บทที่ 4

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (optical properties) ของสารกึ่งตัวนำ ทำให้รู้ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ และจากการศึกษานี้ประกอบกับทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง (band theory of solids) ทำให้อธิบายสมบัติเชิงไฟฟ้า (electrical properties) ของสารกึ่งตัวนำได้ ตลอดจนสามารถทำนายถึงความเป็นไปได้ของอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่ประดิษฐ์ขึ้นจากสารกึ่งตัวนำนั้น

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกียวข้องกับการย้ายสถานะพลังงาน (interband transitions) ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำและการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีค่าพลังงานใกล้เคียงกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน เพื่อใช้หาขนาดของช่องว่างและลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

ทฤษฎีการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ (theory of optical absorbtion)

ในระดับมหภาค (macroscopic) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) คือสัดส่วนของความเข้มแสงที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของตัวกลาง [13] ดังสมการ

$$\alpha = -(1/I)\, dI/dx \qquad (4.1)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง x ใดๆ ในตัวกลาง

สำหรับปรากฏการณ์การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นอันตรกิริยาระหว่างคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับสารกึ่งตัวนำโดยตรง โดยทั่วไปในการศึกษาเราใช้แสงเอกรงค์ (monochromatic light) และกรณีที่คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ามีโพลาไรเซชันเป็นแบบระนาบ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กสามารถเขียนอยู่ในรูปของ [14]

$$E = E_0 \exp\{i(\mathbf{k}.\mathbf{r} - \omega t)\} \quad (4.2)$$

$$H = H_0 \exp\{i(\mathbf{k}.\mathbf{r} - \omega t)\} \quad (4.3)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า (electric field) มีอัมปลิจูด $|E_0|$

H คือ สนามแม่เหล็ก (magnetic field) มีอัมปลิจูด $|H_0|$

k คือ เวกเตอร์คลื่น (wave vector) มีทิศทางตั้งฉากกับ E และ H

ω คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency)

t คือ เวลา

และเวกเตอร์คลื่น k คือ เวกเตอร์เชิงซ้อน (complex vector) เขียนได้เป็น $k = k_1 + ik_2$ โดยที่ k_1 และ k_2 คือ เวกเตอร์จริง (real part) และเวกเตอร์จินตภาพ (imaginary part) ตามลำดับ

สมการที่ (4.2) และ (4.3) จะเป็นผลเฉลยจากสมการของแมกซ์เวลล์สำหรับตัวกลางที่มีค่าสภาพซึมได้ของแม่เหล็ก (magnetic permeability) $\mu = 1$ ถ้า

$$\mathbf{k}\cdot\mathbf{k} = \mu_0\varepsilon_0\varepsilon\omega^2 = \frac{\varepsilon\omega^2}{c^2} \quad (4.4)$$

โดย ε คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกเชิงซ้อน (complex dielectric constant)

สำหรับคลื่นที่ผ่านตัวกลางที่มีดัชนีหักเหเป็นปริมาณเชิงซ้อน คือ $N = n + iK$

$$|k_1| = n\omega/c \quad (4.4)$$

$$|k_2| = K\omega/c \quad (4.5)$$

เมื่อ c คือ ความเร็วแสง

n คือ จำนวนจริงของดัชนีหักเหของตัวกลาง

K คือ จำนวนจินตภาพ หรือ สัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงค์ชัน (extinction coefficient) ของดัชนีหักเหของตัวกลาง

ในกรณีนี้การส่งผ่านพลังงานเฉลี่ยต่อเวลา (time - average energy flow) คือ

$$\bar{S} = \frac{nc\varepsilon_0}{2}(E^* \cdot E)k_E \qquad (4.6)$$

โดย k_E คือ เวกเตอร์หนึ่งหน่วยของ k_1 และ k_2

ถ้าพิจารณาโดยแทนสมการที่ (4.2) ลงใน (4.6) จะได้

$$\bar{S} = \frac{nc\varepsilon_0}{2}(E_0^* \cdot E_0)k_E e^{-2k_2 \cdot r} \qquad (4.7)$$

จากสมการที่ (4.7) จะพบว่าค่าการส่งผ่านพลังงานเฉลี่ยจะลดลงด้วยแฟคเตอร์ $e^{-2|k_2|d}$ ตลอดระยะทาง d ซึ่งการส่งผ่านพลังงานเฉลี่ยต่อเวลาแปรผันตรงกับความเข้มแสง ดังนั้นจากสมการ (4.1) กับ (4.7) ได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนของตัวกลางคือ

$$\alpha = 2|k_2| = 2K\omega/c = 4\pi K/\lambda \qquad (4.8)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

