บทที่ 3

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

การศึกษาสมบัติเชิงทัศนศาสตร์ (optical properties) ของสารกึ่งตัวนำ ทำให้รู้ถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำ รวมถึงผลกระทบต่าง ๆ ที่มีต่อโครงสร้างแถบพลังงาน เช่น อุณหภูมิ, สนามไฟฟ้า, สนามแม่เหล็ก ผลจากการศึกษานี้ประกอบกับทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง เราจะสามารถอธิบายสมบัติเชิงไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ และทราบถึงความเป็นไปได้ของอุปกรณ์กึ่งตัวนำที่ประดิษฐ์ขึ้นจากสารกึ่งตัวนำนั้น

ในบทนี้จะ ได้กล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ และการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่มีขนาดพลังงานใกล้เคียงกับขนาดช่องว่างแถบพลังงาน เพื่อที่จะทราบถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน

3.1 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง

ในการพิจารณาถึงการดูดกลืนแสงของตัวกลาง ปริมาณที่บ่งบอกถึงลักษณะการดูดกลืนแสงของตัวกลางนั้นได้เป็นอย่างดีก็คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) หรือสัดส่วนความเข้มแสงที่ลดลงต่อหนึ่งหน่วยระยะทางที่แสงเดินทางในตัวกลาง ดังนั้น [9,10]

$$\alpha = -(1/I)dI/dr \qquad (3.1)$$

เมื่อ I คือ ความเข้มแสงที่ระยะทาง r ใด ๆ ในตัวกลาง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากทฤษฎีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ (Maxwell) [9 - 11] เราสามารถเขียนฟังก์ชั่นคลื่นแบบระนาบ (plane wave) ได้ว่า

$$E = E_o \exp\{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)\} \qquad (3.2)$$

$$H = H_o \exp\{i(\mathbf{k}\cdot\mathbf{r} - \omega t)\} \qquad (3.3)$$

เมื่อ E คือ สนามไฟฟ้า (electric field) มีอัมปลิจูด E_o

H คือ สนามแม่เหล็ก (magnetic field) มีอัมปลิจูด H_o

k คือ เวคเตอร์คลื่น (wave vector)

ω คือ ความถี่เชิงมุม (angular frequency)

t คือ เวลา

โดยทั่วไปเวคเตอร์คลื่น k คือเวคเตอร์เชิงซ้อน (complex vector) ซึ่งสามารถเขียนได้ว่า $\mathbf{k} = \mathbf{k}_1 + \mathbf{k}_2$ โดยที่ $\mathbf{k}_1$ และ $\mathbf{k}_2$ คือ เวคเตอร์จริง (real part) และเวคเตอร์จินตภาพ (imaginary part) ของเวคเตอร์คลื่น k ตามลำดับ และในกรณีที่คลื่นผ่านตัวกลางที่มีปริมาณเชิงซ้อนของดัชนีหักเหคือ $N = n - iK$ เราจะได้ว่า

$$|\mathbf{k}_1| = n\omega/c \qquad (3.4)$$

และ

$$|\mathbf{k}_2| = K\omega/c \qquad (3.5)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ c คือ ความเร็วแสง

n คือ จำนวนจริงของดัชนีหักเหของตัวกลาง

K คือ จำนวนจินตภาพ หรือสัมประสิทธิ์เอ็กซ์ทิงค์ชั่น (extinction coefficient) ของดัชนีหักเหของตัวกลาง

ในกรณีเช่นนี้การส่งผ่านพลังงานเฉลี่ยต่อเวลา (time - averaged energy flow) คือ [11]

$$S = (nc\epsilon_o/2)\ (E_o \times E_o)\ k \exp(-2k_2 \cdot r) \qquad (3.6)$$

เนื่องจากการส่งผ่านพลังงานเฉลี่ยต่อเวลาแปรผันตรงกับความเข้มแสง ดังนั้นโดยสมการ (3.1) และ (3.6) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลางคือ

$$\alpha = 2 \left| k_2 \right| = 2K\omega/c = 4\pi K/\lambda \qquad (3.7)$$

เมื่อ λ คือ ความยาวคลื่นในสุญญากาศ

จากสมการ (3.7) เห็นได้ว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและจำนวนจินตภาพของดัชนีหักเห ซึ่งเปลี่ยนแปลงตามความถี่ของแสงที่ผ่านเข้ามาในตัวกลาง และยังเป็นสมบัติเฉพาะตัวของตัวกลางแต่ละชนิด ดังนั้นการดูดกลืนแสงจึงเป็นสมบัติเฉพาะตัว และเปลี่ยนแปลงตามความถี่แสงที่ผ่านเข้ามาในตัวกลางนั้น

