บทที่ 5
คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

วัตถุประสงค์

เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ โดยเฉพาะแบบมูลฐานและการนำไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน สามารถคำนวณหรืออธิบายเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสง และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะอิสระที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการดูดกลืนแสง รวมทั้งให้มีความเข้าใจปรากฏการณ์ย้อนกลับของขบวนการดูดกลืนแสงคือ ลูมิเนสเซนส์ในสารกึ่งตัวนำ

5.1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามระนาบความถี่ ν ความยาวคลื่น λ เดินทางไปในเนื้อสารตามทิศทาง x จะมีสมการของฟังค์ชันคลื่นดังนี้

$$\psi = A \exp\left[2\pi i\nu (t - n^*x/c) \right] \qquad \text{.....(5-1)}$$

เมื่อ c เป็นความเร็วแสงในอวกาศ n^* คือดัชนีหักเหของแสงเชิงซ้อน (complex refractive index)

$$n^* = n (1 - ik)$$

โดยที่ n คือดัชนีหักเหของแสง k คือดัชนีการดูดกลืนแสง (absorption index)

สมการ (5-1) อาจเขียนได้ในเทอมของความยาวคลื่นในสาร, λ, หลังจากแทนค่า n^* แล้ว ดังนี้

$$\psi = A \exp\left[-\alpha x/2\right]\left[\exp 2\pi i\nu'(t - x/v)\right] \quad \ldots\ldots(5\text{-}2)$$

เมื่อ v คือ ความเร็วเฟส (phase velocity) = c/n, $\lambda = c/\nu n$ และ

$$\alpha = 4\pi k/\lambda = 4\pi nk/\lambda_0 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(5\text{-}3)$$

เมื่อ $\lambda_0 = c/\nu$ และ α เรียกว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง* (absorption coefficient ต่อ 1 หน่วยระยะทาง)

จากทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้า n^* จะสัมพันธ์กับค่าเพอมิตติวิตีเชิงซ้อน (complex permittivity), ε^*, โดยสมการ

$$n^* = (\varepsilon^*/\varepsilon_0)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots(5\text{-}4)$$

โดยที่นิยามของ ε^* คือ

$$\varepsilon^* = \varepsilon - i\sigma/2\pi\nu$$

---

* หนังสือบางเล่มเขียน k แทน nk และเรียก k ว่าค่าคงตัวของการดูดกลืนแสง (absorption constant)

เมื่อ ε เป็นเพอมิตติวิตี a เป็นสภาพนำไฟฟ้า และ ε_0 เป็นเพอมิตติวิตีของอวกาศ ค่า $\varepsilon/\varepsilon_0$ คือค่าคงตัวไดอิ เลคตริค (dielectric constant) นั่น เอง

สมการ (5-4) เป็นสมการอันเป็นผลจากการพิจารณาการเดินทางของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ

จากสมการ (5-4) จะได้

$$\varepsilon = \varepsilon_0 n^2 (1 - k^2) \qquad \text{.....(5-5)}$$

$$\sigma = 4\pi n^2 k v \varepsilon_0 \qquad \text{.....(5-6)}$$

และจากสมการ (5-3). (5-6)

$$\alpha = \sigma/n^2 \lambda v \varepsilon_0 \qquad \text{.....(5-7)}$$

$$a = n c \varepsilon_0$$

ปริมาณ $n^2 (1 - k^2)$ และ $2n^2 k$ มักจะถูกพลอตเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสาร ค่านี้หาได้จากการวัด สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflection coefficient) ซึ่งมีค่าดังนี้

$$R = \left[\frac{1 - n^*}{1 + n^*} \right]^2$$

หรือ $$R = \frac{(1-n)^2 + n^2k^2}{(1+n)^2 + n^2k^2} \qquad \text{.....(5-8)}$$

ค่าที่สำคัญอีกค่าหนึ่งคือ "Transmission coefficient"

$$T = \frac{(1-R^2)\exp(-4\pi x_o/\lambda_o)}{1-R^2\exp(-8s\ x_o/\lambda_o)}$$

เมื่อ x_o เป็นความหนาของสาร ค่า T และ R ในที่นี้เป็นค่าที่ใช้สำหรับกรณีแสงตกกระทบตั้งฉากกับผิวของสารตัวอย่าง

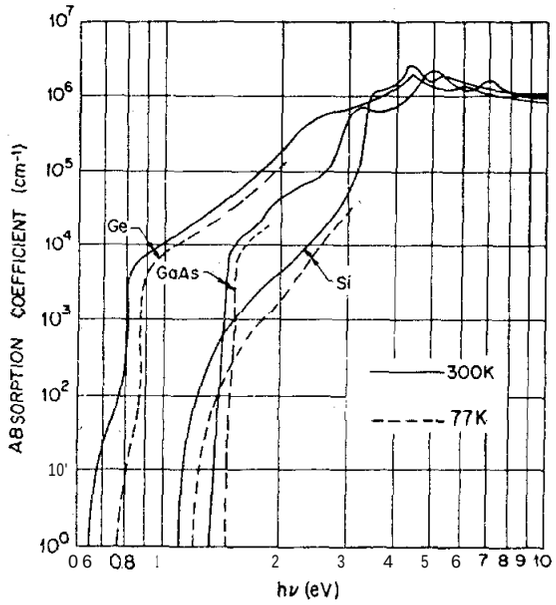
โดยการวิเคราะห์ $T - \lambda$ หรือ $R - \lambda$ จะทำให้ทราบค่า n และ k

ส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเรียกว่าสกินเดพท์ (skin depth) $\delta = (\alpha)^{-1}$ เนื่องจากความเข้มของแสงที่ตกกระทบสารและผ่านเข้าไปในเนื้อสาร ณ ตำแหน่งใดๆ นับจากผิวลึกลงไปเป็นระยะทาง x เป็นไปตามสมการ

$$I(x) = I(o)\ e^{-\alpha x}$$

ดังนั้น $\frac{1}{\alpha}$ หรือ δ จึงเป็นระยะทางที่แสงเดินทางเข้าไปในเนื้อสารก่อนที่จะจางหายไป

การวัดทางแสงเป็นวิธีที่สำคัญมากในการศึกษาถึงโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเลคตรอนไปสู่ระดับพลังงานใหม่ทำให้สามารถวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานได้ นอกจากนี้การวัดทางแสงยังใช้ศึกษาเรื่องราวของการสั่นไหวของแลททิสหรือโฟนอนได้อีกด้วย เนื่องจากการเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานบางขบวนการจะมีโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้องด้วย



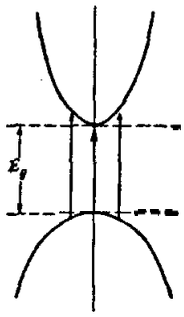
รูป 5.1 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ Ge, Si และ Ga As

5.2 ขบวนการดูดกลืนแสงมูลฐานและช่องว่างแถบพลังงาน

ขบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำที่สำคัญที่สุดคือขบวนการซึ่งทำให้เกิดทรานซิชัน (transition) ของอิเลคตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ คือเป็น "interband transition" เนื่องจากความสำคัญของมันเราจะเรียกขบวนการดูดกลืนแสงนี้ว่า การดูดกลืนมูลฐาน (fundamental absorption) ในขบวนการนี้ อิเลคตรอนดูดกลืนโฟตอนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ตกกระทบและโลดจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบความนำ พลังงานของโฟตอนในขบวนการนี้จะต้องเท่ากับ E_g หรือมากกว่า นั่นคือถ้าโฟตอนมีความถี่ ν

$$h\nu \geq E_g \qquad \text{. . . . . (5-9)}$$

ความถี่ $v_0 = E_g/h$ เรียกว่า "absorption edge"



รูป 5.2 การดูดกลืนมูลฐานของสารกึ่งตัวนำแบบไดเรค-แกพ

ในขบวนการดูดกลืนแสง พลังงาน และโมเมนตัมของอิเลคตรอนรวมกับโฟตอนจะต้องอนุรักษ์ (conserved) นั่นคือ

$$E_f = E_i + hv \qquad \text{.....(5-10)}$$

$$\vec{k}_f = \vec{k}_i + \vec{q} \qquad \text{.....(5-11)}$$

เมื่อ E_i และ E_f เป็นพลังงานของอิเลคตรอนก่อนและหลังการดูดกลืนแสง ส่วน $\vec{k}$ เป็นโมเมนตัม (จริงๆ คือเวกเตอร์คลื่น) ของอิเลคตรอน $\vec{q}$ เป็นเวกเตอร์คลื่นของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนและเนื่องจาก q มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ k ดังนั้นสมการ (5-11) จึงอาจเขียนใหม่เป็น

$$\vec{k}_f = \vec{k}_i \qquad \text{.....(5-12)}$$

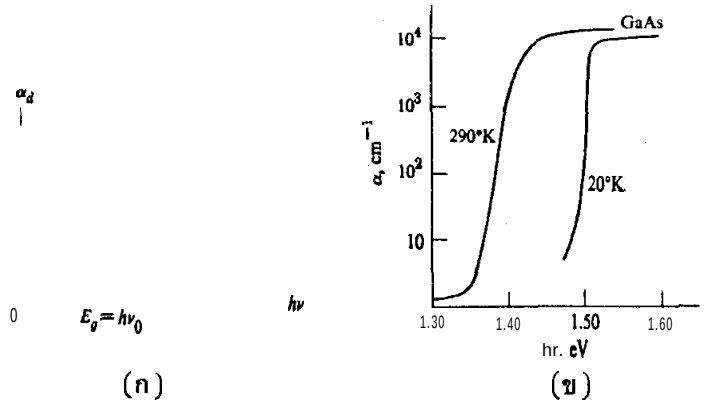
นั่นคือ ทรานซิชันของอิเลคตรอนที่จะเกิดขึ้นได้ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำจะต้องอยู่ในแนวดิ่งของ เค-สเปส เท่านั้น (รูป 5.2) ในกรณีที่ทรานซิชันเป็นไปตามสมการ (5-12) ซึ่งเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบ "ไดเรค-แกพ direct-gap" (ซึ่ง เป็นสารกึ่งตัวนำที่โครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะดังนี้คือ $\vec{k}$ ต่ำสุดของแถบความนำกับ $\vec{k}$ สูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ที่ $\vec{k} = 0$ ดังรูป 5.2) จะได้ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงอยู่ในฟอร์ม

$$\alpha_d = A\,(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \qquad \text{.....(S-13)}$$

เมื่อ A เป็นค่าคงที่ซึ่งขึ้นกับคุณสมบัติของโครงสร้างแถบพลังงาน E_g เป็นค่าพลังงานของช่องว่างแถบพลังงาน d หมายถึงไดเรค-แกพ

ตามสมการ (5-13) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นอย่างพาราโบลากับความถี่เมื่อความถี่มากกว่า ν_o และสำหรับ $\nu < \nu_o$ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะเป็นศูนย์ (รูป 5.3 ก) GaAs เป็นสารกึ่งชนิดตัวนำแบบไดเรค-แกพ ชนิดหนึ่ง ผลการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง แสดงไว้ในรูป 5.3 (ข) ซึ่งสอดคล้องกับสมการ (5-13)

ความสำคัญของเรื่องการดูดกลืนแสงต่อช่องว่างแถบพลังงานก็คือ ใช้ในการวัดค่าช่องว่างแถบพลังงาน E_g เนื่องจากที่ "absorption edge" คือจุดที่พลังงานของโฟตอนมีค่าเท่ากับ E_g หรือ $h\nu_o = E_g$ นั่นเอง ปัจจุบันวิธีการนี้เป็นวิธีมาตรฐานของการวัดช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ แทนวิธีการเดิมซึ่งวัดจากความชันของสภาพนำไฟฟ้า นอกจากนี้วิธีการใหม่ยังจะสะดวกและเที่ยงตรงกว่าทั้งยังให้รายละเอียดเกี่ยวกับโครงสร้างแถบพลังงานมากกว่าอีกด้วย



รูป 5.3 พลอตของ α_d กับ hv สำหรับสารกึ่งตัวนำแบบไดเรค-แกพ (n) และของ GaAs (ข)

ขบวนการดูดกลืนแสงซึ่งเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบ ไดเรค-แกพ นี้ ตอนล่างสุดของแถบความนำอยู่ที่ $\vec{k} = 0$ และอยู่ตรงขึ้นไปเหนือตอนบนสุดของแถบวาเลนซ์นั่นเอง อิเลคตรอนที่อยู่บริเวณใกล้ๆ บนสุดของแถบวาเลนซ์จะเกิดทรานซิชันขึ้นไปยังตอนล่างของแถบความนำเมื่อได้รับพลังงานที่พอเพียง ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำพวกนี้ได้แก่ GaAs InSb และสารประกอบกึ่งตัวนำกลุ่ม สาม-ห้า และ สอง-หก อื่นๆ อีกหลายชนิด

สารกึ่งตัวนำบางชนิดจะเป็นอินไดแรค-แกพ (indirect-gap) สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ตอนล่างของแถบความนำไม่ได้อยู่ที่ $\vec{k} = 0$ (รูป 5.4 ก) Si และ Ge เป็นสารกึ่งตัวนำประเภท