ในสมการที่ (4.8) จะเห็นว่าค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและจำนวนจินตภาพของดัชนีหักเหของตัวกลาง เมื่อฉายแสงเข้าไปในตัวกลางความเข้มแสงที่ผ่านเข้าไปในตัวกลางดังกล่าวจะลดลงเนื่องจากแสงถูกดูดกลืนโดยตัวกลาง โดยที่ความถี่ของแสงค่าเดียวกันในตัวกลางแต่ละชนิดจะดูดกลืนแสงได้ต่างกัน เพราะการดูดกลืนแสงเป็นสมบัติเฉพาะตัวของสารกึ่งตัวนำ

การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง พลังงานแสงที่สูญหายไปในขบวนการดูดกลืนแสงนั้นถูกนำไปใช้ในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ ซึ่งการดูดกลืนแสงนี้จะขึ้นอยู่กับโอกาสในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน หรือจำนวนครั้งในการย้ายสถานะพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนี้จะขึ้นอยู่กับโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ถ้าโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงจะเรียกการย้ายสถานะ

พลังงานของอิเล็กตรอนในโครงสร้างแบบนี้ว่า **การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง** (direct transition) โดยยังสามารถแบ่งต่อได้อีกเป็น **การย้ายสถานะพลังงานชนิดยอมรับได้** (allowed transition) และ**การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม** (forbidden transition) ขึ้นอยู่กับค่า ออฟติคอลเมตริก อิลิเมนต์ (optical matrix element) ว่าค่าเป็นศูนย์หรือไม่ ในการประมาณครั้งที่หนึ่ง (first approximation) ตามลำดับ

สำหรับแถบพลังงานที่เป็นรูปพาราโบลิคอย่างง่าย (simple parabolic band) มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานในแบบตรง [13] ดังนี้คือ

ชนิดยอมรับได้ $$\alpha\ (cm^{-1}) = \frac{A}{h\upsilon}(h\upsilon - Eg)^{1/2} \qquad (4.9)$$

ชนิดต้องห้าม $$\alpha\ (cm^{-1}) = \frac{B}{h\upsilon}(h\upsilon - Eg)^{3/2} \qquad (4.10)$$

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

B คือ ค่าคงที่ มีหน่วยเป็น $(eV.^{-1/2}cm^{-1})$

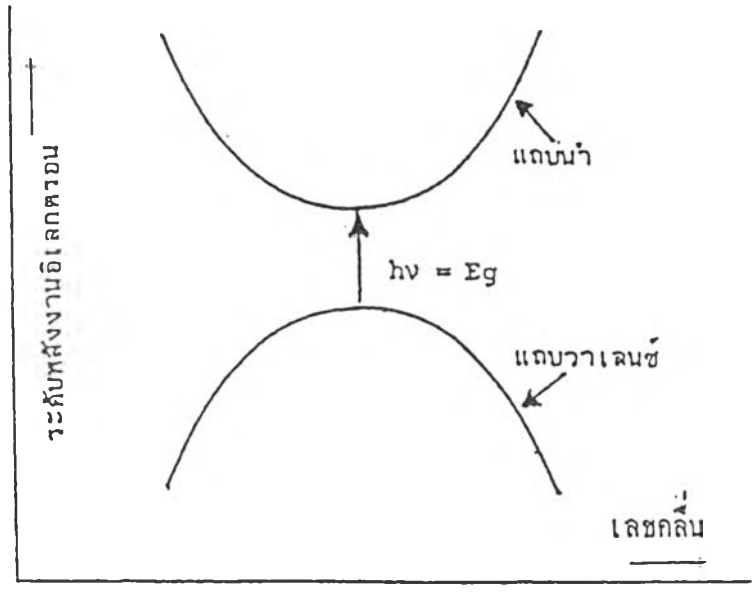
$h\upsilon$ คือ พลังงานของแสง และ Eg คือ ช่องว่างแถบพลังงาน มีหน่วยเป็น (eV.)

ในกรณีโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียงคือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับจุดต่ำสุดของแถบนำอยู่ที่เวกเตอร์คลื่น (k) ต่างกัน จะเรียกว่า **การย้ายสถานะพลังงานแบบเฉียง** (indirect transition) เป็นขบวนการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนแบบตรงที่รวมกับการดูดกลืนหรือการปลดปล่อยโฟนอน (phonon) ดังสมการ

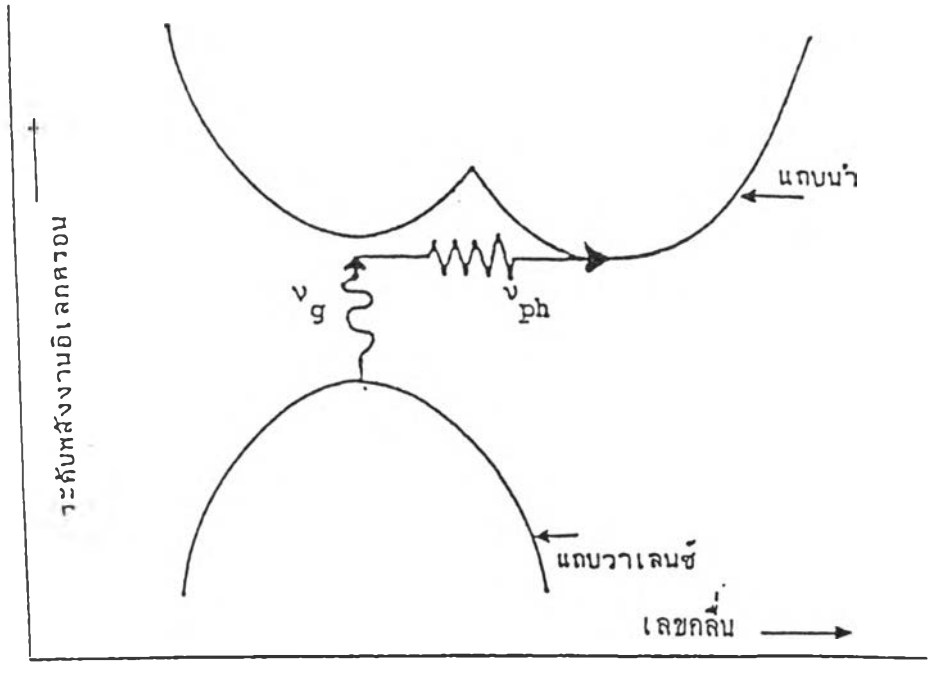
$$\alpha_i = C\left[\frac{(h\upsilon - Eg + h\omega_q)^2}{\exp (h\omega_q / kT) - 1} + \frac{(h\upsilon - Eg - h\omega_q)^2}{1 - \exp (- h\omega_q / kT)}\right] \qquad (4.11)$$

โดย $h\omega_q$ คือ พลังงานของโฟนอน

C คือ ค่าคงที่ มีหน่วยเป็น $(eV.^{-2}\ cm^{-1})$



รูปที่ 4.1 การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง



รูปที่ 4.2 การย้ายสถานะพลังงานแบบเฉียง

การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง [14]

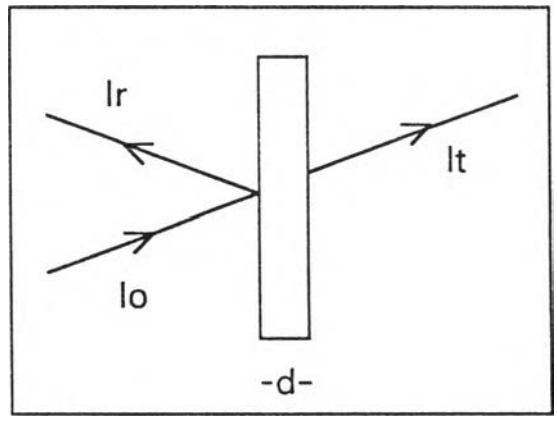
เมื่อมีพลังงานโฟตอนตกกระทบสารตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ถ้าให้ความเข้มของแสงตกกระทบเป็น I_0 , ความเข้มของแสงที่ทะลุผ่านเป็น I_t และความเข้มแของแสงที่สะท้อนออกมาเป็น I_r เมื่อพิจารณาในกรณีที่แสงตกกระทบในแนวตั้งฉากกับสารตัวอย่าง เราจะได้ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงดังกล่าวในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (Reflection coefficient, R) และความสามารถในการส่งผ่าน (Transmission , T) ดังสมการ

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \qquad (4.13)$$

$$T = \frac{I_t}{I_0} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1+R^2 e^{-2\alpha d}} \qquad (4.14)$$

เมื่อความหนาของสารตัวอย่าง (d) มีค่าเหมาะสมที่ทำให้ปริมาณ $R^2 e^{-2\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 สมการที่ (4.14) จะกลายเป็น

$$\frac{I_t}{I_0} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \qquad (4.15)$$



รูปที่ 4.3 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

แต่โดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานโฟตอนที่มาตกกระทบ (R ~ 0.25 ในบริเวณที่แสงมีพลังงาน 1 eV.) ดังนั้นเราจะประมาณว่าเทอม $(1-R^2)$ มีค่าคงที่ และได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความสามารถในการส่งผ่าน ดังสมการ

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{I_o}{I_t}\right) = \alpha' + \text{ค่าคงที่} \qquad (4.16)$$

และค่าคงที่ในสมการที่ (4.16) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนซึ่งเราไม่ได้พิจารณาในตอนต้นทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงเกินกว่าที่เป็นจริง แต่ในการทดลองจะต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (background absorbtion coefficient, α_0) ที่เกิดขึ้นจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่ถูกต้อง