บทที่ 3
สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

3.1 ทฤษฎีการดูดกลืนแสง

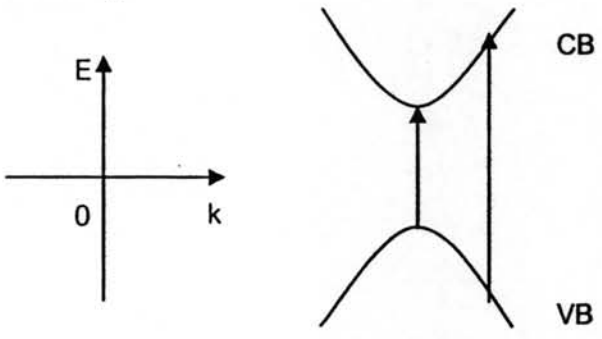
กระบวนการการดูดกลืนแสงของวัสดุกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ดูดกลืนพลังงานโฟตอนและเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานข้ามช่องว่างพลังงานไปอยู่ที่บริเวณแถบการนำ โดยกระบวนการ การดูดกลืนแสงมีปรากฏลักษณะการเกิดดังต่อไปนี้ [7]

3.1.1 การดูดกลืนพื้นฐาน

กระบวนการการดูดกลืนนี้เกิดขึ้นระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำ โดยการดูดกลืนโฟตอนที่มีพลังงานเท่ากับแถบพลังงาน แบ่งเป็น 2 กระบวนการย่อย เกี่ยวข้องกับโฟตอนอย่างเดียวและเกี่ยวข้องกับโฟตอนและโฟนอน [7]

3.1.1.1 กระบวนการที่อิเล็กตรอนดูดกลืนโฟตอนพลังงานที่มีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานส่งผลให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบจากแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปอยู่ในแถบนำโดยการการดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นประจุอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์และสถานะว่างในแถบการนำการดูดกลืนที่มีโฟตอนอย่างเดียว เรียกการเปลี่ยนผ่านตรง (direct transition)

3.1.1.2 กระบวนการที่อิเล็กตรอนดูดกลืนโฟตอนที่มีระดับพลังงานเท่ากับช่องว่างพลังงาน และดูดกลืนโฟนอนด้วยกฎการอนุรักษ์โมเมนตัม การเปลี่ยนผ่านนี้เรียกว่าการเปลี่ยนผ่านเฉียง (indirect transition)



รูปที่ 3.1 แสดงกระบวนการดูดกลืนแบบพื้นฐาน

สำหรับอัตราเร็วคลื่นที่มีค่าเท่ากับแสง อัตราเร็วในตัวกลางเปลี่ยนจากเดิมโดยให้อัตราเร็วเฟสหารด้วยดัชนีหักเหเชิงซ้อนเขียนเป็น

$$N=\left(\varepsilon+\frac{i4\pi\sigma}{\omega}\right)^{\frac{1}{2}} \tag{3.4}$$

ทฤษฎีสมบัติเชิงแสง สังเกตแบบมหาภาคสามารถเขียนในเทอม N เช่นการรบกวนด้วยความถี่ ω ที่เคลื่อนที่เป็นคลื่นระนาบ (plane wave) ในทิศทาง $+x$ จะได้

$$N=n+ik \tag{3.4a}$$

สำหรับค่าจริงและจินตภาพ N ค่า k สัมพันธ์กับค่าต่างๆ

$$K=\frac{n\omega}{c}+\frac{ik\omega}{c} \tag{3.4b}$$

โดยการแทนค่า k จากสมการ (3.4b) ลงในสมการ (3.1) เขียนใหม่ได้

$$\tilde{E}=E_0\exp\left[i\omega\left(\frac{nx}{c}-t\right)\right]\exp\left(\frac{-k\omega x}{c}\right) \tag{3.5}$$

สมการ (3.5) ประกอบด้วย 2 ส่วน ส่วนที่บอกถึงเฟสคือ $\exp\left(-\frac{\omega kx}{c}\right)$ และส่วนที่บ่งบอกถึงบ่งบอกถึงการลดลงของแอมพลิจูดหรือความเข้มแสง I โดย I หาได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$I\propto E\cdot E^{*} \tag{3.6}$$

$$I\propto E_{0x}^{2}\exp\left(-\frac{2\omega kx}{c}\right) \tag{3.7}$$

$$I\propto I_0\exp\left(-\frac{4\pi kx}{\lambda}\right) \tag{3.8}$$

$$I\propto I_0\exp(-\alpha x) \tag{3.9}$$

I คือความเข้มแสง และ $\alpha=\frac{4\pi kx}{\lambda}$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง [7]

3.1.2 การดูดกลืนของอนุภาคเอ็กซิตอน

อนุภาคเอ็กซิตอนเป็นปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนมีอันตรกิริยาทางไฟฟ้ากับโฮลและจับคู่กันเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยเอ็กซิตอนสามารถที่จะเคลื่อนที่ผ่านไปในผลึก เนื่องด้วยเอ็กซิตอนคือประจุอิเล็กตรอนและโฮลจับคู่กันผลรวมของประจุเกิดเป็นกลางทางไฟฟ้า [2] โดยปกติจะพบเอ็กซิตอนอยู่บริเวณใกล้กับบริเวณของการดูดกลืนพลังงานแบบตรงของสารกึ่งตัวนำในกรณีทั่วไปการดูดกลืนโฟตอนของสารกึ่งตัวนำจะมีค่าต่างๆ ค่าแรกที่สอดคล้องกับความถี่ υ คือ

$$h\upsilon = E_g - E_x \qquad (3.10)$$

E_x คือ พลังงานยึดเหนี่ยวของเอ็กซิตอน

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนของสารกึ่งตัวนำคือ

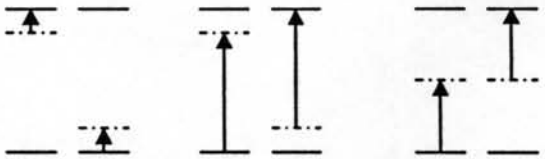
$$\alpha(h\upsilon) = A\left(h\upsilon - E_g\right)^{\frac{1}{2}}$$

ถ้าระดับพลังงานเอ็กซิตอนอยู่ต่ำกว่าขอบการนำ ฉะนั้นจะได้สัมประสิทธิ์การดูดกลืนสำหรับสารที่มีเอ็กซิตอนคือ

$$\alpha\left(h\upsilon\right) = \left(h\upsilon - E_g + E_x\right)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.11)$$

3.1.3 การดูดกลืนพลังงานในสถานะที่เกิดจากการเจือ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงระดับพลังงานที่เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากความไม่สมบูรณ์ของผลึกและเนื่องมาจากการเจือของตัวผลึกส่งผลให้เกิดการเกิดระดับสถานะพลังงานขึ้นระหว่างช่องว่างพลังงาน ดังนั้นระดับสถานะพลังงานเหล่านี้ค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานเป็นผลให้อิเล็กตรอนสามารถเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ไปอยู่ที่ระดับพลังงานการเจือที่เกิดขึ้นได้ง่ายกว่าจากแถบวาเลนซ์ไปแถบการนำสามารถแสดง [7]



รูปที่ 3.2 รูปแสดงการดูดกลืนของสิ่งเจือปนและความไม่สมบูรณ์ของผลึก

จากรูปที่ 3.2 แสดงระดับการดูดกลืนของสารเจือดังนี้

1. การดูดกลืนเปลี่ยนสถานะจากสถานะผู้ให้ไปยังแถบการนำ
2. การดูดกลืนเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ไปสถานะผู้รับ
3. การดูดกลืนเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ไปยังสถานะผู้ให้
4. การดูดกลืนเปลี่ยนสถานะจากสถานะผู้รับไปแถบการนำ
5. การดูดกลืนเปลี่ยนสถานะจากแถบวาเลนซ์ไปยังแทรป
6. การดูดกลืนเปลี่ยนสถานะจากแทรปไปยังแถบการนำ

$$h\upsilon = E_g - E_{im} \qquad (3.12)$$

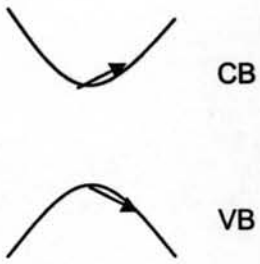
$h\upsilon$ คือพลังงานโฟตอน

E_g คือช่องว่างพลังงาน

E_{im} คือระดับพลังงานการเจือ

3.1.4. การดูดกลืนของพาหะอิสระ

การดูดกลืนของโฟตอนอันเนื่องมาจากพาหะอิสระ หรืออิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำโดยกระบวนการนี้เกิดการดูดกลืนขึ้นภายในแถบพลังงาน หรือเรียกว่าการดูดกลืนภายในแถบพลังงาน (intraband absorption) โดยกระบวนการนี้เกิดจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบการนำดูดกลืนโฟตอนและเปลี่ยนสถานะอยู่สูงขึ้นโดยพลังงานการดูดกลืนในย่านนี้เกิดจากการดูดโฟตอนในย่านอินฟาเรดและโฟนอน (phonon) [7]



รูปที่ 3.3 รูปการดูดกลืนของพาหะอิสระในสารกึ่งตัวนำ

การดูดกลืนในหัวข้อ 3.1.1 ถึง 3.1.2 เป็นการแสดงการดูดกลืนพลังงานแสงระหว่างแถบพลังงาน (band–to–band absorption) โดยเป็นการดูดกลืนพลังงานแบบตรง (direct absorption) ดังนั้นกระบวนการการดูดกลืนแบบตรงเกิดจากการดูดกลืนโฟตอนอย่างเดียวโดยไม่มีโฟนอนมาเกี่ยวข้อง ดังแสดงตามสมการด้านล่าง

$$h\upsilon = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m^*} \tag{3.13}$$

โดยที่

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*} \tag{3.14}$$

ค่าต่างๆ ในสมการ

m^* คือมวลลดทอนเอ็กซิตอน

$h\upsilon$ คือพลังงานโฟตอน

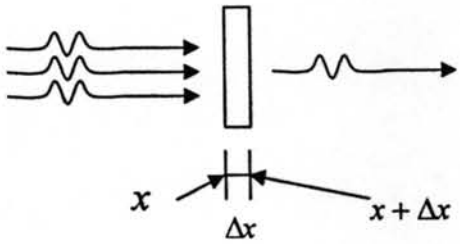
E_g คือช่องว่างพลังงาน

k คือเลขคลื่น

3.2. สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

พิจารณาแสงชนิดความถี่เดียวขนาดลำแสงเล็กส่องผ่านวัสดุตัวอย่าง เพื่อง่ายต่อความเข้าใจ สมมติมีการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงตามความหนาแน่นสารได้ดังนี้

$$\Delta I(x) = I(x + \Delta x) - I(x) \tag{3.15}$$



รูปที่ 3.4 รูปแสดงการดูดกลืนโฟตอนแสง

สำหรับตัวกลางชนิดเอกพันธ์ (homogenous media) $\Delta I(x)$ เป็นสัดส่วนกับระยะ Δx และ $I(x)$ นั่นคือ $\Delta I(x) = -\alpha I(x)\Delta x$ ค่าสัมประสิทธิ์ α นิยามความสามารถในการดูดกลืนแสง เครื่องหมายลบหมายถึงการลดลงของความเข้มแสงเนื่องจากการดูดกลืน α มีค่าบวก โดยเขียนใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\alpha I(x) \tag{3.16}$$

หรือ $$I = I_0 \exp(-\alpha x) \tag{3.17}$$

สามารถแปลงสมการที่ 3.17 อยู่ในรูปแบบสมการการดูดกลืนดังนี้

$$\alpha = \frac{1}{x}\ln\left(\frac{100}{T}\right) \tag{3.18}$$

เมื่อ T คือเปอร์เซ็นต์การส่งผ่าน

จากสมการ (3.16) หรืออาจเขียนในพารามิเตอร์อื่น $I = \frac{\rho c}{n}$ หรือ $I = N\frac{h\upsilon c}{n}$

โดย I คือความเข้มแสง

ρ คือความหนาแน่นโฟตอน $(\rho = Nh\upsilon)$

c คืออัตราเร็วแสง

n คือดัชนีหักเห

การเปลี่ยนความหนาแน่นโฟตอนระหว่าง x และ $x+\Delta x$ ในหน่วยปริมาตร ดังแสดงด้านล่าง

$$-dN(x) = [I(x) - I(x+\Delta x)]\frac{n}{h\upsilon c} \tag{3.19}$$

อัตราการลดลงของความหนาแน่นโฟตอนในช่วงเวลา dt

$$-dN(x) = \frac{dI(\alpha)}{dx}\frac{n\Delta x}{h\upsilon c} \tag{3.20}$$

อัตราการลดลงของความหนาแน่นโฟตอนในช่วงเวลา

$$dt = \frac{\Delta n}{\left(c/n\right)} \quad \text{คือ}$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{dI(x)}{dx}\cdot\frac{1}{h\upsilon} \tag{3.21}$$

แทนค่า $\frac{dI}{dt}$ จากสมการ (3.16) จะได้

$$\frac{dN}{dt} = -\alpha I(x)\cdot\frac{1}{h\upsilon} = -\alpha\rho_{\upsilon}\cdot\frac{c}{n}\cdot\frac{1}{h\upsilon} \tag{3.22}$$

การดูดกลืนแสงขึ้นกับปริมาณอิเล็กตรอนและสถานะว่าง อาจแสดงได้ดังสมการ

$$-\frac{dN}{dt} = \left(\frac{g_2}{g_1}N_1 - N_2\right)\rho_{\upsilon}B_{21} \tag{3.23}$$

B_{21} คือสัมประสิทธิ์ไอน์สไตน์ N_1 และ N_2 คือจำนวนอิเล็กตรอนในสภาวะพลังงานนั้นๆ เปรียบเทียบสมการ (3.21) และ (3.20) ได้

$$\alpha = \left(\frac{g_2}{g_1} N_1 - N_2 \right) B_{21} \frac{h\upsilon n}{c} \qquad (3.24)$$

ที่ระดับพลังงาน E_1 และ E_2 การดูดกลืนขึ้นกับปริมาณอิเล็กตรอนและสถานะว่างในกรณีเรืองแสงได้สัมประสิทธิ์การขยายสัญญาณคือ

$$\beta = \left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right) B_{21} \frac{h\upsilon n}{c} \qquad (3.25)$$

พิจารณาสมการ (3.23) ถ้า $\beta > 1$ นั่นหมายถึงมีการขยายสัญญาณโดยตัวกลางที่แสงผ่าน พจน์อื่นๆ ในสมการ B_{21}, h และ c เป็นค่าคงที่ ส่วน υ คือความถี่ต่างๆ ของแสงฉะนั้นโดยกรณีทั่วไปที่ตัวกลางไม่มีการขยาย β จะน้อยหรือเท่ากับหนึ่ง แต่ถ้า $\beta > 1$ คือกรณีเกิดการขยายโดยพิจารณาจาก ผลต่างของปริมาณประจุ $\left(N_2 - \frac{g_2}{g_1} N_1 \right)$ การที่ N_2 จะมากกว่า $\frac{g_2}{g_1} N_1$ ระบบนั้นต้องมีสถานะที่เสถียรหรือเรียก meta-stable-state คือสารที่มีสถานะที่มีประจุอยู่นั้นมี life-time ยาวกว่าสถานะอื่นเกิดการสะสมของประจุ เมื่อมีประจุมาก การเปลี่ยนสถานะ (transitions) ลงมาก็จะมีปริมาณมากกว่าโฟตอนที่เกิดจากแหล่งกำเนิด