

### บทที่ 3

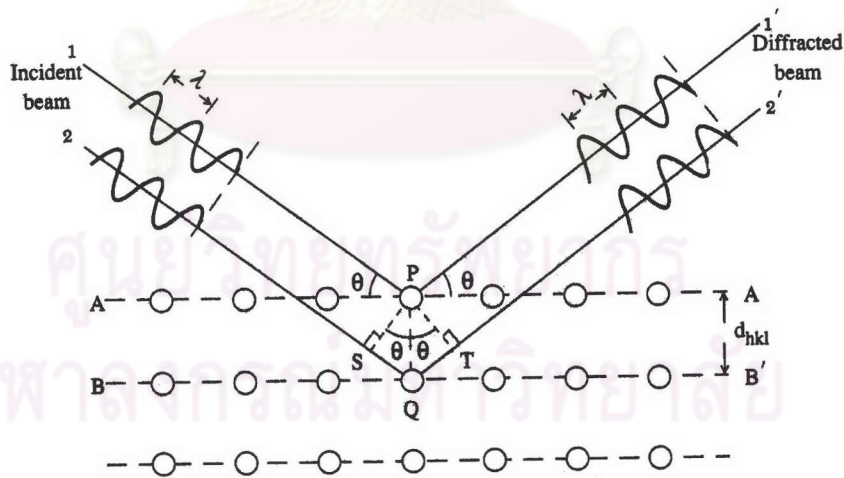
## วิธีการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

### 3.1 สมบัติทางโครงสร้าง

#### 1) การศึกษาโครงสร้างผลึกจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffraction) [9,10,11]

รังสีเอกซ์ (X-Rays) เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานอำนาจทะลุทะลวงสูง มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงระหว่าง 0.1-100 Å ซึ่งมีการศึกษาเกี่ยวกับสมบัติและการเกิดอันตรกิริยาของรังสีต่อสาร เช่น การกระเจิง หรือการเลี้ยวเบน (Diffraction) กับโครงสร้างผลึก (Crystal Structure) หรือโมเลกุลของสารได้

เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบบนระนาบของโครงสร้างผลึกโดยทำมุม  $\theta$  บางส่วนของรังสีเอกซ์ จะเกิดการกระเจิงด้วยชั้นของอะตอมที่ผิวหน้า อีกส่วนหนึ่งของรังสีเอกซ์จะผ่านไปยังชั้นถัดลงไปของอะตอม ซึ่งบางส่วนจะเกิดการกระเจิงและส่วนที่เหลือก็ผ่านเข้าไปในชั้นที่ถัดลงไปอีกของอะตอม แสดงดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบในผลึก

ถ้าอะตอมในผลึกมีการจัดเรียงตัวอย่างเป็นระเบียบ และมีระยะห่างระหว่างอะตอมเท่าๆ กัน ลำรังสีเอกซ์ที่ผ่านเข้าไปในแต่ละชั้นของอะตอมจะเกิดการเลี้ยวเบนเป็นลำขนานกัน

จากรูปที่ 3.1 เมื่อรังสีเอกซ์ตกกระทบกับระนาบของผลึก โดยระยะห่างระหว่างชั้นของผลึกคือ  $d$  รังสีเอกซ์ตกกระทบที่ตำแหน่ง P และ Q ทำมุม  $\theta$  กับระนาบ ผลต่างทางเดินของรังสีเอกซ์ทั้งสองมีค่าเท่ากับ  $SQ+QT$  ซึ่งเท่ากับ  $d \sin 2\theta$  เมื่อเกิดการแทรกสอดแบบเสริม (Constructive Interference) ที่มุม  $\theta$  ผลต่างทางเดินของรังสีมีค่าเท่ากับ  $n\lambda$  ดังนั้นสามารถเขียนความสัมพันธ์ได้ดังสมการที่ (3.1)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (3.1)$$

เรียกสมการที่ (3.1) ว่า สมการของแบรกก์ (Bragg's Equation)

- เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์  
 $\theta$  คือ มุมสะท้อนจากระนาบ ซึ่งเท่ากับมุมตกกระทบ  
 $d_{hkl}$  คือ ระยะระหว่างระนาบ  
 $n$  คือ ลำดับการเลี้ยวเบน เป็นเลขจำนวนเต็ม มีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ....

ระนาบที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg Plane) มุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction Angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่าของมุมสะท้อน ( $2\theta$ )

ดังนั้นฟิล์มที่เตรียมได้สามารถนำไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, XRD) ซึ่งจะให้ข้อมูลเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์และมุมเลี้ยวเบน เรียกว่า แบบอย่างการเลี้ยวเบน (Diffraction Pattern) ซึ่งการเกิดการแทรกสอดแบบเสริม ทำให้ความเข้มรังสีเอกซ์เพิ่มขึ้นมาก สังเกตได้จากยอด (Peak) ของการเลี้ยวเบนจะสูง สำหรับสารชนิดเดียวกันนั้น ยอดของการเลี้ยวเบนจะเกิดที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอ

ในงานวิจัยนี้ วิเคราะห์ด้วยเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโทมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer, Bruker XRD D8 Advance) และผลที่ได้จากการทดลองนำมาเปรียบเทียบกับข้อมูลมาตรฐาน JCPD (Joint Committee on Powder Diffraction Standard) ซึ่ง JCPD เป็นองค์กรเก็บรวบรวมข้อมูลของสารประกอบต่างๆ ในรูปแบบการ์ด (Card) และคอมแพคดิส (Compact Disk หรือ CD)

ทั้งนี้ข้อมูลที่ได้จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ในโครงสร้างผลึก สามารถนำไปคำนวณค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก ( $a, b, c, \alpha, \beta, \gamma$ ) โดยการพิจารณาดังต่อไปนี้

- โครงสร้างผลึกแบบซิงเบลนด์ (Zincblende)

โครงสร้างผลึกแบบซิงเบลนด์ จัดอยู่ในระบบผลึกแบบลูกบาศก์ (Cubic) โดยที่  $a = b = c$  และ  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$  โดยมีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (3.2)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (3.2)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.2) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.3)

$$\lambda = \frac{2a \sin \theta}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}} \quad (3.3)$$

- โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซด์ (Wurtzite)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ตไซด์ จัดอยู่ในระบบผลึกแบบ Hexagonal โดยที่  $a = b \neq c$  และ  $\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$  มีความสัมพันธ์กันดังสมการที่ (3.4)

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.4)$$

เมื่อแทนสมการที่ (3.4) ลงในสมการที่ (3.1) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{4}{3} \left( \frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (3.5)$$

2) การศึกษาองค์ประกอบของฟิล์ม [9]

ในการศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มนั้น ทำการศึกษาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดด้วยรังสีเอกซ์ (Scanning Electron Microscope, SEM) ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุแบบเอนเนอร์ยีดิสเพอร์ซีฟเอกซเรย์แอนาไลซิส (Energy Dispersive X-Ray Analysis, EDX) โดยเป็นการวิเคราะห์ที่ให้ค่าอิเล็กตรอนกระแทบบนผิวฟิล์ม เพื่อวัดปริมาณของรังสีเอกซ์ โดยข้อมูลที่ได้เป็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนนับ (Counts) ที่ระดับพลังงานต่างๆ และ



พื้นที่ใต้กราฟของยอด (Peak) ที่สนใจ คือ เป็นปริมาณของธาตุที่อยู่ในฟิล์ม ซึ่งให้ข้อมูลเป็นสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมธาตุที่มีอยู่ในฟิล์มนั่นเอง

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาองค์ประกอบของฟิล์มด้วยเครื่อง SEM JSM-5800W ซึ่งประกอบด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์แบบ EDX ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาสัดส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของ Zn และ S ในฟิล์มบาง ZnS ที่เตรียมได้

### 3.2 สมบัติทางแสง

#### 1) การดูดกลืนแสง [12,13]

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังนั้นจึงสามารถใช้หลักการเกี่ยวกับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าอธิบายปรากฏการณ์ทางแสงต่างๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อสารได้

เมื่อมีแสงมาตกกระทบสาร ความเข้มแสงจะลดลงเมื่อแสงเดินทางลึกเข้าไปในเนื้อสาร เนื่องจากอิเล็คตรอนดูดกลืนพลังงานแสงที่ผ่านเข้ามาในตัวกลาง แล้วย้ายสถานะพลังงานไปในระดับที่สูงขึ้นไป โดยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient,  $\alpha$ ) คือสัดส่วนของความเข้มแสงที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของตัวกลาง ดังสมการที่ (3.6)

$$\alpha = -\frac{1}{I(x)} \frac{dI(x)}{dx} \quad (3.6)$$

เมื่อ  $I(x)$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบและผ่านเข้าไปในเนื้อสาร ณ ตำแหน่งใดๆ นับจากผิวลึกไปเป็นระยะทาง  $x$

เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง  $x = 0$  โดยให้ความเข้มแสงที่ตกกระทบมีค่า  $I_0$

ดังนั้น  $I(x) = I_0$  จึงเขียนสมการ (3.6) ได้เป็น

$$I(x) = I_0 e^{-\alpha x} \quad (3.7)$$

โดยความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง กับสัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Coefficient,  $k$ ) แสดงในสมการที่ (3.8)

$$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (3.8)$$

เมื่อ  $\lambda$  คือ ความยาวคลื่นของแสงในสุญญากาศ

สำหรับการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเชิงค้ำไฟต์นั้น [14] เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน (Interband Transition) จากแถบวาเลนซ์ (Valence Band) ไปสู่แถบการนำ (Conduction Band) เมื่อค่าพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างแถบพลังงาน (Energy Gap,  $E_g$ ) โดยขอบการดูดกลืน (Absorption Edge) คือจุดที่พลังงานของโฟตอนมีค่าเท่ากับ  $E_g$  และเมื่อพลังงานโฟตอนมีค่าน้อยกว่าขอบการดูดกลืน อิเล็กตรอนจะไม่เกิดการย้ายสถานะพลังงาน ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะลดลงอย่างรวดเร็ว

ทั้งนี้การดูดกลืนแสง แบ่งออกเป็น 2 แบบ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการย้ายสถานะ และโครงสร้างแถบพลังงานของสาร ได้แก่ การย้ายสถานะแบบตรง (Direct Transition) และการย้ายสถานะแบบเฉียง (Indirect Transition) โดยสารกึ่งตัวนำเชิงค้ำไฟต์มีการย้ายสถานะแบบตรง โดยแบ่งได้อีก 2 แบบ คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม (Allowed Transition) และการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม (Forbidden Transition)

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของการย้ายสถานะทั้งสอง แสดงได้ดังสมการที่ (3.9) และ (3.10)

(1) การย้ายสถานะชนิดยินยอม

$$\alpha_{hv} = A(hv - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (3.9)$$

(2) การย้ายสถานะชนิดต้องห้าม

$$\alpha_{hv} = A'(hv - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (3.10)$$

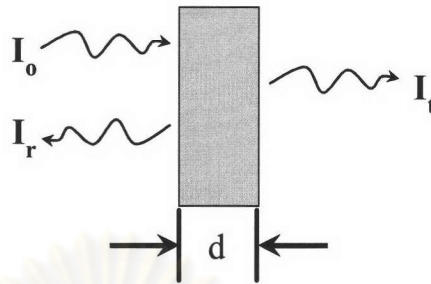
เมื่อ  $A$  และ  $A'$  เป็นค่าคงที่

โดย  $E_g$  คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

$hv$  คือ พลังงานโฟตอน

2) การส่งผ่านแสงของฟิล์ม [13,15]

เมื่อมีพลังงานโฟตอนตกกระทบฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงพลังงานโฟตอนตกกระทบฟิล์ม

ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงกับสัมประสิทธิ์การสะท้อน และสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน แสดงได้ดังนี้

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (3.11)$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1 - R^2 e^{-2\alpha d}} \quad (3.12)$$

โดย  $R$  คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน (Reflection Coefficient)

$T$  คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน (Transmission Coefficient)

$I_t$  คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่าน

$I_r$  คือ ความเข้มของแสงที่สะท้อน

$I_0$  คือ ความเข้มของแสงตกกระทบ

$\alpha$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient)

$d$  คือ ความหนาของฟิล์ม

$n$  คือ ดัชนีหักเห (Refractive Index)

$k$  คือ สัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงชัน (Extinction Coefficient)

เมื่อปริมาณ  $\alpha d$  มีค่ามาก ทำให้  $R^2 e^{-2\alpha d}$  มีค่าน้อยมากๆ จึงสามารถเขียนสมการที่ (3.12) ได้เป็น

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \quad (3.13)$$

โดยทั่วไป ค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมาก เมื่อเทียบกับพลังงานโฟตอนที่มาตกกระทบ ดังนั้นเทอม  $(1-R)^2$  จะประมาณเป็นค่าคงที่ และสามารถเขียนสมการที่ (3.13) ได้เป็น

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right) + A \quad (3.14)$$

เมื่อ  $A$  คือ ค่าคงที่

ในงานวิจัยนี้ ศึกษาการส่งผ่านแสงของฟิล์ม ด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ (UV-VIS-NIR Spectrometer; Perkin Elmer Lambda900) ซึ่งจะได้ผลออกมาเป็นสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

### 3) การหาช่องว่างแถบพลังงาน

จากสมการที่ (3.13) และสมการที่ (3.14) สามารถแสดงความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนกับสัมประสิทธิ์การส่งผ่านได้ ดังสมการที่ (3.15)

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) + A \quad (3.15)$$

โดยค่าคงที่ในสมการที่ (3.15) เป็นค่าที่เกิดจากความเข้มแสงที่สะท้อน เรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (Background Absorption Coefficient,  $\alpha_0$ ) ซึ่งพลังงานแสงที่ต่ำกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ไม่สามารถทำให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำได้ ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลังนี้ จึงเป็นค่าที่ไม่เกี่ยวข้องกับช่องว่างแถบพลังงาน และต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลังที่เกิดขึ้นนี้ลบออกจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่วัดได้ และได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเป็น  $(\alpha - \alpha_0)$  ซึ่งความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน แสดงดังรูปที่ 3.4

เนื่องจากฟิล์มบาง ZnS ในงานวิจัยนี้มีช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (Direct Band Gap) โดยมีความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสง ดังสมการที่ (3.16)



$$\alpha h\nu = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (3.16)$$

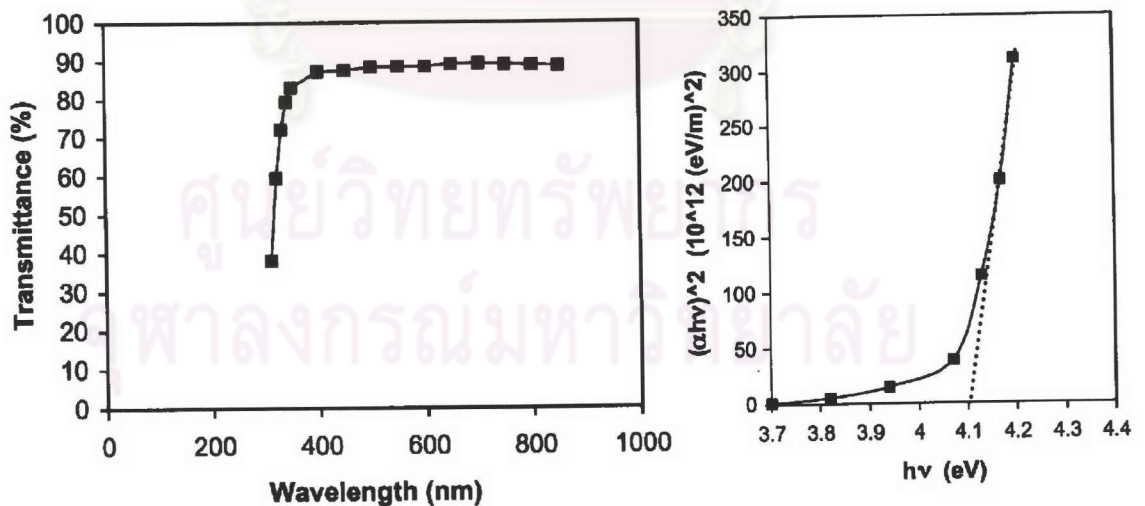
หรือเขียนได้เป็น

$$(\alpha h\nu)^2 = A^2(h\nu - E_g) \quad (3.17)$$

ดังนั้นเมื่อค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเป็น  $(\alpha - \alpha_0)$  จึงสามารถเขียนสมการที่ (3.17) ได้เป็น

$$((\alpha - \alpha_0)h\nu)^2 = A^2(h\nu - E_g) \quad (3.18)$$

จากสมการที่ (3.18) สามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ โดยเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $((\alpha - \alpha_0)h\nu)^2$  กับพลังงานโฟตอน ( $h\nu$ ) ดังนั้นช่องว่างแถบพลังงานคือจุดตัดบนแกนของพลังงานโฟตอน แสดงดังรูปที่ 3.3 (ข)

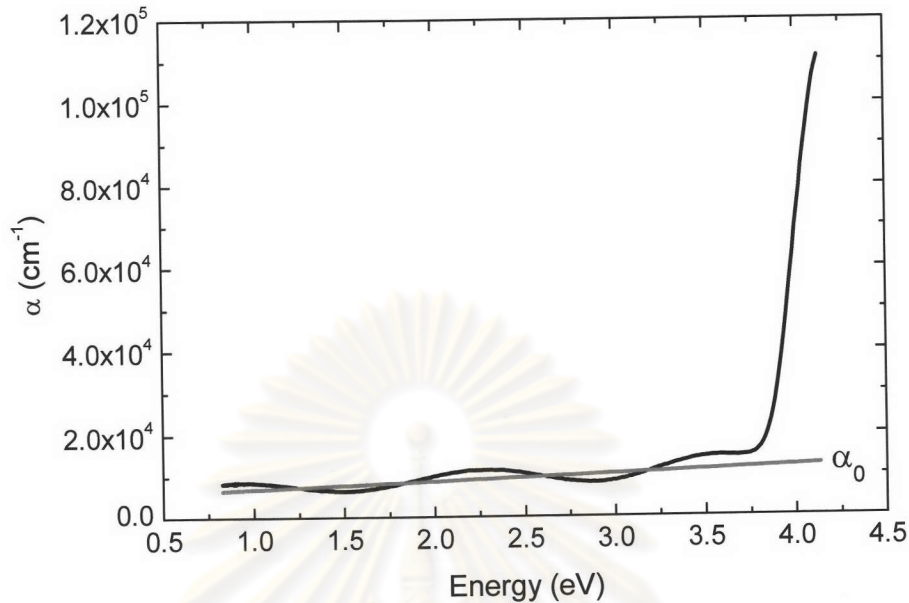


(ก)

(ข)

รูปที่ 3.3 (ก) แสดงสเปกตรัมของการส่งผ่านแสงของ ZnS และ (ข) แสดงช่องว่างแถบพลังงานของ ZnS [16]





รูปที่ 3.4 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของฟิล์มบาง ZnS

#### 4) การหาความหนาของฟิล์ม [17]

ในการหาความหนาของฟิล์มนั้น สามารถทำได้ด้วยวิธีการวัดด้วยเครื่องวัดความหนาแบบต่างๆ เช่น การวัดแบบ Step-Height ด้วยเครื่อง Profilometer หรือวิธีคำนวณหาค่าความหนาจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง โดยตัวอย่างสเปกตรัมของการส่งผ่านแสง แสดงดังรูปที่ 3.3 (ก)

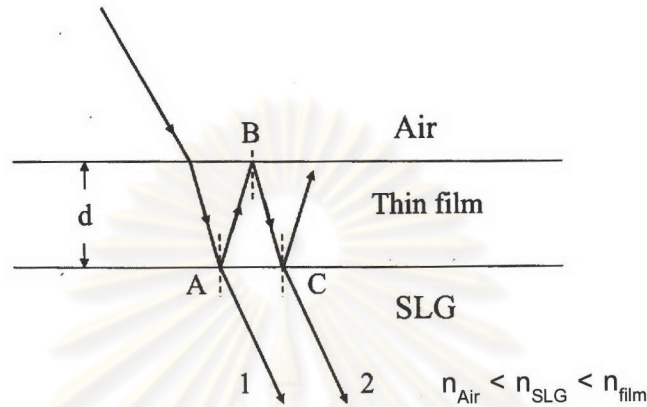
พิจารณาฟิล์มที่มีความหนา  $d$  และดัชนีหักเห  $n_{film}$  โดยเมื่อรังสีของแสงในอากาศเดินทางทะลุผ่านรอยต่อระหว่าง 2 ตัวกลางที่มีดัชนีหักเหต่างกัน รังสีจะแยกเป็นสองส่วน คือรังสีตกกระทบและรังสีสะท้อน แสงเดินทางจากตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n_1$  ผ่านไปยังตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n_2$  ด้วยเฟส (phase)  $180^\circ$  เมื่อ  $n_2 > n_1$  และไม่มีการเปลี่ยนเฟส เมื่อ  $n_2 < n_1$  โดยแสงความยาวคลื่น  $\lambda_n$  ในตัวกลางที่มีดัชนีหักเห  $n$  เท่ากับ

$$\lambda_n = \frac{\lambda}{n} \quad (3.19)$$

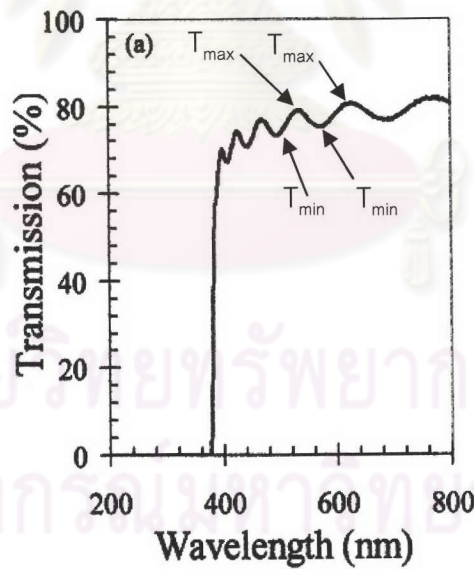
เมื่อ  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของแสงใน free space

จากรูปที่ (3.5) รังสี 1 ผ่านตัวกลางโดยไม่มีการเปลี่ยนเฟสเมื่อเทียบกับรังสีตกกระทบ เนื่องจากเป็นรังสีส่งผ่านที่ตำแหน่ง A เมื่อ  $n_{SLG} < n_{film}$  รังสีสะท้อนที่ตำแหน่ง A จะสะท้อนจากผิวหน้าฟิล์มที่ตำแหน่ง C ซึ่งจะไม่มีการเปลี่ยนเฟส เนื่องจากที่ตำแหน่ง B นั้น  $n_{Air} < n_{film}$  รังสี 1

จึงมีเฟสเดียวกับรังสี 2 โดยรังสี 2 เดินทางด้วยระยะทาง  $2d$  ก่อนที่รังสีจะส่งผ่านที่ตำแหน่ง C และรวมกันอีกครั้งด้วยเฟสเดียวกัน เมื่อผ่านทะลุฟิล์มโปร่งแสง ซึ่งเป็นผลให้เกิดการแทรกสอดกันของรังสีส่งผ่านของแสง



