บทที่ 3

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำสามารถทำได้หลายวิธี ส่วนใหญ่จะใช้สมบัติเชิงแสงของสาร เช่นการดูดกลืนแสง (optical absorption), การสะท้อนแสง (reflection) และสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง (photoconductivity) เป็นต้น ข้อมูลที่ได้สามารถให้รายละเอียดของโครงสร้างแถบพลังงานได้ดี และมักได้รับการอ้างอิงอยู่เสมอ ในบทนี้จะกล่าวถึงสมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ และวิธีการศึกษาโดยสังเขป

สมบัติการดูดกลืนแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ซึ่งสามารถใช้ทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) อธิบายปรากฏการณ์ทางแสงต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเนื้อสารได้ จากทฤษฎีนี้ทำให้เราสามารถอธิบายสมบัติเชิงแสงของตัวกลาง ซึ่งเป็นตัวบอกถึงการหน่วง การยินยอม หรือการดูดกลืนคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ผ่านเข้ามาในเนื้อสารนั้น สมบัติดังกล่าวคือ ดัชนีหักเห (reflective index) หรือค่าคงที่ไดอิเลกตริก (dielectric constant) ซึ่งถ้ารู้สมบัติอย่างหนึ่งจะรู้สมบัติอีกอย่างหนึ่งได้ ผลจากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ เราสามารถเขียนฟังก์ชันคลื่นระนาบของคลื่นที่เคลื่อนที่ในตัวกลางได้ ในเทอมของค่าศักย์เวกเตอร์ (vector potential) คือ [13]

$$\mathbf{A} = A_o \mathbf{a} \exp [i(\omega t - N\mathbf{k}\cdot\mathbf{r})] \qquad \text{--------- 3.1}$$

A_o คืออัมปลิจูดของศักย์เวกเตอร์

$\mathbf{a}$ คือเวกเตอร์หนึ่งหน่วย (unit vector) ในทิศทางโพลาไรเซชัน

k คือเวกเตอร์คลื่น (wave vector)

r คือระยะขจัด (displacement)

N คือปริมาณเชิงซ้อน (complex number) ของดัชนีหักเห โดยที่ N อยู่ในรูป

$$N = n - iK$$

ในที่นี้ n คือค่าจริง (real part) ของดัชนีหักเห

K คือค่าจินตภาพ (imaginary part) ของดัชนีหักเห หรือสัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงค์ชัน (extinction coefficient)

นิยามของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในระดับมหภาค (macroscopic) คือ สัดส่วนของความเข้มแสงที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยระยะทางของตัวกลาง ดังสมการ [14]

$$\alpha = 1/I \; dI/dr \qquad \text{--------- 3.2}$$

โดยที่ I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง r ใด ๆ ในตัวกลาง

เนื่องจากความเข้มแสง เป็นปฏิภาคโดยตรงกับกำลังสองของศักย์เวกเตอร์ A ดังนั้นเราจะพบว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α สัมพันธ์กับสัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงค์ชันดังสมการ

$$\alpha = 4\pi K / \lambda \qquad \text{--------- 3.3}$$

โดยที่ λ คือความยาวคลื่นของแสงในสุญญากาศ

เมื่อฉายแสงเข้าไปในตัวกลางใด ๆ ความเข้มแสงจะลดลงเมื่อแสงเดินทางลึกเข้าไปในเนื้อสาร เนื่องจากอิเลกตรอนดูดกลืนพลังงานแสงที่ผ่านเข้ามาในตัวกลาง แล้วย้ายสถานะพลังงานไปอยู่ในระดับที่สูงขึ้นไป ลักษณะการดูดกลืนแสงของตัวกลางแต่ละชนิดไม่เหมือนกัน การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง

ตามทฤษฎีดังกล่าว การดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำได้เมื่อพลังงานของแสงเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานพอดี ขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental absorption edge) นิยามโดยพลังงานที่น้อยที่สุดของแสง ที่สามารถทำให้อิเลกตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ การดูดกลืนแสงนี้จะขึ้นอยู่กับโอกาสในการย้ายสถานะพลังงานของอิเลกตรอน ซึ่งเราอาจแบ่งการย้ายสถานะของอิเลกตรอนได้ 2 แบบ ได้แก่การย้ายสถานะภายในแถบพลังงานเดียวกัน (intraband transition) เมื่ออิเลกตรอนได้รับพลังงานเพิ่มแล้วย้ายสถานะอยู่ภายในแถบพลังงานเดียวกัน และการย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงาน (interband transition หรือ band-to-band transition) เมื่ออิเลกตรอนในแถบพลังงานหนึ่งรับพลังงานจากโฟตอนของแสงแล้วย้ายสถานะไปยังแถบพลังงานอื่น การดูดกลืนแสงเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ก็จะมีรายละเอียดแตกต่างกันไป ดังมีรายละเอียดดังนี้ [15]

1. <u>การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเลกตรอนย้ายสถานะในแถบพลังงานเดียวกัน</u>

ปกติในแถบพลังงานที่มีอิเลกตรอนบรรจุอยู่เต็มแล้ว จะเกิดการย้ายสถานะของอิเลกตรอนไม่ได้ แต่สำหรับแถบพลังงานที่ยังมีสถานะพลังงานที่ว่างอยู่ เช่นในแถบนำ จะสามารถเกิดการย้ายสถานะได้ โดยอิเลกตรอนจะดูดกลืนพลังงานแสงแล้วย้ายไปอยู่ที่ระดับสถานะพลังงาน ที่สูงขึ้น อาจเกิดได้หลายกรณี เช่น <u>การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเลกตรอนอิสระ</u> (free-carrier absorption) โดยเมื่ออิเลกตรอนดูดกลืนพลังงานแสงเข้าไปแล้วเปลี่ยนให้เป็นพลังงานจลน์ เนื่องจากการดูดกลืนแสงในกรณีนี้มีค่าน้อยเทียบกับการดูดกลืนแสงจากกรณีอื่น ๆ เมื่อพลังงานของแสงมีค่าใกล้กับช่องว่างแถบพลังงาน และไม่มีความสำคัญต่อลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน จึงอาจตัดทิ้งได้

2. การดูดกลืนแสงเนื่องจากอิเลกตรอนย้ายสถานะไปแถบพลังงานอื่น

การดูดกลืนแสงในกรณีนี้มีได้หลายลักษณะ ในที่นี้จะกล่าวถึงกรณีที่สำคัญ และสามารถสังเกตได้เด่นชัด ได้แก่ การดูดกลืนแสงพื้นฐาน

เมื่ออิเลกตรอนย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างแถบพลังงานไปยังแถบนำ เรียกว่า การดูดกลืนแสงหลัก พลังงานของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนในกรณีนี้จะเท่ากับค่าช่องว่างแถบพลังงานโดยประมาณ เราแบ่งการดูดกลืนนี้ออกเป็น 2 พวกใหญ่ ๆ ขึ้นกับลักษณะของการย้ายสถานะ และโครงสร้างแถบพลังงานของสาร ได้แก่ การย้ายสถานะแบบตรง (direct transition) และการย้ายสถานะแบบเฉียง (indirect transition) ในการทดลองวัดการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถพบการดูดกลืนแสงทั้งสองลักษณะ ขึ้นกับลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ

การย้ายสถานะแบบตรง เป็นการย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ โดยมีค่า k คงที่ ปรากฏเด่นชัดในสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบตรง โดยการใช้แบบจำลองโครงสร้างแถบพลังงานที่เป็นพาราโบลาอย่างง่าย (simple parabolic band) เราสามารถหาความสัมพันธ์ของการดูดกลืนแสงในกรณีนี้ได้ [13]

$$\alpha_d\, h\nu = A\,(h\nu - E_g)^{1/2}, \quad h\nu > E_g$$
$$= 0, \quad h\nu < E_g \qquad \text{--------- 3.4}$$

สำหรับการย้ายสถานะพลังงานแบบยอมรับได้ (allowed transitions) และ

$$\alpha_d\, h\nu = B\,(h\nu - E_g)^{3/2}, \quad h\nu > E_g$$
$$= 0, \quad h\nu < E_g \qquad \text{--------- 3.5}$$

สำหรับการย้ายสถานะพลังงานแบบต้องห้าม (forbidden transitions) ตามลำดับ

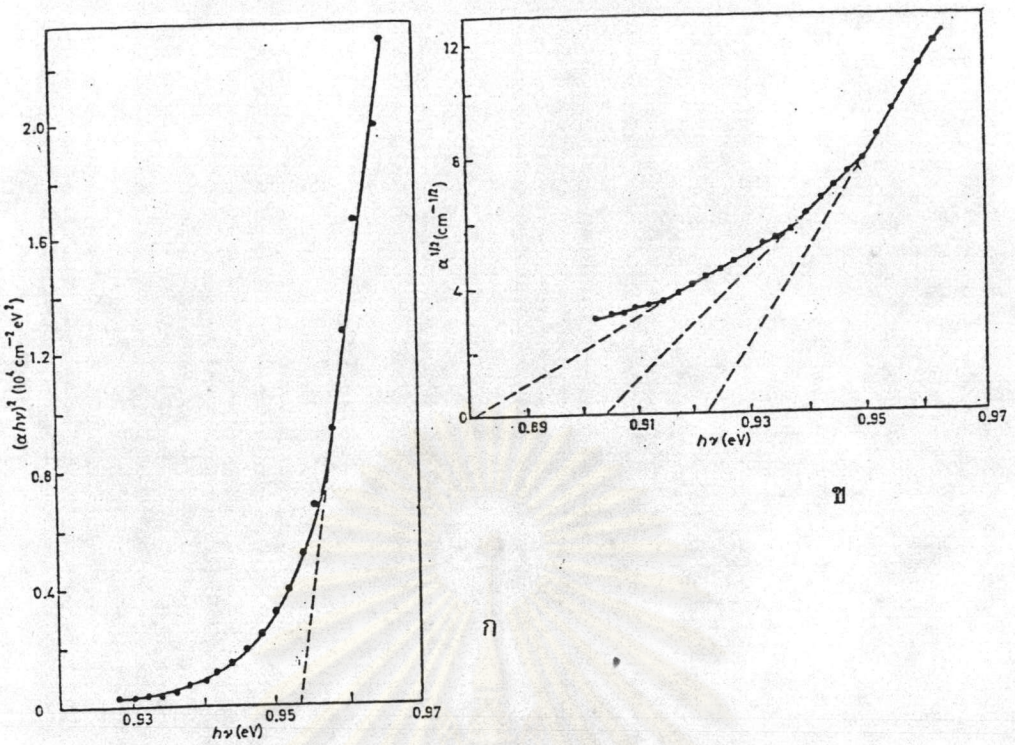
เมื่อ ν เป็นความถี่ของแสง, A และ B เป็นค่าคงที่, และ E_g เป็นค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความสัมพันธ์นี้จะใช้ได้ที่บริเวณใกล้ ๆ กับขอบของการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental absorption edge) เท่านั้น ซึ่งการแยกว่าเป็นการย้ายสถานะพลังงานแบบยอมรับได้ หรือแบบต้องห้าม จะขึ้นอยู่กับออปติคัล เมตริก อิลิเมนต์ (optical matrix element) ว่ามีค่าเป็นศูนย์หรือไม่ในการประมาณครั้งที่หนึ่ง (first approximation)

<u>การย้ายสถานะแบบเฉียง</u> เป็นการย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ โดยมีค่า k เปลี่ยนไป ซึ่งการย้ายสถานะพลังงานนี้เกิดจากการช่วยเหลือของโฟนอน (phonon assisted) ปรากฏเด่นชัดในสารที่มีช่องว่างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียง เราสามารถหาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความถี่ของแสงในกรณีนี้ได้ [13]

$$\alpha_1 h\nu = C (h\nu - E_g)^2 \quad , \quad h\nu > E_g$$
$$= 0 \quad , \quad h\nu < E_g \qquad \text{--------- 3.6}$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่

ภาพที่ 3.1 แสดงลักษณะการดูดกลืนแสงของทั้ง 2 ประการข้างต้น จะเห็นว่าเราสามารถหาค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ และยังสามารถพิจารณาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานได้โดยง่าย



ภาพที่ 3.1 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานแสง

ก. สำหรับการย้ายสถานะแบบตรง ข. แบบเฉียง

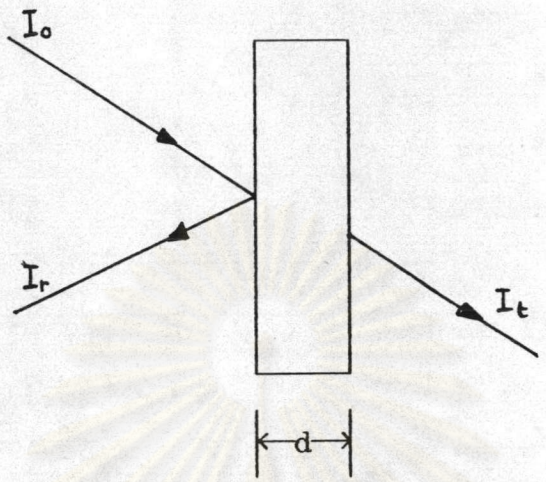
การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

เราสามารถหาขนาด และประเภทของช่องว่างแถบพลังงานได้ จากการวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสงค่าต่าง ๆ จากรูปที่ 3.2 ถ้าให้แสงที่ตกกระทบสารตัวอย่างมีความเข้ม I_o, แสงที่สะท้อนออกมามีความเข้ม I_r, และแสงที่ส่องผ่านมีความเข้ม I_t เราจะได้ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงต่าง ๆ ดังกล่าว อยู่ในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient, R) และความสามารถในการส่งผ่าน (transmission, T) ดังนี้ [13,16]

$$R = I_r/I_o = [(n-1)^2 + K^2]/[(n+1)^2 + K^2] \quad \text{----- 3.7}$$

$$T = I_t/I_o = [(1-R)^2 \exp(-\alpha d)]/[1 + R^2 \exp(-2\alpha d)] \quad \text{----- 3.8}$$

เมื่อ d คือความหนาของสารตัวอย่าง



ภาพที่ 3.2 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

เมื่อทำการวัดค่า T ที่ความยาวคลื่นแสงต่าง ๆ ที่ครอบคลุมช่วงที่ต้องการศึกษา จะสามารถคำนวณค่า α ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ออกมาได้ ในกรณีที่ชิ้นสารมีความหนาเหมาะสมทำให้ $R^2 \exp[-2\alpha d] << 1$ เราสามารถคำนวณค่า α ได้ดังสมการ

$$\alpha = -1/d \ln [T/(1-R)^2] \qquad \text{--------- 3.9}$$

และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่วัดได้ กับพลังงานแสง ร่วมกับสมการที่ 3.4, 3.5, และ 3.6 จะสามารถคำนวณหาขนาดและประเภทของช่องว่างแถบพลังงานได้