ในกรณีตัวกลางที่เป็นสารกึ่งตัวนำการดูดกลืนแสงสามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง พลังงานแสงที่สูญหายไปในขบวนการดูดกลืนแสงจะถูกนำไปใช้ในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำ ซึ่งการดูดกลืนแสงจะขึ้นอยู่กับโอกาสในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน (W) หรือจำนวนครั้งในการย้ายสถานะพลังงานต่อหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อหนึ่งหน่วยเวลา ดังนั้นพลังงานโฟตอน ($h\nu$) ของแสงที่ถูกดูดกลืนคือ $Wh\nu$ และโดยกฎการอนุรักษ์พลังงาน เราจะได้ว่า

$$\nabla \cdot S = - Wh\nu \qquad (3.8)$$

จากสมการ (3.6), (3.7), และ (3.8) พบว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงมีความสัมพันธ์กับโอกาสในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ดังสมการ [11]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

$$\alpha = 2\pi ch^2 W / nh\nu E_o^2 \qquad (3.9)$$

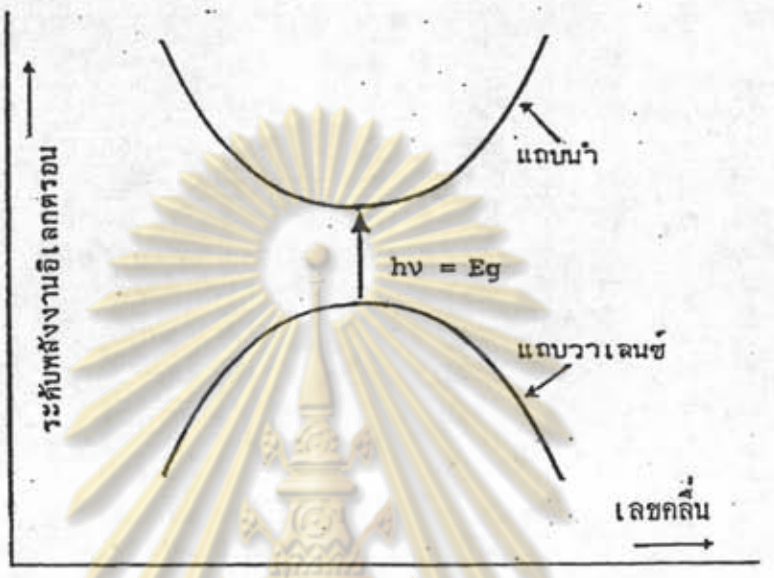
ซึ่งโอกาสในการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนี้ขึ้นกับโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ถ้าโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบตรงจะเรียกการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในโครงสร้างแบบนี้ว่า "การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง" (direct transition) การย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ยังแบ่งออกเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยอมรับได้ (allowed transitions) และชนิดต้องห้าม (forbidden transitions) ขึ้นอยู่กับขั้นตอนการย้ายสถานะพลังงงานจากระดับพลังงานเริ่มต้นไปสู่ระดับพลังงานสุดท้าย ถ้าการย้ายสถานะพลังงานสามารถย้ายได้เลยเพียงขั้นตอนเดียวเรียกว่า "การย้ายสถานะชนิดยอมรับได้" และถ้าไม่สามารถย้ายสถานะพลังงานได้ในขั้นตอนเดียว คือจะต้องย้ายจากระดับพลังงานเริ่มต้นไปยังระดับพลังงานอื่นเสียก่อน จึงจะสามารถย้ายไปสู่ระดับพลังงานสุดท้ายได้ เรียกว่า "การย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม" ซึ่งจะเป็นไปตามกฎการเลือก (selection rule) ในทางฟิสิกส์ควอนตัมเราสามารถดูได้จากค่าออฟติคอลเมตริก อิลิเมนต์ (optical matrix element) ว่ามีค่าไม่เป็นศูนย์หรือเป็นศูนย์ในการประมาณครั้งที่หนึ่ง (first approximation) ถ้ามีค่าเป็นศูนย์การย้ายสถานะพลังงานนั้นก็คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม แต่ถ้าไม่เป็นศูนย์การย้ายสถานะพลังงานนั้นก็คือการย้ายสถานะพลังงานชนิดยอมรับได้ ในกรณีที่แถบพลังงานเป็นรูปพาราโบลิคอย่างง่าย (simple parabolic band) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง คือ [11]