รูปที่ 3.5 แสดงการเกิดการแทรกสอดของแสงภายในฟิล์ม



รูปที่ 3.6 แสดงยอดคลื่นที่อยู่ติดกันในสเปกตรัมการส่งผ่านแสง

สำหรับสารกึ่งตัวนำนั้น สามารถพิจารณาช่วงความยาวคลื่นได้ 2 บริเวณ คือในช่วงความยาวคลื่นมาก (พลังงานโฟตอนน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน) จะมีการส่งผ่านแสงที่แสดงการแกว่งกวัด (Oscillation) อันเนื่องมาจากผลของการแทรกสอดในฟิล์ม ส่วนในช่วงความยาวคลื่นสั้น

(พลังงานโฟตอนมากกว่าช่องว่างแถบพลังงาน) การส่งผ่านแสงจะลดลงอย่างรวดเร็ว แสดงดังรูปที่ 3.6 โดยให้ค่า  $T_{\max}$  และ  $T_{\min}$  เป็นค่าการส่งผ่านแสงมากที่สุดและน้อยสุด ตามลำดับ

สำหรับการแทรกสอดแบบเสริมกัน (Constructive Interference) นั่นคือ  $T_{\max}$  จะเกิดขึ้นเมื่อ

$$2d = m\lambda_n \quad (3.20)$$

เมื่อ  $m = 0, 1, 2, \dots$  และสำหรับการแทรกสอดแบบหักล้างกัน (Destructive Interference) นั่นคือ  $T_{\min}$  โดย  $m = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots$

ดังนั้นในช่วงความยาวคลื่นมาก จากสมการที่ (3.19) จะเขียนสมการที่ (3.20) ได้เป็น

$$2nd = m\lambda \quad (3.21)$$

เมื่อพิจารณาค่า  $T_{\max}$  2 ค่ามากที่สุด หรือ  $T_{\min}$  2 ค่าน้อยที่สุด ณ ตำแหน่งความยาวคลื่น  $\lambda_1$  และ  $\lambda_2$  โดยให้  $M$  คือจำนวนการแกว่งกวัดระหว่างค่ามากที่สุด 2 ค่า หรือค่าน้อยที่สุด 2 ค่า ซึ่งเขียนได้เป็น

$$M = m_1 - m_2 \quad (3.22)$$

จากสมการที่ (3.21) จะเขียนสมการที่ (3.22) ได้เป็น

$$M = 2nd \left| \frac{1}{\lambda_1} - \frac{1}{\lambda_2} \right| = \frac{2nd}{\lambda_1 \lambda_2} |\lambda_2 - \lambda_1| \quad (3.23)$$

ดังนั้นจากสเปกตรัมของการส่งผ่านแสง จะสามารถหาความหนาของฟิล์ม ได้จากสมการที่ (3.24) [17]

$$d = \frac{M\lambda_1\lambda_2}{2n|\lambda_2 - \lambda_1|} \quad (3.24)$$

ถ้าพิจารณายอดคลื่นที่อยู่ติดกัน ซึ่งค่า  $M = 1$  ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และเขียนสมการที่ (3.24) ได้เป็น

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2n|\lambda_1 - \lambda_2|} \quad (3.25)$$

ในงานวิจัยนี้ ค่าดัชนีหักเหของฟิล์มบาง ZnS มีค่าเท่ากับ 2.35 เมื่อนำฟิล์มไปวัดการส่งผ่านแสงและได้ผลสเปกตรัมของการส่งผ่าน จึงแทนค่าลงในสมการที่ (3.25) ซึ่งทำให้สามารถหาค่าความหนาของฟิล์มได้ หรือใช้การวัดความหนาด้วยเครื่อง Profilometer (Dektak<sup>3</sup>ST Surface Profiler)

### 3.3 สมบัติทางไฟฟ้า [10,18]

#### 1) สภาพต้านทานไฟฟ้า

เมื่อป้อนสนามไฟฟ้าเข้าไปในวัตถุยาว  $l$  มีพื้นที่ภาคตัดขวาง  $A$  จะเกิดความต่างศักย์ไฟฟ้า ซึ่งสัมพันธ์กับสนามไฟฟ้า ดังสมการที่ (3.26)

$$V = El \quad (3.26)$$

สำหรับความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าสามารถคำนวณได้จาก

$$J = \frac{I}{A} \quad (3.27)$$

จากกฎของโอห์ม  $I = \frac{V}{R}$  และความสัมพันธ์ของความหนาแน่นกระแสกับสนามไฟฟ้า

$J = \sigma E$  เทียบลงในสมการ (3.26) และ (3.27) จะได้ว่า

$$\sigma = \frac{I}{RA} \quad (3.28)$$



จากความสัมพันธ์ระหว่างสภาพนำไฟฟ้ากับสภาพต้านทานไฟฟ้า

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (3.29)$$

ดังนั้น สภาพต้านทานไฟฟ้าจะมีค่าเป็น

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (3.30)$$

## 2) การหาสภาพต้านทานไฟฟ้า

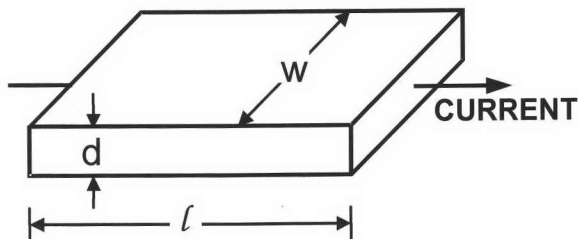
เมื่อพิจารณาฟิล์มมีขนาดยาว  $l$  กว้าง  $w$  และหนา  $d$  ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และจากสมการที่ (3.30) จะได้ว่า

$$R = \frac{\rho l}{A} = \frac{\rho l}{wd} \quad \Omega \quad (3.31)$$

เมื่อ  $l = w$  จึงสามารถเขียนสมการที่ (3.31) ได้ใหม่เป็น

$$R = R_s = \frac{\rho}{d} \quad \Omega/\square \quad (3.32)$$

โดย  $R_s$  คือ ความต้านทานแผ่น (Sheet Resistance)  
 $\rho$  คือ สภาพต้านทานไฟฟ้า

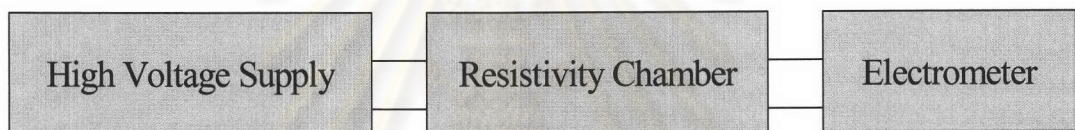


รูปที่ 3.7 แสดงการหาความต้านทานไฟฟ้าของฟิล์ม

ดังนั้นจะสามารถหาค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้ ถ้าทราบค่าความหนาและค่าความต้านทานแผ่น กล่าวคือ

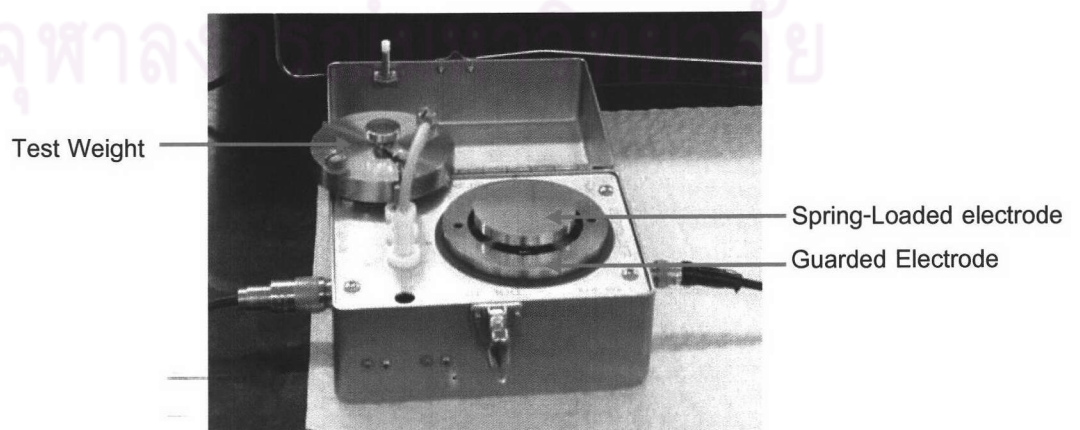
$$\rho = R_s d \quad \Omega\text{-cm} \quad (3.33)$$

ในงานวิจัยนี้ศึกษาค่าความต้านทานของฟิล์ม โดยใช้เครื่อง Resistivity Chamber ซึ่งประกอบเข้ากับเครื่องจ่ายความต่างศักย์สูง (High Voltage Supply, Keithley 247) และเครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (Electrometer, Keithley 617) [19] แสดงดังรูปที่ 3.8 ซึ่งเป็นวิธีการของ American Society for Testing and Materials (ASTM) โดยเครื่องมือนี้มีขีดความสามารถที่วัดค่าความต้านทานไฟฟ้าได้ในช่วง  $10^3$ - $10^{18} \Omega$



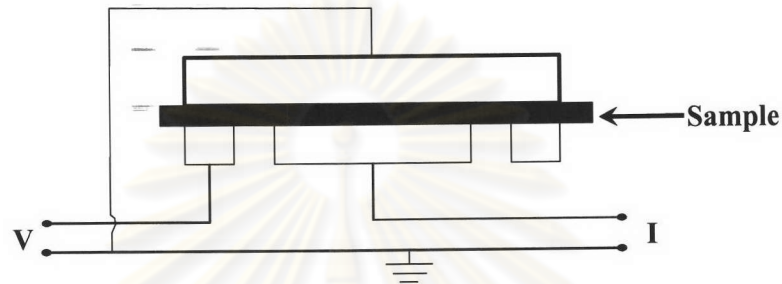
รูปที่ 3.8 แสดงส่วนประกอบของการวัดด้วยเครื่อง Resistivity Chamber

วัสดุที่ต้องการวัดจะอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้ารับที่มีแรงกดเป็นสปริง (Spring-Loaded) ขั้วไฟฟ้า (Guard Electrode) และชิ้นส่วนน้ำหนัก (Test Weight) ซึ่งเป็นส่วนประกอบทั้งหมดของ Resistivity Chamber แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยในการวางวัสดุที่ต้องการวัดนั้น ต้องแน่ใจว่าขั้วไฟฟ้าไม่สัมผัสสิ่งอื่นๆ ยกเว้นวัสดุชิ้น และต้องไม่มีเส้นทางนำไฟฟ้า (Conductive Paths) ระหว่างขั้วไฟฟ้าอื่นนอกจากที่วิ่งผ่านวัสดุ และห้ามสัมผัสวัสดุด้วยมือเปล่า เพื่อให้ได้ผลการวัดที่ดีที่สุด วัสดุที่ต้องการวัดควรมีผิวหน้าที่สะอาด



รูปที่ 3.9 แสดงส่วนประกอบของ Resistivity Chamber

เครื่อง Resistivity Chamber นี้จะใช้งานร่วมกับเครื่องจ่ายความต่างศักย์สูง โดยจะทำหน้าที่ให้ความต่างศักย์ผ่านวัสดุที่จะทำการวัดค่าความต้านทาน และวัดกระแสไฟฟ้าที่ผ่านวัสดุนั้นด้วยเครื่อง Electrometer โดยมีลักษณะการทำงาน แสดงดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการวัดค่าความต้านทานแผ่น

จากมาตรฐาน ASTM Designation D257 ความต้านทานแผ่นเป็นไปตามสมการที่ (3.34)

$$R_s = \frac{PV}{gI} = \frac{D_0\pi V}{gI} \quad (3.34)$$

โดย  $R_s$  คือ ความต้านทานแผ่นของวัสดุ

$P = D_0\pi$  คือ ค่าขอบเขตยังผล (Effective Perimeter) ของขั้วไฟฟ้า (Guard Electrode)

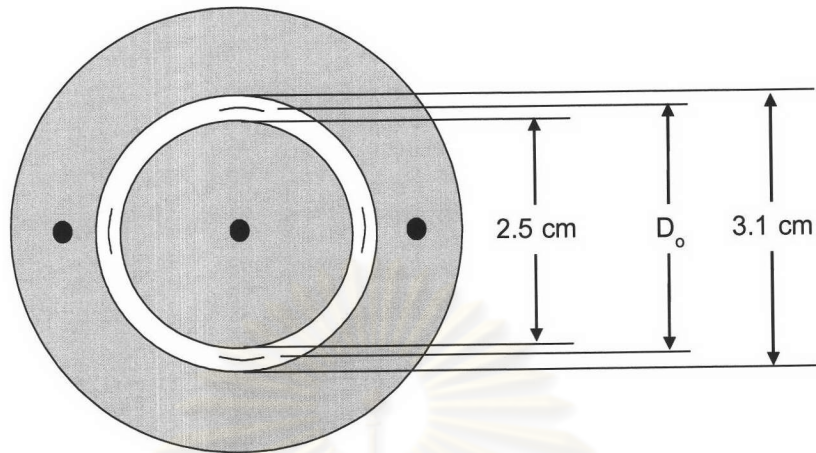
$D_0$  คือ ขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางรวมของขั้วไฟฟ้ากับระยะระหว่างขั้ว

$g$  คือ ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้า

$V$  คือ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับวัสดุ

$I$  คือ ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้

โดยขนาดของขั้วไฟฟ้าของ Resistivity Chamber แสดงดังรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 แสดงขนาดขั้วไฟฟ้าของ Resistivity Chamber

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ (3.34) จะได้สมการสำเร็จเป็น

$$R_s = \frac{29.32V}{I} \quad \Omega / \square \quad (3.35)$$

จากนั้นนำค่าความต่างศักย์ไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้จากเครื่อง Electrometer มาคำนวณเพื่อหาค่าความต้านทานได้จากสมการที่ (3.35)

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย