บทที่ 3

สมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

ทฤษฎีการดูดกลืนแสง [12]

การศึกษาสมบัติการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ จะทำให้รู้เกี่ยวกับแถบช่องว่างพลังงานนั่นคือ การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ชั้นบนเปลี่ยนสถานะพลังงานไปอยู่ในระดับแถบนำ ความพอดีของพลังงานแสงและช่องว่างพลังงานต้องสมนัยกันหรือมากกว่าจึงจะเกิดการดูดกลืนขึ้น เมื่อพิจารณาค่าพลังงานที่เปลี่ยนแปลงจากการที่เปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนก็จะทำให้รู้ค่าแถบช่องว่างพลังงานได้ การดูดกลืนแสงสามารถวิเคราะห์ได้โดยสมการคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ เมื่อพิจารณาให้แสงเป็นคลื่นระนาบเคลื่อนที่ไปตัวกลางที่มีค่าสภาพซึมได้ของแม่เหล็ก (μ) = 1 จะได้สมการคลื่นแสงเป็น

$$E = E_0 \exp[i(K.r - \omega t)] \qquad (3.1)$$

$$H = H_0 \exp[i(K.r - \omega t)] \qquad (3.2)$$

โดยที่

E คือสนามไฟฟ้ามีอัมปิลจูด E_0

H คือสนามแม่เหล็กมีอัมปิลจูด H_0

$K = K_1 + iK_2$ เป็นเวกเตอร์คลื่น โดย K_1 คือเวกเตอร์จริงและ K_2 คือเวกเตอร์จินตภาพ หรือ $K.K = \mu_0 \varepsilon_0 \varepsilon \omega^2 = \frac{\varepsilon \omega^2}{c^2}$ โดยที่ ε คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริกและ c คือความเร็วแสง

ω คือความถี่เชิงมุม

t คือเวลา

แต่การเคลื่อนที่ของแสงในตัวกลางจะแตกต่างจากในอากาศ เนื่องจากแสงจะได้รับอิทธิพลของประจุไฟฟ้าในตัวกลางเป็นผลทำให้ ความเร็วคลื่น ความเข้มของการแผ่รังสีเปลี่ยนแปลงโดยพิจารณาจากดรรชนีหักเหเชิงซ้อนดังนี้

$$N = n - ik \qquad (3.3)$$

n = ดรรชนีหักเหจริง

k = extrinction coefficient

สำหรับระนาบคลื่นเอกพันธุ์ จะได้ว่า

$$|K_1| = \frac{n\omega}{c}$$

และ

$$|K_2| = \frac{k\omega}{c} \qquad (3.4)$$

แทนสมการ (3.4) ลงในสมการ (3.1) จะได้สนามไฟฟ้าในทิศทาง x เป็น

$$E_x = E_{0x}\exp[i\omega(\frac{n\pi}{c} - t)]\exp(-\frac{\omega kx}{c}) \qquad (3.5)$$

E_x คือสนามไฟฟ้าในทิศทาง x

E_0 คือสนามไฟฟ้าค่าสูงสุด

จากสมการที่ (3.5) แสดงถึงคลื่นแสงเดินทางผ่านตัวกลางในทิศทาง x ด้วยความเร็ว c/n ซึ่ง E จะลดลงด้วยปริมาณ $\exp(-\frac{\omega kx}{c})$ และความเข้มของการแผ่รังสีจะมีค่าเปลี่ยนแปลง ดังสมการ

$$I \alpha EE^* \qquad (3.6)$$

ดังนั้นจะได้

$$I \alpha E_0^2 \exp(-\frac{2\pi kx}{c})$$

หรือ

$$I = I_0 \exp(-\frac{4\pi k x}{\lambda})$$

$$I = I_0 \exp(-\alpha x) \qquad (3.7)$$

$\alpha = \frac{4\pi k}{\lambda}$ คือสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง (cm^{-1})

I คือความเข้มแสงที่ตำแหน่ง x

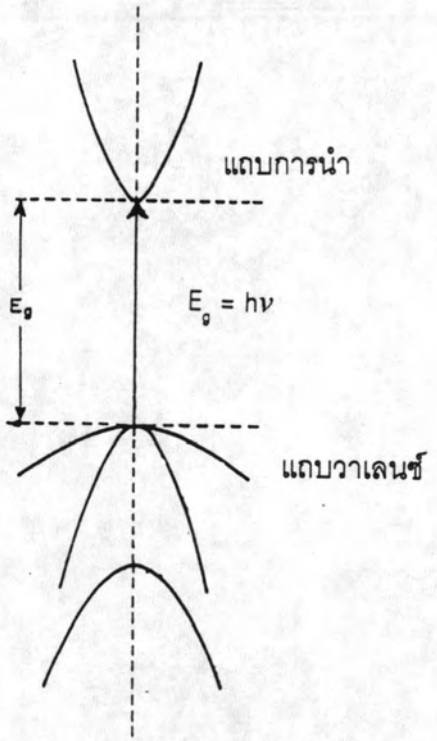
I_0 คือความเข้มแสงตกกระทบ (W/cm^2)

λ คือความยาวคลื่นแสงในสูญญากาศ

จากสมการที่ (3.7) เขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = -\frac{1}{I}(\frac{dI}{dx}) \qquad (3.8)$$

สมการที่ (3.8) คืออัตราการลดลงของความเข้มแสงต่อหนึ่งหน่วยระยะทาง



รูปที่ 3.1 แสดงการเปลี่ยนสถานะแบบตรงของโครงสร้างแถบพลังงาน ของโครงสร้างผลึกแบบ cubic

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำแคดเมี่ยมซัลไฟด์ [13]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากแถบพลังงานวาเลนซ์ไปยังแถบการนำ เนื่องจากอิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่มากกว่าแถบว่างพลังงาน การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนมีหลายชนิดด้วยกัน โดยเราจะพิจารณาจากโครงสร้างของแถบพลังงานเป็นหลัก ในกรณีที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากยอดสูงสุดของแถบพลังงานวาเลนซ์ไปในแนวดิ่งตรงกับตำแหน่งต่ำสุดของแถบการนำ ซึ่งเรียกการเปลี่ยนสถานะลักษณะนี้ว่าการเปลี่ยนสถานะแบบตรงดังแสดงในรูปที่ 3.1 โดยสารกึ่งตัวนำแคดเมี่ยมซัลไฟด์มีการเปลี่ยนสถานะในลักษณะนี้ และการเปลี่ยนสถานะลักษณะแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองแบบคือ การเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดยินยอม (forbidden transition) โดยทั้งสองแบบนี้ขึ้นอยู่กับค่าออฟติคอลเมตริกอิลิเมนต์ (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ กล่าวคือถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการเปลี่ยนสถานะพลังงานชนิดยินยอม

เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบการนำ เราจะประมาณได้ว่าแถบพลังงานมีรูปร่างเป็นพาราโบลา และสามารถหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการเปลี่ยนสถานะทั้งแบบยินยอม และแบบต้องห้ามได้ดังนี้คือ

การเปลี่ยนสถานะชนิดยินยอม

$$(\alpha h\nu) = \frac{2c\hbar}{n}\left(\frac{2\mu}{\hbar^2}\right)^{\frac{3}{2}} |H_{cv}(0)|^2 (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}$$

$$\equiv A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \qquad (3.9)$$

การเปลี่ยนสถานะชนิดต้องห้าม

$$(\alpha h\nu) = \frac{2c\hbar}{n}\left(\frac{2\mu}{\hbar^2}\right)^{\frac{5}{2}} |H_{cv}(K)|^2_{K=0} (h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}}$$

$$\equiv A'(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \qquad (3.10)$$

โดยที่

μ คือ The reduced electron - hole mass

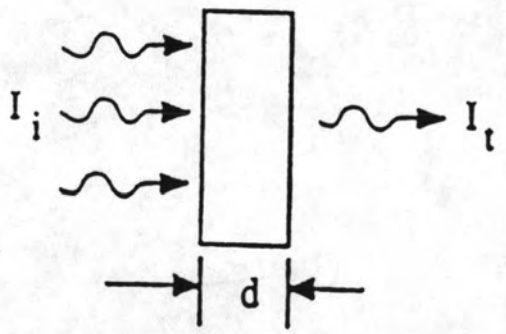
H_{cv} คือ the optical matrix element ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบการนำ

E_g คือ ช่องว่างแถบพลังงาน

$h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน

การวัดสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำในสารตัวอย่าง [14]

สำหรับในการทดลองเราสามารถจะหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำได้จากการวัดการส่งผ่านของแสง(Transmittion) ผ่านสารตัวอย่างโดยพิจารณาจากแสงที่ตกกระทบบนสารตัวอย่าง และแสงที่ทะลุผ่านซึ่งเป็นฟังก์ชั่นกับความยาวคลื่น ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แสดงไดอะแกรมการส่งผ่านแสงในสารตัวอย่าง

และค่าการสะท้อน และการส่งผ่านของแสงจะหาได้จากสมการดังนี้

$$T = \frac{I_t}{I_i} = \frac{(1-R)^2 e^{-\alpha d}}{1+R^2 e^{-2\alpha d}} \qquad (3.11)$$

$$R = \frac{I_r}{I_i} = \frac{(n-1)^2+k^2}{(n+1)^2+k^2} \qquad (3.12)$$

T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่าน

R คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อน

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

I_t คือ ความเข้มของแสงที่ส่งผ่าน

I_i คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบ

d คือ ความหนาของสารตัวอย่าง

I_r คือ ความเข้มแสงที่สะท้อน

n คือ ดัชนีหักเห

k คือ extrinction coefficient

ถ้าสารตัวอย่าง มีความหนามากพอที่ $R^2 e^{-2\alpha d}$ มีค่าน้อยกว่า 1 มาก ดังนั้นสมการที่ (3.11) จะเขียนได้ใหม่เป็น

$$T = \frac{I_t}{I_i} = (1-R)^2 e^{-\alpha d} \qquad (3.13)$$

ในการทดลองการดูดกลืนแสงนั้น การเปลี่ยนแปลงสัมประสิทธิ์การสะท้อนจะเปลี่ยนแปลงไปน้อยมากในช่วงความยาวคลื่นที่เราสนใจ ดังนั้นจะประมาณได้ว่าเทอม $(1-R)^2$ มีค่าคงที่ และสมการที่ (3.13) สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\alpha = \frac{1}{d}\ln(\frac{I_i}{I_t}) = \alpha' + \text{ค่าคงที่} \qquad (3.14)$$

ค่าคงที่ในสมการที่ (3.14) เป็นของความเข้มแสงที่สะท้อนจึงทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงสูงกว่าที่เป็นจริง ดังนั้นในการทดลองต้องนำค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงพื้นหลัง (α_0) ที่

เกิดจากความบกพร่องมาลบออกจากค่า α จึงจะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงที่ถูกต้อง ซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปยังแถบการนำเท่านั้น