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

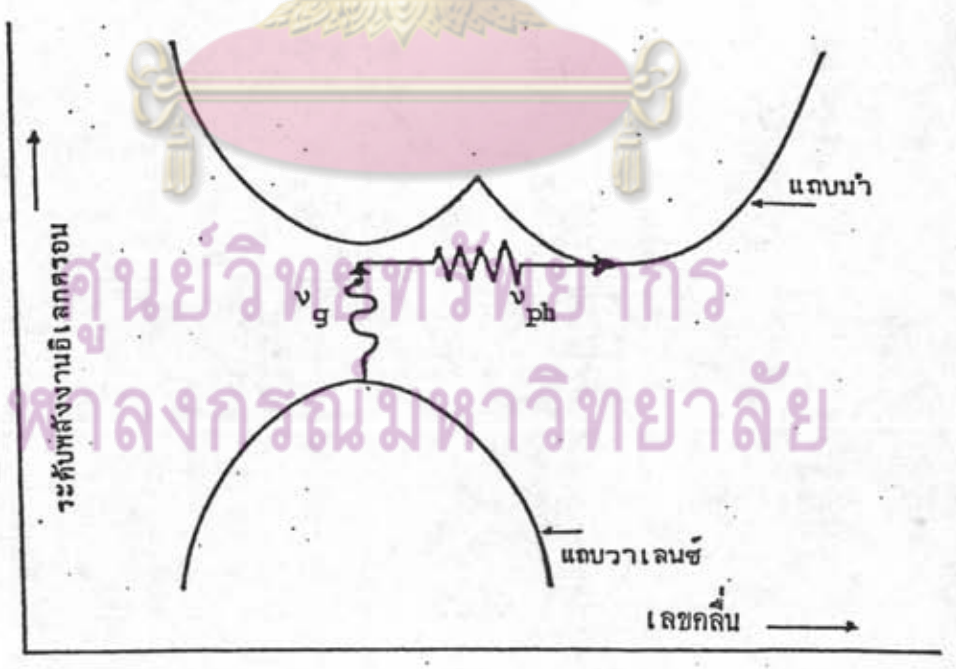
$$\alpha = A(h\nu - E_g)^{1/2}/h\nu \qquad \text{ในชนิดยอมรับได้} \qquad (3.10)$$

$$\alpha = B(h\nu - E_g)^{3/2}/h\nu \qquad \text{ในชนิดต้องห้าม} \qquad (3.11)$$

เมื่อ A และ B คือค่าคงที่



รูปที่ 3.1 แสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบตรง



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.2 แสดงการย้ายสถานะแบบเฉียงซึ่งจะต้องมีโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย ทำให้มีการเปลี่ยนแปลงเวคเตอร์คลื่น

ถ้าโครงสร้างแถบพลังงานเป็นแบบเฉียงจะเรียกว่า "การย้ายสถานะพลังงานแบบเฉียง" ซึ่งสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานแบบเฉียงในกรณีที่แถบพลังงานเป็นรูปพาราโบลิคอย่างง่ายคือ [11]

