

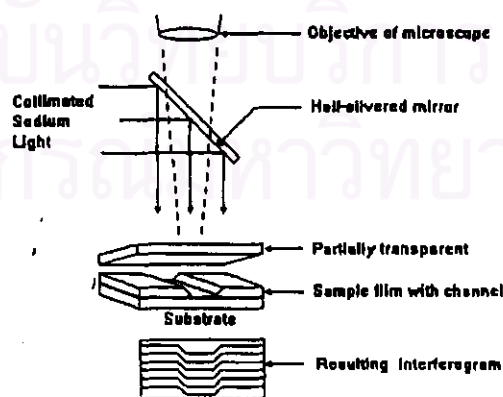
บทที่ 4

ทฤษฎีเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์ม

ในการวิเคราะห์สมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้จะนำมาวัดสมบัติต่างๆ คือ อัตราการเคลือบ สภาพผิวหน้า องค์ประกอบของธาตุ โครงสร้างผลึก สภาพต้านทานไฟฟ้า สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ ความหนาแน่นพาหะ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง และช่องว่างแถบพลังงาน

การวัดความหนาโดยเทคนิคโทลานสกี[36,37]

การวัดความหนาของฟิล์มบางโดยเทคนิคโทลานสกี(Tolansky technique) สามารถแสดงหลักการของวิธีนี้ ดังรูปที่ 4.1 เมื่อแสงโซเดียมตกกระทบที่กระจกสะท้อนแสง 50 เปอร์เซ็นต์ซึ่งวางเอียง 45 องศากับระนาบของฟิล์มแสงที่สะท้อนจากกระจกนี้จะตกกระทบลงที่ชุดของฟิล์มบางและแผ่น Fizeau plate ที่เป็นแผ่นเวสดูบางๆ ที่สามารถยอมให้แสงผ่านได้บางส่วนและมีการสะท้อนแสงดี วางทำมุมเล็กๆกับระนาบของฟิล์ม เมื่อมองผ่านกล้องจุลทรรศน์จะเห็นริ้วการแทรกสอดของแสงโซเดียมดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 การวัดความหนาของฟิล์มบางด้วยเทคนิคโทลานสกี

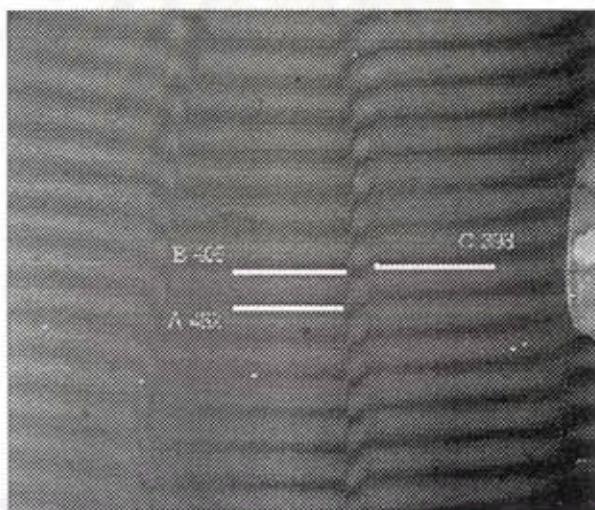
การคำนวณความหนาของฟิล์มจากรีฟการแทรกสอด กระทำได้โดยการอ่านขนาดการเลื่อมกันของรีฟแทรกสอดจากภาพที่ขยายโดยคอมพิวเตอร์ ทำให้สามารถคำนวณความหนาได้จากสมการที่ 4.1 [36,37] การวัดวิธีนี้จะให้ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าร้อยละ 12.5 ของความยาวคลื่นแสงโซเดียม

$$t = \Delta n \times \left(\frac{\lambda}{2}\right) \quad (4.1)$$

เมื่อ t คือ ความหนาของฟิล์มบาง มีหน่วยเป็นอังสตรอม

Δn คือ ขนาดการเลื่อมกันของรีฟการแทรกสอด

λ คือ ความยาวคลื่นแสงโซเดียมเท่ากับ 5890 อังสตรอม



รูปที่ 4.2 รีฟการแทรกสอดจากภาพที่ขยายโดยคอมพิวเตอร์

จากรูปที่ 4.2 รีฟการแทรกสอดจาก A ไปยัง B มีจำนวน 1 รีฟ ซึ่งสามารถเทียบกับระยะการเลื่อมกันของรีฟการแทรกสอดจาก A ไปยัง C เนื่องจากความหนาของฟิล์มบาง (Δn) คิดเป็น 1.14 เท่าของรีฟการแทรกสอดจาก A ไปยัง B และเมื่อแทนค่าในสมการที่ 4.1 จะได้ความหนาเป็น 3366 อังสตรอม ดังนั้นหากฟิล์มชั้นนี้ใช้เวลาสปีดเตอร์เคลือบ 45 นาที อัตราการเคลือบของฟิล์มจะเท่ากับ $3366/45 = 75$ อังสตรอมต่อนาที

