิคสุญญากาศ. อุบลราชธานี : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2550.
- [14] Robert, M.R. The Structure and Properties of Materials. New York: John Wiley & Son., 1966.
- [15] Jin Ma and et al. “Electrical and optical properties of ZnO: Al films prepared by an evaporation method”, Thin Solid Films. 279: 213-215, 1996.
- [16] Ma Jin and et al. “Optical and electronic properties of transparent conducting ZnO and ZnO:Al films prepared by evaporating method”, Thin Solid Films. 357: 98-101, 1999.
- [17] Zhiyun Zhang and et al. “Influence of deposition temperature on the crystallinity of Al-doped ZnO thin films at glass substrates prepared by RF magnetron sputtering method”, Superlattices and Microstructures. 49: 644-653, 2011.
- [18] E. Fortunato and et al. “Recent advances in ZnO transparent thin film transistors”, Thin Solid Films. 487: 205-211, 2005.
- [19] อธิวัฒน์ ไทยแท้. ผลของสีย้อมธรรมชาติต่อประสิทธิภาพเซลล์แสงอาทิตย์สีย้อมไวแสง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต : มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 2550.
- [20] พรรณทิพย์ ตั้งปรียารักษ์. เครื่องตรวจวัดสารด้วยการดูดกลืนแสง. <http://www.mvit.ac.th/~sarawoot/chem40235.htm>. 18 มกราคม, 2555.
- [21] Y. Zhou and P J. Kelly. “Zinc oxide-based transparent conductive oxide films prepared by pulsed magnetron sputtering from powder targets: Process features and film properties”, Thin Solid Films. 18(23): 469-470, 2004.

ภาคผนวก

### การวัดความต้านทานด้วยเทคนิคสี่ขั้ว (Four point probe technic)



ในสารกึ่งตัวนำ เรามักนิยมวัด “ความต้านทานแผ่น (sheet resistance)” ซึ่งสามารถวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ (Four point probe) ในขั้นตอนนี้จะเป็นการวัดความต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ เริ่มจากนำชิ้นงานตัวอย่างตัดให้ได้ขนาด  $1.0 \times 1.0 \text{ cm}^2$  แล้วจึงนำมาวัดด้วยเทคนิคโฟร์พอยท์โพรบ โดยการป้อนไฟฟ้ากระแสตรงเข้าโพรบ 1 และ 4 กำหนดกระแสคงที่ที่  $1 \mu\text{A}$  แล้ววัดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างโพรบ 2 และ 3 ด้วยมิเตอร์ระบบดิจิตอล ดังภาพที่ 30 แล้วระบบก็จะคำนวณค่าความต้านทานไฟฟ้าออกมาให้อัตโนมัติ นำค่าความต้านทานที่ได้ไปคำนวณหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าโดยใช้สมการ

$$R = \frac{\rho L}{wd} = \frac{L}{wd} \frac{1}{\sigma}$$

เมื่อ  $R$  คือความต้านทานไฟฟ้า,  $L$  คือความยาว,  $w$  คือความกว้าง และ  $d$  คือความหนา

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ

นางจุไลพร วงศ์วัตถาภรณ์

ประวัติการศึกษา

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์) มหาวิทยาลัย  
อุบลราชธานี, พ.ศ.2545-2548

ประวัติการวิจัย

Chulaiporn Vongwatthaporn and Udom Tipparach,  
Synthesis and Physical Properties of Al-ZnO Thin  
Film by Thermal Evaporation. The 13<sup>th</sup> Graduate  
Research Conference Khon Kaen University, 17  
February, 2012, Khon Kaen University, Khon Kaen,  
Thailand.