$$\alpha = C(h\nu - E_g)^2/h\nu \qquad (3.12)$$

เมื่อ C คือค่าคงที่

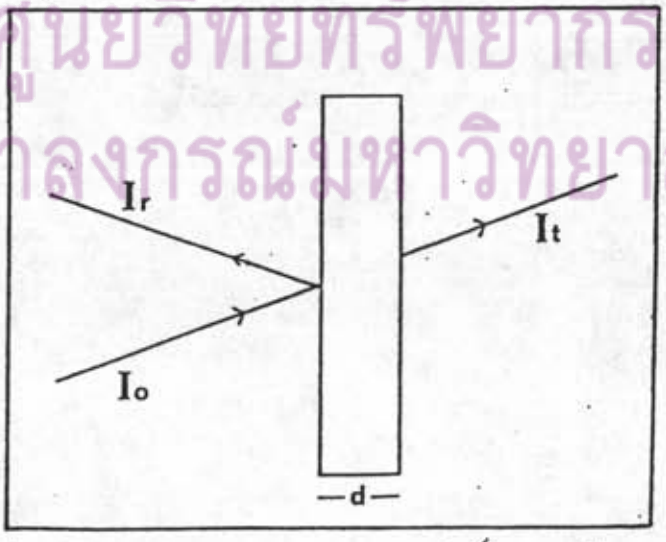
3.2 การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

การวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของตัวกลางสามารถกระทำได้โดยการฉายแสงที่มีความเข้ม I_o ตกกระทบตัวกลางดังรูป 3.3 ซึ่งจะมีความเข้มแสงที่ทะลุผ่านตัวกลางคือ I_t และความเข้มแสงสะท้อนคือ I_r ในกรณีที่แสงตกกระทบตกตั้งฉากกับตัวกลาง เราจะได้ความสัมพันธ์ของความเข้มแสงดังกล่าวในรูปของสัมประสิทธิ์การสะท้อน (reflection coefficient, R) และความสามารถในการส่งผ่าน (transmission, T) ดังสมการ [10,11]

$$R = I_r/I_o = \{(n - 1)^2 + K^2\}/\{(n + 1)^2 + K^2\} \qquad (3.13)$$

$$T = I_t/I_o = \{(1 - R)^2\exp(-\alpha d)\}/\{1 + R^2\exp(-2\alpha d)\} \qquad (3.14)$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.3 แสดงการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ้าความหนาของตัวกลาง (d) มีค่าพอเหมาะที่ทำให้ปริมาณ $R^2 \exp(-2\alpha d) < 1$ สมการ (3.14) สามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$I_t/I_o = (1 - R^2)\exp(-\alpha d) \qquad (3.15)$$

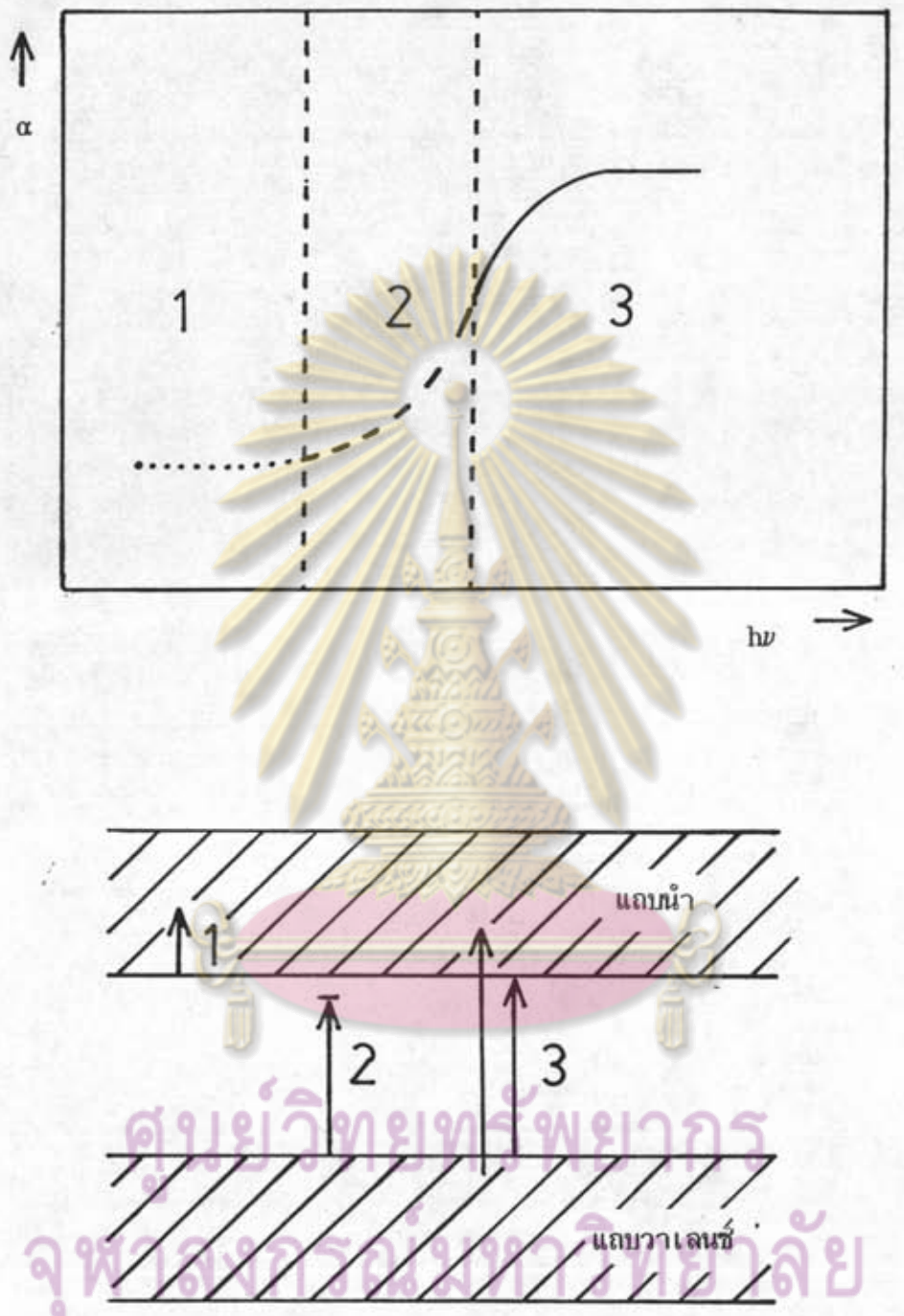
และโดยทั่วไปค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อน จะมีการเปลี่ยนแปลงต่อพลังงานโฟตอนแสงที่ตกกระทบน้อยมาก ดังนั้นเราจะประมาณว่าเทอม $(1 - R)^2$ มีค่าคงที่ และได้ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความสามารถในการส่งผ่าน ดังสมการ

$$\alpha = \ln(I_o/I_t)/d = \alpha' + \text{ค่าคงที่} \qquad (3.16)$$

ค่าคงที่ในสมการ (3.16) เกิดขึ้นเนื่องจากการละเลยในการพิจารณาถึงความเข้มแสงที่สะท้อน ทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงกว่าความเป็นจริง แต่อย่างไรก็ตามในการทดลองนั้นจะต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (background absorption coefficient, α_o) ที่เกิดขึ้นเนื่องจากความบกพร่องต่าง ๆ มาหักออกจาก α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนที่แท้จริง

ในรูปที่ 3.4 แสดงตัวอย่างแบบฉบับผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ เพื่อแสดงให้เห็นช่วงของการดูดกลืนแสง ในช่วงที่ 1. การดูดกลืนแสงจะเกิดขึ้นจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนภายในแถบพลังงานเดียวกัน การดูดกลืนแสงในช่วงนี้ไม่เด่นชัดมากนัก แต่สามารถสังเกตได้เป็นค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง ในช่วงที่ 2. เกิดขึ้นเนื่องจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังส่วนหางของแถบนำ (band tail) ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความไม่เป็นระเบียบ (disorder) ภายในสารกึ่งตัวนำ ในช่วงที่ 3. เกิดจากการย้ายพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบนำของอิเล็กตรอน ซึ่งจะเป็นไปตามสมการ 3.10, 3.11 หรือ 3.12 แล้วแต่ว่าสารกึ่งตัวนำนั้นมีโครงสร้างแถบพลังงานอย่างไร

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 ก. แสดงตัวอย่างแบบฉบับผลการทดลองวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

ข. แสดงการย้ายสถานะพลังงานสอดคล้องกับการดูดกลืนแสงในช่วงต่าง ๆ