การวัดสภาพต้านทานไฟฟ้า ความหนาแน่นพหะ และสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ ด้วยเทคนิคของ
แวนเดอร์พาว[38,39,40,48]

ในการวัดสภาพต้านทานไฟฟ้าด้วยเทคนิคของแวนเดอร์พาว สามารถที่จะใช้วัดสภาพต้านทานไฟฟ้า
โดยไม่จำเป็นต้องทราบลักษณะรูปแบบการกระจายของเส้นทางเดินของกระแสที่ไหลภายในแผ่นสาร
ความถูกต้องแม่นยำขึ้นกับเงื่อนไขต่อไปนี้

- 1) ขั้วสัมผัสจะต้องวางอยู่ที่ขอบของชิ้นสาร
- 2) ขนาดของขั้วสัมผัสต้องเล็กมากเมื่อเทียบกับเส้นรอบรูปของชิ้นสาร
- 3) สารตัวอย่างต้องมีความหนาแน่นเท่ากันตลอด
- 4) เนื้อสารตัวอย่างต้องไม่มีรูหรือรอยแยกใดๆ

พิจารณาชิ้นสารรูปร่างแบนแบนใดๆ แสดงดังรูปที่ 4.3 มีขั้วสัมผัสเล็กๆ 1,2,3,4 ที่กระจาย
อยู่ที่ขอบของแผ่น ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขตอนต้น



รูปที่ 4.3 สารตัวอย่างแผ่นแบนรูปทรงใดๆ

เมื่อป้อนกระแสไฟฟ้าเข้าและออกที่ขั้ว 1,2 และวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 3,4 จะได้
ความต้านทาน $R_{1,2,3,4}$ ดังสมการ

$$R_{12,34} = \frac{V_{34}}{I_{12}} \quad (4.2)$$

ทำนองเดียวกันกระแสไฟฟ้าเข้าและออกที่ขั้ว 2,3 และวัดความต่างศักย์ระหว่างขั้ว 4,1 จะได้ความต้านทาน $R_{23,41}$ ดังสมการ

$$R_{23,41} = \frac{V_{41}}{I_{23}} \quad (4.3)$$

ดังนั้นสามารถหาสภาพต้านทานไฟฟ้า(ρ)ได้จากสมการ (4.2)และ(4.3)จากความสัมพันธ์ต่อไปนี้[39]

$$\exp\left[-\frac{\pi R_{12,34} d}{\rho}\right] + \exp\left[-\frac{\pi R_{23,41} d}{\rho}\right] = 1 \quad (4.4)$$

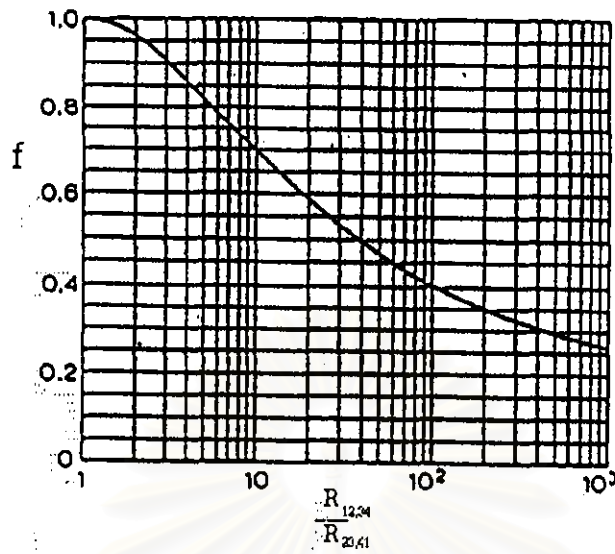
จากความรู้เรื่อง conformal mapping ของสนามไฟฟ้าในสองมิติ แวนเดอร์พาวได้พิสูจน์ว่าสมการที่ (4.4) ยังคงเป็นจริงสำหรับแผ่นสารรูปร่างใดๆ และหากทราบ d , $R_{12,34}$ และ $R_{23,41}$ สมการที่ 4.4 จะลดรูปลงเป็น[39]

$$\rho = \frac{\pi d}{\ln 2} \left[\frac{R_{12,34} + R_{23,41}}{2} \right] f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right) \quad (4.5)$$

เมื่อ d คือ ความหนาของชิ้นสารตัวอย่าง

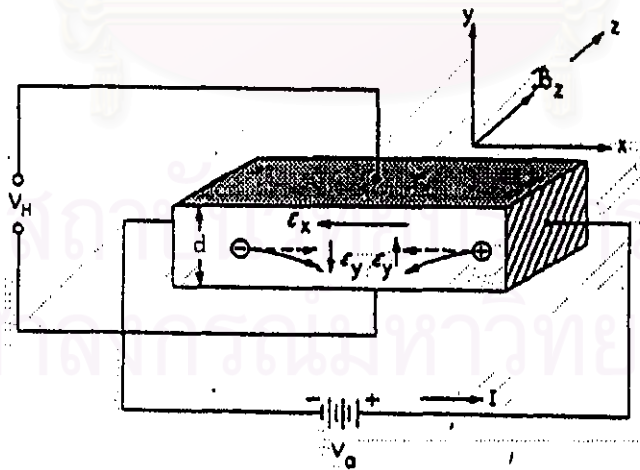
$f\left(\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}\right)$ คือ ค่าปรับแก้(correction factor)ขึ้นกับอัตราส่วนของ $\frac{R_{12,34}}{R_{23,41}}$

ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของค่าปรับแก้ F และค่า $R_{12,34}/R_{23,41}$ [48]

การวัดความหนาแน่นของพาหะและสภาพเคลื่อนที่ได้ สามารถกระทำได้โดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์ [40] แสดงดังรูปที่ 5.5 เริ่มจากการใส่สนามไฟฟ้า E_x ในแนวแกน x มีกระแสไฟฟ้า (current density, J_x) ไหลในแนวแกน x และมีสนามแม่เหล็ก B_z ในแนวแกน z



รูปที่ 4.5 การวัดความหนาแน่นพาหะโดยอาศัยปรากฏการณ์ฮอลล์

พิจารณาในกรณีที่สารตัวอย่างมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นชนิดพี(p-type) แรงลอเรนซ์ที่เกิดขึ้นจะเท่ากับ $qv_x B_z$ มีทิศในแนวแกน -y กระทำบนโฮลแล้ว ทำให้โฮลวิ่งลงมารวมกันอยู่ข้างล่างเกิดสนามไฟฟ้า E_y ในแนวแกน +y เมื่อเกิดความสมดุลจะไม่มีการเคลื่อนที่ในแนวแกน y คือแรงเนื่องจากสนามไฟฟ้า E_y จะเท่ากับแรงลอเรนซ์ $qv_x B_z$ ดังสมการ

$$F_y = qE_y - qv_x B_z = 0 \quad (4.6)$$

จะได้

$$E_y = v_x B_z \quad (4.7)$$

เรียกปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นใหม่ในแนวแกน y ที่มีทิศตั้งฉากกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลในแนวแกน x และทิศของสนามแม่เหล็กในแนวแกน Z ว่าปรากฏการณ์ฮอลล์(Hall effect) และเรียกสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแกน y ว่าสนามฮอลล์(Hall field) ซึ่งสามารถวัดได้จากภายนอกดังนี้[40]

$$E_y = \frac{v_y}{d} = R_H J_x B_z \quad (4.8)$$

โดย $J_x = \sigma E_x$

R_H คือสัมประสิทธิ์ของฮอลล์(Hall coefficient)

d คือความหนาของสารตัวอย่างในแนวแกน y

$$R_H = \frac{r}{q} \frac{p-b^2n}{(p+bn)^2} \quad (4.9)$$

$$\text{เมื่อ } b = \frac{\mu_n}{\mu_p}$$

$$r = \frac{\langle \tau^2 \rangle}{\langle \tau \rangle^2}$$

τ คือเวลาเฉลี่ยการปลดการชนระหว่างพาหะ(mean free time)โดยจะขึ้นกับพลังงานของพาหะ[40]

$$\tau = aE^{-s} \quad (4.10)$$

เมื่อ a และ s เป็นค่าคงที่

ในกรณีพาหะมีพลังงานเท่ากันแบบผิวทรงกลม(spherical energy surface)

$$\tau \sim E^{-\frac{1}{2}} \quad \text{สำหรับ phonon scattering}$$

$$\tau \sim E^{\frac{3}{2}} \quad \text{สำหรับ ionized impurity scattering}$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่อยู่ในสภาวะ non-degenerate[40]

$$\langle \tau^m \rangle = \frac{\int_0^\infty \tau^m E^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE}{\int_0^\infty E^{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{E}{kT}\right) dE} \quad (4.11)$$

จากสมการ (4.10) และ (4.11) จะได้ว่า

$$\langle \tau^2 \rangle = \frac{a^2 (kT)^{-2s} \Gamma\left(\frac{5}{2} - 2s\right)}{\Gamma\left(\frac{5}{2}\right)} \quad (4.12)$$

$$\langle \tau \rangle^2 = \left[\frac{a(kT)^{-s} \Gamma\left(\frac{s}{2}-s\right)}{\Gamma\left(\frac{s}{2}\right)} \right]^2 \quad (4.13)$$

โดยที่ $\Gamma(n) = \int_0^\infty x^{n-1} \exp(-x) dx$, $\Gamma\left(\frac{1}{2}\right) = \sqrt{\pi}$

ดังนั้นจากสมการที่ 4.12 และ 4.13 จะได้

$$r = \langle \tau^2 \rangle / \langle \tau \rangle^2 = 3\pi/8 = 1.18 \quad \text{สำหรับ Phonon scattering}$$

$$r = 315\pi/512 = 1.93 \quad \text{สำหรับ ionized impurity scattering}$$

สภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์ (μ_H) สามารถนิยามได้ดังนี้ [40]

$$\mu_H = |R_H \sigma| \quad (4.14)$$

จากสมการที่ 4.9 จะได้ว่า

$$\text{กรณี n-type } (n \gg p) \quad R_H = r(1/nq) \quad (4.15)$$

$$\text{p-type } (p \gg n) \quad R_H = r(1/pq) \quad (4.16)$$

สมการที่ 4.14-4.16 แสดงให้เห็นว่า ปริมาณความเข้มข้นและชนิดของพาหะสามารถหาได้จาก การวัดในระบบฮอลล์

จากเทคนิคความถี่พาวเวอร์พาวเวอร์การวัดภายใต้สนามแม่เหล็กความเข้ม B กระทำในทิศทางตั้งฉากกับ ระนาบแผ่นสารตัวอย่าง จ่ายกระแสเข้าในแนวทะแยงมุมข้อ 1,3 วัดความต่างศักย์จากข้อ 2,4 และ นิยาม $R_{1,2,4}$ ดังสมการ [38]

$$R_{13,24} = \frac{V_{24}}{I_{13}} \quad (4.17)$$

สัมประสิทธิ์ของฮอลล์จากเทคนิคของแวนเดอร์พาวนิยามโดย[38]

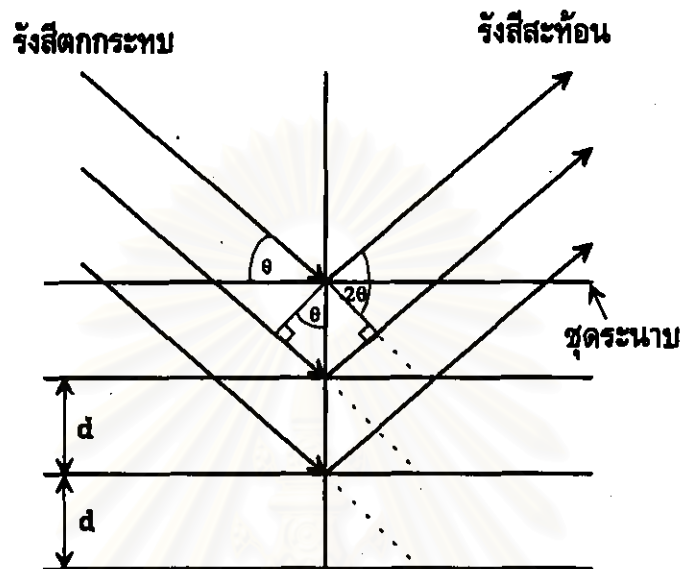
$$R_H = \frac{d}{B} \Delta R_{13,24} \quad (4.18)$$

เมื่อ $\Delta R_{13,24}$ ผลต่างระหว่างค่า $R_{13,24}$ ขณะที่มีสนามแม่เหล็กและไม่มีสนามแม่เหล็ก ดังนั้นสภาพเคลื่อนที่ได้ของฮอลล์คำนวณได้โดย

$$\mu = \frac{R_H}{\rho} = \frac{d}{B\rho} \Delta R_{13,24} \quad (4.18)$$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของฟิล์มโดยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์(X-ray Diffractiometry)[41]



รูปที่ 4.6 การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากระนาบภายในผลึกตามเงื่อนไขของแบรกก์

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความสามารถทะลุผ่านตัวกลางได้ดี ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการวิเคราะห์หาโครงสร้างผลึกควรมีค่าอยู่ในช่วง 0.5 ถึง 3 อังสตรอม ซึ่งเป็นช่วงที่น้อยกว่าระยะระหว่างระนาบที่ขนานกันของโครงสร้างผลึก เมื่อรังสีเอ็กซ์ตกกระทบอะตอมซึ่งจัดเรียงตัวอยู่บนระนาบของโครงสร้างผลึกทำมุม θ จะเกิดการเลี้ยวเบนสะท้อนออกจากโครงสร้างผลึก ทำให้เกิดริ้วแทรกสอดแบบเสริมและหักล้าง การเลี้ยวเบนที่ทำให้เกิดริ้วแทรกสอดแบบเสริมกันมากที่สุดเกิดจากการที่รังสีเอ็กซ์กระเจิงออกจากระนาบโครงสร้างผลึกของแต่ละระนาบห่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะสอดคล้องกับกฎของแบรกก์(Bragg's law)ดังสมการ[41]

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin\theta \quad (4.19)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์

d_{hkl} คือ ระยะระหว่างระนาบที่ขนานกัน

θ คือ มุมที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบลงบนระนาบเรียกว่า มุมของแบรกก์
(Bragg angle)

n คือ จำนวนเต็มมีค่า 1,2,3, ...

โดยการแทรกสอดจะสังเกตได้จากความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่ถูกบันทึกลงบนกระดาษกราฟที่มุมเลี้ยวเบน(มุมระหว่างแนวรังสีสะท้อนกระทำกับระนาบของแนวรังสีตกกระทบ, 2θ)ต่างๆ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกจำเป็นต้องอาศัยความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีมิลเลอร์ และระยะห่างระหว่างระนาบที่ขนานกัน เพื่อหาค่าคงที่ผลึก สำหรับธาตุหรือสารชนิดเดียวกันจะมีการแทรกสอดสูงสุดที่มุมเบี่ยงเบนเดียวกัน และยังสามารถทำนายระนาบที่เกิดขึ้นที่มุมเบี่ยงเบนนี้ได้อีกด้วย[41]

ระนาบต่างๆจะถูกกำหนดโดยดัชนีมิลเลอร์(miller indices) สามารถเขียนเป็นสัญลักษณ์แทนระนาบแต่ละชุดคือ (hkl) ซึ่ง h,k และ l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่าตั้งแต่ 0,1,2, ... ดัชนีระนาบแบบนี้ เป็นดัชนีระนาบในระบบลูกบาศก์(cubic system) สำหรับดัชนีระนาบอีกแบบหนึ่งคือ ดัชนีระนาบในระบบเฮกซะโกนอล(Hexagonal system) เขียนแทนด้วย (hkil) ซึ่ง h,k และ l เป็นเลขจำนวนเต็มมีค่า 0,1,2, ... และ $h+k=-i$ เรียกดัชนีในระบบนี้ว่า ดัชนีมิลเลอร์-บราเว การเรียกชื่อระนาบในระบบนี้อาจระบุเพียง (hkl)

เราสามารถเขียนความสัมพันธ์ระหว่าง ค่าดัชนีมิลเลอร์ ค่าคงที่ผลึก(a,b,c, α, β, γ) และระยะห่างระหว่างระนาบสำหรับซิงค์ออกไซด์ที่มีโครงสร้างแบบ Wurtzite structure โครงผลึกประกอบด้วย 2 hexagonal closed-pack ซ้อนกัน ชุดแรกจะจับกันโดย cation(Zn) และชุดที่สองจะจับกันโดย anion(O) แสดงดังรูปที่ 4.6 ซึ่งมี $a = b \neq c, \alpha = \beta = 120^\circ, \gamma = 90^\circ$ ได้ดังนี้[41]

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.20)$$

จากสมการที่ 4.19 เมื่อ $n=1$ แทนในสมการที่ 4.20 จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ผลึก (a,c)

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{4}{3} \left(\frac{h^2 + hk + k^2}{a^2} \right) + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.21)$$

จากสมการที่ 4.21 สามารถใช้วิธีกำลังสองน้อยที่สุด(least square method) คำนวณหา
ค่าคงที่ผลึก(a,c) โดยอาศัยค่ามุมแบรกก์(θ)ที่ระนาบ (hkl) ต่างๆที่ปรากฏ เขียนได้ดังสมการ

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\sum_i (l_i^2)^2 \sum_i \frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) D_i - \sum_i \frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) l_i^2 \sum_i l_i^2 D_i}{\sum_i \left(\frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) \right)^2 \sum_i (l_i^2)^2 - \left(\sum_i \frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) l_i^2 \right)^2} \quad (4.22)$$

$$\frac{1}{c^2} = \frac{\sum_i \frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2)^2 \sum_i (l_i^2) D_i - \sum_i \frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) l_i^2 \sum_i \frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) D_i}{\sum_i \left(\frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) \right)^2 \sum_i (l_i^2)^2 - \left(\sum_i \frac{4}{3} (h_i^2 + h_i k_i + k_i^2) (l_i^2) \right)^2} \quad (4.23)$$

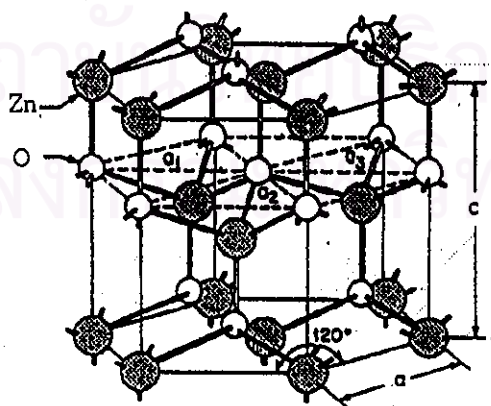
เมื่อ $D_i = \frac{4 \sin^2 \theta_i}{\lambda}$

สำหรับซิงโครตรอน ความยาวคลื่นรังสีเอ็กซ์ที่ใช้(Cu-K $_{\alpha}$)มีค่าเท่ากับ 1.5405 อังสตรอม เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4.1 แทนในสมการที่ 4.22-4.23 จะได้ค่าคงที่ผลึก a = 3.253 , c = 5.213 และ c/a = 1.602

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

d (Å)	hkl	d (Å)	hkl
2.8160	71	1.0422	100
2.6020	56	1.0158	'002
2.4760	100	0.9848	101
1.9110	29	0.9764	102
1.6260	40	0.9555	110
1.4770	35	0.9382	103
1.4070	6	0.9088	200
1.3790	28	0.8826	112
1.3590	14	0.8675	201
1.3010	3	0.8369	'004
1.2380	5	0.8290	202
1.1812	3	0.8237	104
1.0929	10	0.8125	203
1.0639	4		210

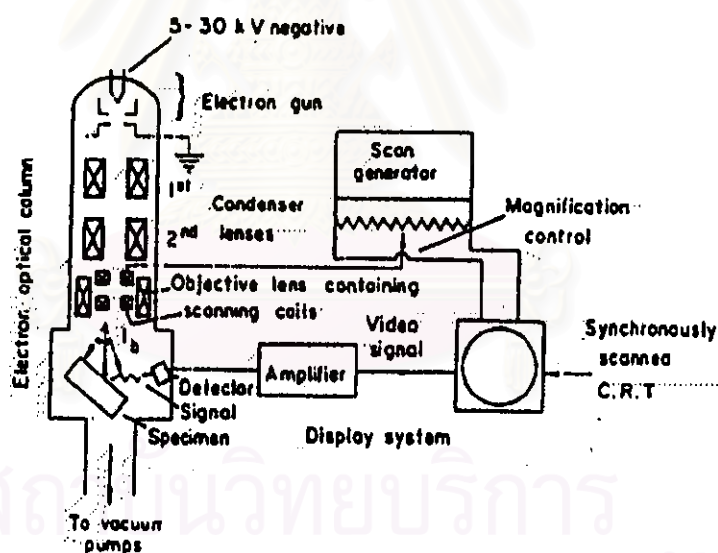
ตารางที่ 4.1 ตำแหน่งที่สัมพันธ์กับค่ามุมแบรกก์ของโครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite ของ ZnO [49]



รูปที่ 4.7 โครงสร้างผลึกของซิงค์ออกไซด์

การตรวจสอบสภาพพื้นผิวและองค์ประกอบของฟิล์ม[42]

การตรวจสอบสภาพพื้นผิวของฟิล์มจำเป็นต้องอาศัยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope,SEM)ช่วยในการมองเห็น หลักการทำงานแสดงในรูปที่ 4.7 คือ อิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิด(electron gun)ผ่านเลนส์รวมลำอิเล็กตรอนและเลนส์ใกล้วัตถุที่เป็นระบบแม่เหล็กไฟฟ้า ลำอิเล็กตรอนขนาดเล็กจะถูกบังคับให้ส่องกวาดไปมาบนพื้นที่แคบๆของสารตัวอย่าง ทำให้เกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งจะถูกรวบรวมและแปลงสัญญาณให้เป็นภาพบนจอรับภาพ นอกจากนี้สารตัวอย่างยังมีการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ เมื่อทำการวิเคราะห์การกระจายพลังงานของรังสีเอ็กซ์ (Energy Dispersive X-ray Analysis,EDXS)ก็จะทำให้ทราบองค์ประกอบของสารตัวอย่างได้



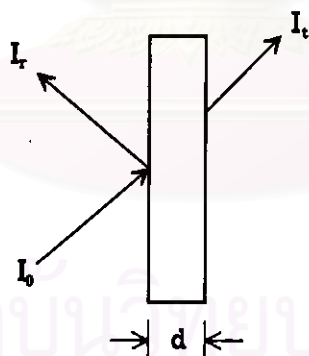
รูปที่ 4.8 การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน[42]

การคำนวณสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง และช่องว่างแถบพลังงาน จากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง[43,44]

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสามารถคำนวณได้โดยตรงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง พิจารณาแสงตกกระทบสารตัวอย่างในแนวตั้งฉาก แสดงดังรูปที่ 4.8 ให้ความเข้มของแสงที่ตกกระทบเป็น I_0 ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านเป็น I_t และความเข้มของแสงสะท้อนที่สะท้อนกลับเป็น I_r ความเข้มแสงที่ทะลุผ่านและสะท้อนกลับ สามารถเขียนในรูปของสัมประสิทธิ์การส่งผ่าน(Transmission,T) และสัมประสิทธิ์การสะท้อน(Reflection,R)ตามลำดับ ดังสมการ[43]

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2 \exp(-\alpha d)}{1+(R^2 \exp(-2\alpha d))} \quad (4.24)$$

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2} \quad (4.25)$$



รูปที่ 4.9 การส่งผ่านแสงและการสะท้อน

เมื่อความหนาของสารตัวอย่าง (d) ที่พอเหมาะจะทำให้ปริมาณ $R^2 \exp(-2\alpha d)$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก สมการที่ 4.24 จึงลดรูปเหลือ

$$T = (1-R)^2 \exp(-\alpha d) \quad (4.26)$$

การเปลี่ยนแปลงพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบบนเนื้อสารจะมีผลต่อสัมประสิทธิ์การสะท้อนน้อยมาก ซึ่งสามารถประมาณ $(1-R)^2$ เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจากสมการที่ 4.26 สามารถเขียนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_0}{I_t}\right) = \alpha' + C \quad (4.27)$$

เมื่อ C คือ ค่าคงที่ เกิดจากการประมาณให้สัมประสิทธิ์การสะท้อนคงที่ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงกว่าความเป็นจริง ในการทดลองจะต้องนำสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพื้นหลัง(background absorption coefficient, α_0) ที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่อง มาลบออกจากค่า α เพื่อให้ได้ค่าที่ถูกต้อง

ปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ เป็นอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำ นิยามให้ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง คือปริมาณความเข้มแสงที่ลดลงต่อหน่วยระยะทาง ดังสมการ

$$\alpha = -(1/I) dI/dx \quad (4.28)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x ใดๆ ในตัวกลาง
พิจารณากรณีแสงเอกรงค์(monochromatic light)เคลื่อนที่ผ่านตัวกลางที่มี แกนโพลาริเซชันแบบระนาบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนได้เป็น[43]

$$E = E_0 \exp[i(K \cdot r - \omega t)] \quad (4.29)$$

$$H = H_0 \exp[i(K \cdot r - \omega t)] \quad (4.30)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้ามีอัมปลิจูด E_0

H คือ สนามแม่เหล็กมีอัมปลิจูด H_0

ω คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency)

t คือ เวลา

K คือ เวกเตอร์คลื่น (wave vector) มีทิศทางตั้งฉากกับ E กับ H เขียนได้เป็น

$K = K_1 + jK_2$ ซึ่ง K_1 และ K_2 คือ เวกเตอร์จริง (real part) และเวกเตอร์

จินตภาพ (imaginary part) ตามลำดับ

สมการที่ 4.29 และ 4.30 จะเป็นผลเฉลยของสมการของแมกซ์เวลล์ ค่าสภาพซึมได้ทางแม่เหล็ก (magnetic permeability) $\mu = 1$ ถ้า

$$K * K = \mu_0 \epsilon_0 \epsilon \omega^2 = \frac{\epsilon \omega^2}{c^2} \quad (4.31)$$

เมื่อ ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (complex dielectric constant)

สำหรับตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นปริมาณเชิงซ้อน คือ

$$N = n + ik \quad (4.32)$$

n = ค่าจริงของดัชนีหักเหของตัวกลาง

k = ค่าจินตภาพ หรือ สัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงชัน (extinction coefficient) ของ

ดัชนีหักเหของตัวกลางสำหรับระนาบคลื่นเอกพันธ์จะได้

$$|K_1| = \frac{n\omega}{c} \quad (4.33)$$

$$|K_2| = \frac{k\omega}{c} \quad (4.34)$$

เมื่อ c = ความเร็วแสง

สำหรับการส่งผ่านพลังงานต่อหน่วยเวลา[43] คือ

$$\bar{S} = \frac{nc\epsilon_0}{2}(\mathbf{E}^* \mathbf{E})\mathbf{k}_E \quad (4.35)$$

เมื่อ \mathbf{k}_E คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ K_1 และ K_2

แทนสมการที่ 4.29 ลงในสมการที่ 4.35 จะได้

$$\bar{S} = \frac{nc\epsilon_0}{2}(\mathbf{E}_0^* \mathbf{E}_0)\mathbf{k}_E \exp(-2K_2 r) \quad (4.36)$$

จะเห็นว่า การส่งผ่านพลังงานเฉลี่ยต่อเวลาลดลงด้วยแฟกเตอร์ $\exp(-2K_2 r)$ ตลอดระยะทาง d ซึ่ง $I \propto \bar{S}$ ดังนั้นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลาง คือ

$$\alpha = 2|K_2| = \frac{2k\omega}{c} = \frac{4\pi k}{\lambda} \quad (4.37)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นแสงในสุญญากาศ

จากสมการที่ 4.37 จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลางขึ้นกับความยาวคลื่นและสัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงชัน ที่ความถี่แสงเดียวกันในตัวกลางต่างชนิดกัน การดูดกลืนแสงก็จะต่างกัน การดูดกลืนแสงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางแต่ละชนิด

การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้โดยทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง สำหรับกรณีนี้ที่แถบพลังงานเป็นรูปพาราโบลาอย่างง่าย (simple parabolic band) แสดงดังรูปที่ 4.9 การดูดกลืนแสง

ทำให้เกิดการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ ในกรณีของซิงค์ออกไซด์ อิเล็กตรอนจะเปลี่ยนสถานะจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ในแนวตั้งไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ เรียกการย้ายสถานะแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง(direct transition) ซึ่งยังสามารถแบ่งออกเป็น การย้ายสถานะพลังงานชนิดยอมรับได้(allowed transition) และการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม(forbidden transition) ขึ้นกับค่าออปติคัลแมทริกซ์ ออพลิเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งแรกว่าเป็นศูนย์หรือไม่ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง สามารถเขียนสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องมาจากการย้ายสถานะแบบตรงได้ดังนี้คือ[44]

ชนิดยอมรับได้

$$\alpha(\text{cm}^{-1}) = \frac{A}{h\nu} (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (4.38)$$

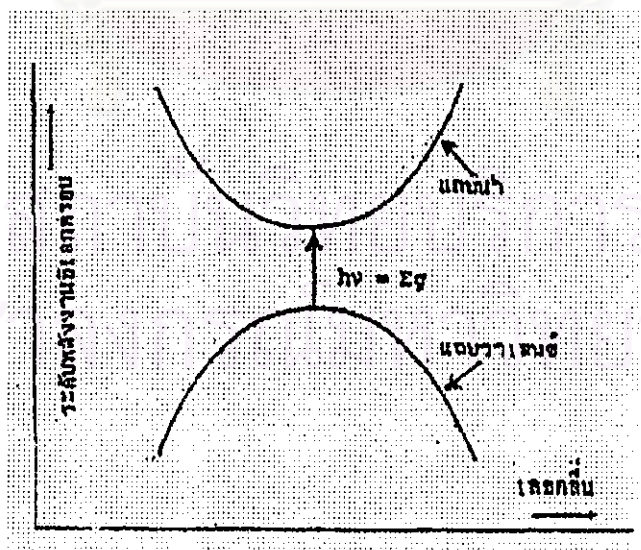
ชนิดต้องห้าม

$$\alpha(\text{cm}^{-1}) = \frac{B}{h\nu} (h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (4.39)$$

เมื่อ A คือ ค่าคงที่ มีหน่วยเป็น ($\text{eV}^{1/2} \cdot \text{cm}^{-1}$)

B คือ ค่าคงที่ มีหน่วยเป็น ($\text{eV}^{3/2} \cdot \text{cm}^{-1}$)

$h\nu$ คือ พลังงานของแสง E_g คือ ช่องว่างแถบความนำ มีหน่วยเป็น (eV)



รูปที่ 4.10 การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง