บทที่ 5
คุณสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

วัตถุประสงค์

เพื่อให้มีความเข้าใจเกี่ยวกับเรื่องการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ โดยเฉพาะแบบมูลฐานและการนำไปหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน สามารถคำนวณหรืออธิบายเกี่ยวกับค่าสัมประสิทธิการดูดกลืนแสง และสามารถคำนวณหาความหนาแน่นของพาหะอิสระที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการดูดกลืนแสง รวมทั้งให้มีความเข้าใจปรากฏการณ์ย้อนกลับของขบวนการดูดกลืนแสงคือ ลูมิเนสเซนส์ในสารกึ่งตัวนำ

5.1 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าตามระนาบความถี่ ν ความยาวคลื่น λ เดินทางไปในเนื้อสารตามทิศทาง x จะมีสมการของฟังค์ชันคลื่นดังนี้

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

เมื่อ c เป็นความเร็วแสงในอวกาศ n^* คือดัชนีหัก เหของแสง เชิงซ้อน (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

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

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

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

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

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) เป็นสมการอัน เป็นผลจากการพิจารณาการ เดินทางของคลื่นแม่ เหล็ก ไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ

จากสมการ (5-4) จะได้

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

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

และจากสมการ (5-3). (5-6)

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

$$a = n c \varepsilon_0$$

ปริมาณ $n^2 (1 - k^2)$ และ $2n^2 k$ มักจะถูกพลอต เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางแสงของสาร 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

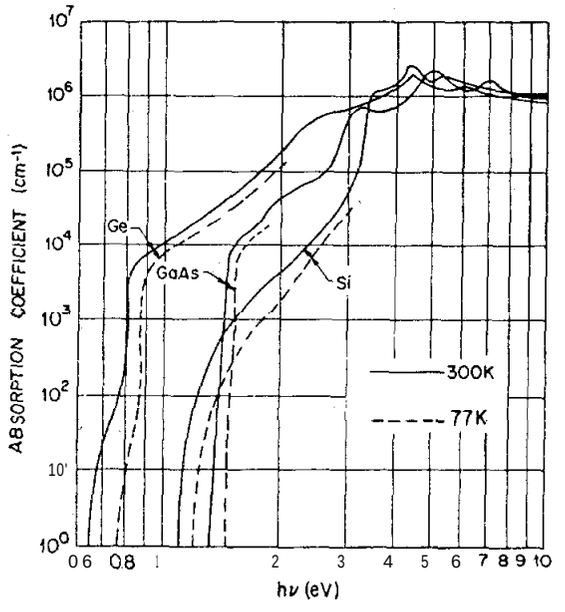
โดยการวิเคราะห์ $T - \lambda$ หรือ $R - \lambda$ จะทำให้ทราบค่า n และ k

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



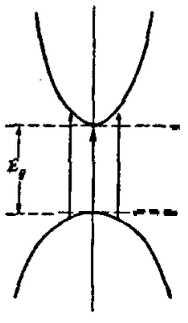
รูป 5.1 การวัดค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของ Ge, Si และ Ga As

5.2 ขบวนการดูดกลืนแสงมูลฐานและช่องว่างแถบพลังงาน

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

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

ความถี่ $\nu_0 = E_g/h$ เรียกว่า "absorption edge"



รูป 5.2 การดูดกลืนมูลฐานของสารกึ่งตัวนำแบบไดเรค-แกพ

ในขบวนการดูดกลืนแสง พลังงาน และโมเมนตัมของอิเลคตรอนรวมกับโฟตอนจะต้องอนุรักษ์ (conserved) นั่นคือ

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

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

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

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

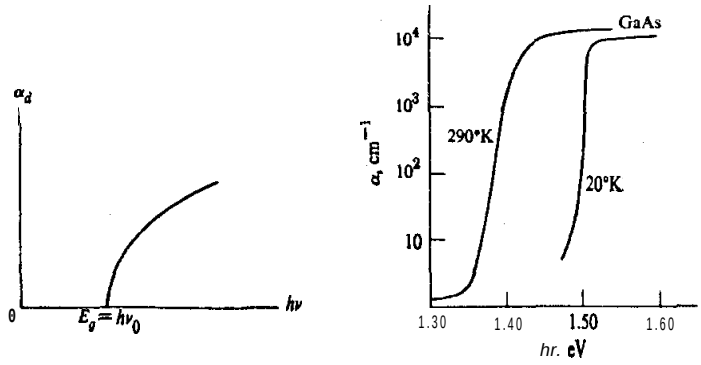
นั่นคือ ทรานซิชันของอิเลคตรอนที่จะเกิดขึ้นได้ระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบความนำจะต้องอยู่ในแนวดิ่งของ เค-สเปส เท่านั้น (รูป 5.2) ในกรณีที่ทรานซิชันเป็นไปตามสมการ (5-12) ซึ่งเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบ "ไดเรค-แกพ direct-gap" (ซึ่ง เป็นสารกึ่งตัวนำที่โครงสร้างแถบพลังงานมีลักษณะดังนี้คือ $\vec{k}$ ต่ำสุดของแถบความนำกับ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



(ก) (ข)

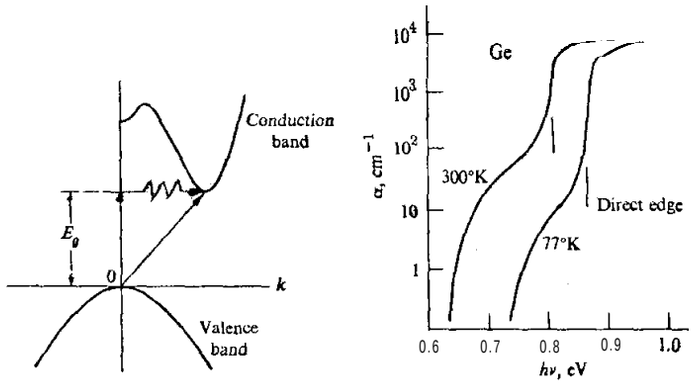
รูป 5.3 พลอตของ α_d กับ hv สำหรับสารกึ่งตัวนำแบบไดเรค-แกพ (ก) และของ GaAs (ข)

เนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมีค่าน้อย คืออยู่ในช่วง 1 eV ดังนั้น ν_0 จึงมักอยู่ในย่านอินฟราเรด ด้วยเหตุนี้สเปคตรัมย่านอินฟราเรดจึงได้รับการศึกษาเพิ่มขึ้นอย่างมากจากการวิจัยทางด้านแสงของสารกึ่งตัวนำ การพัฒนาเกี่ยวกับเครื่องวัดรังสีอินฟราเรดที่มีประสิทธิภาพสูงนับเป็นหนึ่งในบรรดาสิ่งประดิษฐ์ที่เป็นประโยชน์หลายๆ อย่าง ซึ่งเกิดขึ้นจากงานวิจัยเหล่านี้

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

นี้ Si มีจุดต่ำสุดของแถบความนำในทิศ [100] และ Ge อยู่ในทิศ [111] (ดูบทที่ 9 เพิ่มเติม) ในกรณีนี้อิเลคตรอนไม่สามารถจะเกิดทรานซิชันโดยตรงจากตอนบนสุดของแถบวาเลนซ์ไปสู่ตอนล่างสุดของแถบความนำได้ เนื่องจากขัดกับกฎการทรงของโมเมนตัม



รูป 5.4 แถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบอินไดเรค-แกพ (ก) และพลอตของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับ hν ของ Ge (ข)

ทรานซิชันของอิเลคตรอนในสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ เกิดขึ้นได้ด้วยขบวนการ 2 ขั้นตอนคือ อิเลคตรอนจะดูดกลืนทั้งโฟตอนและโฟนอนพร้อมๆ กัน โดยโฟตอนจะเป็นตัวให้พลังงานที่จำเป็นต้องใช้ในการข้ามช่องว่างแถบพลังงาน และโฟนอนให้โมเมนตัมที่อิเลคตรอนต้องการดังภาพ (พลังงานของโฟนอนซึ่งมีค่าประมาณ 0.05 eV มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับพลังงานของโฟตอน จึงสามารถตัดทิ้งไปได้)

โดยทั่วไปเราจะพบสารกึ่งตัวนำแบบอินไดเรค-แกพ มากกว่าพวกไดเรค-แกพ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำแบบอินไดเรค-แกพ มีสูตรดังนี้

$$\alpha_i = A'(T)\ (h\nu - E_g)^2 \qquad \text{.....(5-14)}$$

เมื่อ A' (T) เป็นค่าคงที่ซึ่งเกี่ยวพันกับโครงสร้างแถบพลังงานและอุณหภูมิ สำหรับอุณหภูมิเข้ามาเกี่ยวข้องเนื่องจากมีโฟนอนเข้ามาร่วมในขบวนการเกิดทรานซิชันด้วย

จะเห็นว่า α_i เพิ่มขึ้นด้วยกำลัง 2 ของ $(h\nu - E_g)$ เร็วกว่ากำลัง 1/2 ของ α_d มาก ดังนั้นจากการวัดสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงและดูการเพิ่มขึ้นเทียบกับ $h\nu$ จะสามารถแยกสารกึ่งตัวนำได้ว่าเป็นแบบไดเรค-แกพ หรือ อินไดเรค-แกพ ซึ่งนับว่าเป็นการได้เปรียบวิธีการทางไฟฟ้า (จากการวัดสภาพนำไฟฟ้า) อีกประการหนึ่ง รูป 5.4 (ข) แสดง α_i เทียบกับ $h\nu$ ของ Ge

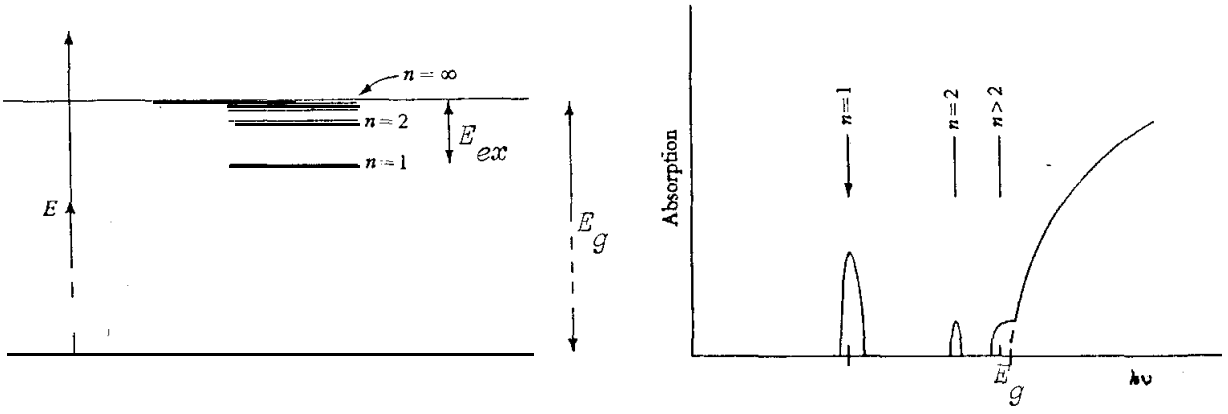
5.3 ขบวนการดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอน

ในหัวข้อที่แล้วได้อธิบายการดูดกลืนแสงโดยคิดว่าการดูดกลืนทำให้เกิดอิเลคตรอนอิสระในแถบความนำและทิ้งโฮลอิสระไว้ในแถบวาเลนซ์เช่นกัน แต่เนื่องจากว่าอิเลคตรอนและโฮลดึงดูดกัน ดังนั้นจึงมีโอกาสที่อิเลคตรอนและโฮลจะฟอร์ม "bounded state" ซึ่งอนุภาคทั้งสองโคจรรอบซึ่งกันและกันหรือรอบจุดศูนย์กลางมวลนั่นเอง

พลังงานยึดเหนี่ยวของเอ็กซิตอนมีค่าน้อยคือประมาณ 0.01 eV ระดับเอ็กซิตอนจึงอยู่ต่ำจากแถบความนำลงมาเล็กน้อยบริเวณเดียวกับระดับโดเนอร์นั่นเอง (รูป 5.5) พลังงานของโฟตอนที่ใช้ในการดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอนมีรูปดังนี้

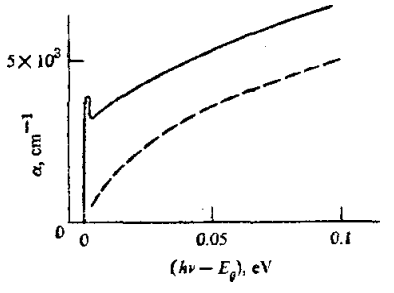
$$h\nu = E_g - E_{ex} \qquad \text{.....(5-15)}$$

เมื่อ E_{ex} คือพลังงานยึดเหนี่ยวของเอ็กซิตอน ดังนั้นสเปคตรัมการดูดกลืนของเอ็กซิตอนจึงเป็น



รูป 5.5 ระดับเอ็กซิตอนและการดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอน

เส้นก่อนถึง "absorption edge" เล็กน้อย เส้นสเปคตรัมนี้มักจะถูกทำให้กว้างหรือขยายออกจากการที่มันเกิดอันตรกริยากับอะตอมเจือปนหรือสิ่งอื่นๆ และอาจจะกลมกลืนหายไปกับสเปคตรัมของการดูดกลืนมูลฐาน มีบางครั้งเหมือนกันที่พีค (peak) ของเอ็กซิตอนเห็นได้อย่างชัดเจน การดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอนใน Ge แสดงไว้ดังรูป 5.6

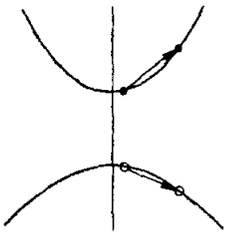


รูป 5.6 การดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอนใน Ge เส้นไข่ปลาแสดงการดูดกลืนมูลฐานจากทฤษฎี เส้นทึบเป็นผลการทดลอง ($T = 20^{\circ}K$)

การดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอนทำให้สเปคตรัมของการดูดกลืนมูลฐานซับซ้อนมากขึ้นโดยเฉพาะใกล้ๆ "absorption edge" ทำให้การพิจารณาค่า E_g ยุ่งยากมากขึ้น

5.4 การดูดกลืนแสงของพาหะอิสระ

พาหะอิสระ คือ ทั้งอิเลคตรอนในแถบความนำ และโฮลในแถบวาเลนซ์ ดูดกลืนแสงโดยไม่โลดขึ้นไปยังแถบพลังงานอื่น เพียงแต่เปลี่ยนสถานะไปสู่สถานะอื่นที่มีพลังงานสูงขึ้นในแถบพลังงานเดิมดังรูป 5.7 ขบวนการนี้คือ การดูดกลืนแสงของพาหะอิสระ (free - carrier absorption) ซึ่งเป็น "intraband transition"

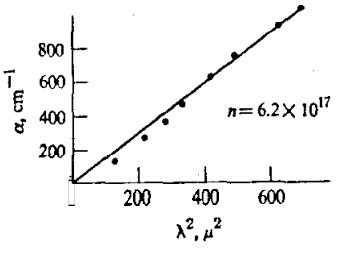


รูป 5.7 การดูดกลืนแสงของพาหะอิสระ

การดูดกลืนแสงแบบนี้เกิดขึ้นได้แม้ว่า $h\nu$ จะมีค่าน้อยกว่า E_g และเป็นขบวนการเด่น (dominance) ในสเปคตรัมของการดูดกลืนแสงที่ความถี่ต่ำกว่า "fundamental edge" สำหรับที่ $h\nu$ มากกว่าหรือเท่ากับ E_g การดูดกลืนแสงทั้ง 2 แบบคือ ของพาหะอิสระและแบบมูลฐานเกิดขึ้นพร้อมๆ กันไป การคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของพาหะอิสระในบางกรณีคือ ความถี่สูงและสารมีสภาพนำไฟฟ้าต่ำ จะได้

$$\alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon_0 \, cn \, \tau^2} \cdot \frac{1}{\omega^2} \qquad \ldots\ldots\ldots (5\text{-}16)$$

นั่นคือ α แปรผันกับ ω^{-2} หรือ λ^2 รูป 5.8 แสดงผลการทดลองการวัด α เทียบกับ λ^2 ของ InSb ชนิดเอ็น

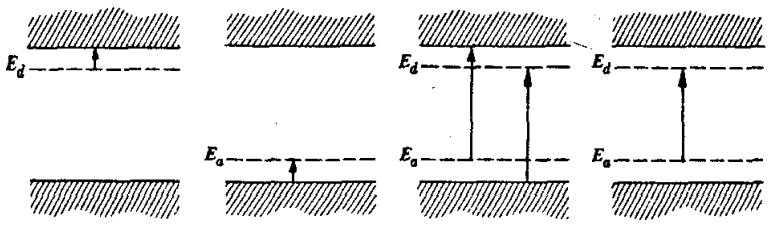


รูป 5.8 α ของพาหะอิสระเทียบกับ λ^2 ใน InSb ชนิดเอ็น

5.5 การดูดกลืนแสงเมื่อมีสารเจือ

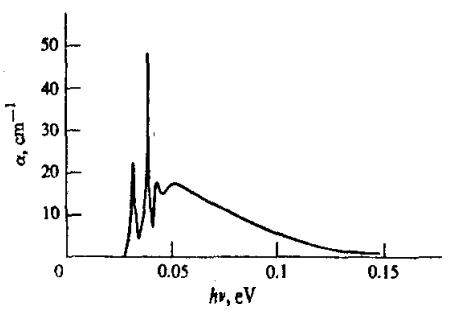
การดูดกลืนแสงเนื่องจากสารเจือ เกิดขึ้นเสมอในสารกึ่งตัวนำ ชนิดและปริมาณของการดูดกลืนขึ้นกับชนิดของสารเจือและความเข้มข้นของการโดป รูป 5.9 แสดงลักษณะทรานซิชันที่สำคัญๆ ของขบวนการดูดกลืนดังกล่าว

รูป 5.9 (ก) แสดงกรณีของโดเนอร์ซึ่งเป็นกลาง ดูดกลืนโฟตอนและอิเลคตรอนเกิดทรานซิชันไปสู่ระดับพลังงานสารเจือที่สูงกว่า หรือขึ้นไปสู่แถบความนำ ทรานซิชันไปสู่ระดับ



รูป 5.9 ขบวนการดูดกลืนแสงแบบต่างๆ เนื่องจากสารเจือ

พลังงานสารเจือที่สูงกว่าให้เส้นสเปคตรัมที่คม (sharp line) ในสเปคตรัมของการดูดกลืนแสง รูป 5.9 (ข) แสดงทรานซิชันจากแถบวาเลนซ์ไปยังแอคเซพเตอร์ซึ่งเป็นกลาง ซึ่งคล้ายๆ กับกรณีแรก รูป 5.10 แสดงสเปคตรัมของการดูดกลืนแสงในการเกิดทรานซิชันของอิเลคตรอนจากแถบวาเลนซ์ ไปสู่แอคเซพเตอร์ของซิลิคอนชนิดพี



รูป 5.10 α พลอตเทียบกับ hν ของ Si โดปด้วย B

การดูดกลืนกรณีดังกล่าว $h\nu \sim 0.01$ eV นั่นคือเป็นย่านฟาร์อินฟราเรด (far infrared) ดังนั้นขบวนการดังกล่าวจึงเป็นหลักการของเครื่องวัดแสงในย่านฟาร์อินฟราเรด (ซึ่งค่อนข้างจะตรวจวัดได้ยาก) และยังเป็นเทคนิคในการบ่งบอกถึงชนิดของสารเจือได้อีกด้วย ส่วนรูป 5.9 (ค) แสดงขบวนการซึ่งอิเลคตรอนจากแถบวาเลนซ์โลดขึ้นไปยังไอออไนซ์ไดเนอร์ (ไดเนอร์เกิดการไอออไนซ์เนื่องจากถ้า $h\nu$ มีค่ามากพอที่จะทำให้อิเลคตรอนจากแถบวาเลนซ์โลดขึ้นไปยังระดับไดเนอร์ได้ ก็แสดงว่ามากเกินพอสำหรับอิเลคตรอนจากระดับไดเนอร์จะโลดขึ้นไปสู่แถบความนำ) และจากไอออไนซ์แอคเซพเตอร์ไปสู่แถบความนำ ขบวนการนี้จะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงที่ความถี่ใกล้ชิดกับการดูดกลืนมูลฐานมากจนกระทั่งแยกกันไม่ค่อยออก รูป 5.9 (ง) แสดงการดูดกลืนแสงจากไอออไนซ์แอคเซพเตอร์ไปสู่ไอออไนซ์ไดเนอร์พลังงานของโฟตอนในกรณีนี้คือ

$$h\nu = E_g - E_d - Ea \qquad \text{.....(5-17)}$$

ซึ่งอยู่ใกล้ชิดกับ “absorption edge” ของการดูดกลืนมูลฐานเช่นกัน

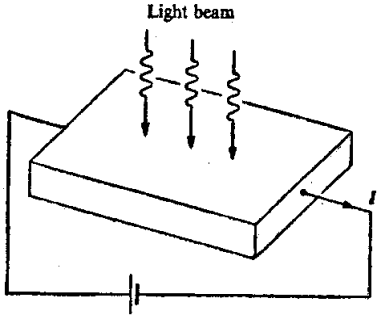
นอกจากสารเจือจะมีผลต่อสเปคตรัมของการดูดกลืนแสงโดยตรงดังที่กล่าวแล้ว ยังมีผลทางอ้อมอีกด้วย เช่น เอ็กซิตอนถูกแทรปโดยสารเจือ คืออะตอมของสารเจืออาจจะแทรปอิเลคตรอนและดึงดูดโฮลไว้ด้วยแรงคูลอมบ์ ดังนั้นอิเลคตรอนและโฮลคู่นี้จึงถูกแทรปด้วยอะตอมของสารเจือแต่ยังไม่เกิดการรวมตัวกันใหม่ คือเป็นเอ็กซิตอนที่ถูกแทรปไว้ สเปคตรัมการดูดกลืนแสงของเอ็กซิตอนในลักษณะนี้จะต่างไปจากเอ็กซิตอนอิสระ

5.6 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสง

ปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสง (photoconductivity) เกิดเมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำและทำให้สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากอิเลคตรอนดูดกลืนโฟตอนแล้ว

ไลดข้ามช่องว่างแถบพลังงาน ทำให้จำนวนพาหะนำประจุมีค่ามากขึ้นทั้งอิเลคตรอนและโฮล อุปกรณ์วัดแสงจากสารกึ่งตัวนำอาศัยเรื่องนี้เป็นหลักสำคัญอย่างหนึ่ง รูป 5.11 แสดงการทดลองเรื่องสภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสง คือมีกระแสไฟฟ้า I ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังภาพ ก่อนแสงตกกระทบสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในฟอร์ม

$$\sigma_0 = e (n_o \mu_e + p_o \mu_h) \qquad \text{.....(5-18)}$$



รูป 5.11 การทดลองเรื่องสภาพนำไฟฟ้าจากแสง

เมื่อ n_o และ p_o เป็นความหนาแน่นของพาหะนำประจุที่สภาวะสมดุล σ_o เป็นสภาพนำไฟฟ้าในที่มืด เมื่อมีแสงมากระทบสารกึ่งตัวนำพาหะนำประจุจะเพิ่มขึ้นด้วยปริมาณ Δn และ Δp และกระแสจะเพิ่มขึ้น ในกรณีนี้ $\Delta n = \Delta p$ เนื่องจากอิเลคตรอนและโฮลเกิดขึ้นเป็นคู่ๆ ในขบวนการดูดกลืนแสง สภาพนำไฟฟ้าเมื่อมีแสงจะอยู่ในรูป

$$\sigma = \sigma_o + e\Delta n (\mu_e + \mu_h) = \sigma_o + e\Delta n \mu_h (1 + b) \text{ . . . . . .(5-19)}$$

da $b = \mu_e/\mu_h$ ดังนั้น $(\Delta\sigma)/\sigma_0$ หรือ "relative increase ของ σ " จึงมีค่า

$$\frac{AU}{a_0} \approx \frac{\Delta n\, \mu_h\, (1 + b)}{a_0} \qquad \text{.....(5-20)}$$

เราจะคำนวณหาค่า Δn คือเมื่อเกิดการดูดกลืนแสงจะเกิดพาหะส่วนเกินขึ้นและสารจะเข้าสู่สภาวะไม่สมดุล n จะเปลี่ยนแปลงไปกับเวลา จากสาเหตุ 2 ประการคือ (1) พาหะนำประจุถูกสร้าง (created) อย่างต่อเนื่องจากแสงที่ตกกระทบ (2) พาหะส่วนเกินจะถูกทำลาย (annihilated) อย่างต่อเนื่องเช่นกันโดยขบวนการรวมตัวกันใหม่ ขบวนการรวมตัวกันใหม่จะเกิดขึ้นเมื่อความหนาแน่นของพาหะนำประจุแตกต่างไปจากค่าที่สภาวะสมดุล การเปลี่ยนแปลงของความหนาแน่นของอิเลคตรอนกับเวลา จึงสามารถเขียนได้ดังนี้

$$\frac{dn}{dt} = g - \frac{n - n_0}{\tau'} \qquad \text{.....(5-21)}$$

เมื่อ g คืออัตราการเกิด (generation) ของอิเลคตรอนต่อ 1 หน่วยปริมาตรของสารกึ่งตัวนำจากการดูดกลืนแสง และเทอมที่สองทางขวาคืออัตราการรวมตัวกันใหม่ของอิเลคตรอน τ' คือ "recombination time" ซึ่งก็คือช่วงชีวิตของพาหะนำประจุอิสระนั่นเอง ในสภาวะคงที่หรือคงตัว $dn/dt = 0$ ดังนั้น $\Delta n = n - n_o$ จึงมีค่าดังนี้

$$\Delta n = g\tau' \qquad \text{.....(5-22)}$$

ให้ d เป็นความหนาของแผ่นสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น $\propto d$ คืออัตราส่วนของกำลัง (power) ของแสงที่ถูกดูดกลืนไว้ในแผ่นสารกึ่งตัวนำดังนิยามของค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ถ้า $N(\omega)$ เป็นจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบสารต่อ 1 หน่วยเวลา จะได้จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนต่อ 1 หน่วยเวลาเป็น $\propto dN(\omega)$ และเนื่องจากการดูดกลืนโฟตอน 1 ตัวจะทำให้เกิดอิเลคตรอนและโฮล 1 คู่เช่นกัน ดังนั้น

$$g = \frac{\propto d N(\omega)}{V} \qquad \text{.....(5-23)}$$

เมื่อ V เป็นปริมาตรของแผ่นสารกึ่งตัวนำ

จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ $N(\omega)$ สัมพันธ์กับความเข้ม $I(\omega)$ ดังนี้

$$N(\omega)\hbar\omega = I(\omega)A \qquad \text{.....(5-24)}$$

เมื่อ A เป็นพื้นที่ของแผ่นสารกึ่งตัวนำ $I(\omega)A$ คือกำลังของแสงที่ตกกระทบ $\hbar\omega$ คือพลังงานของแต่ละโฟตอน จากสมการ (5-22) - (5-24) จะได้

$$\Delta n = \frac{\propto I(W)\ \tau'}{\hbar\omega} \qquad \text{.....(5-25)}$$

แทนค่าในสมการ (5-20)

$$\frac{\Delta\sigma}{\sigma_o} = \frac{\propto I(\omega)\ \tau'\ \mu_h\ (1 + b)}{\hbar\omega\sigma_o} \qquad \text{.....(5-26)}$$

จะเห็นว่า $\Delta\sigma/\sigma_o$ ขึ้นกับ $I(\omega)$ และ $\propto$ ถ้าแทนค่าโดยทั่วๆ ไปคือ $\tau' = 10^{-4}$ s, $I = 10^{-4}$ watt/cm^2, $\hbar\omega = 0.7$ eV (สำหรับ Ge และ $\hbar\omega$ ต้องมากกว่าหรือเท่ากับ E_g) จะได้ $\Delta n \simeq 5 \times 10^{14}$ cm^{-3} ซึ่งมีค่าสูงมากทีเดียว

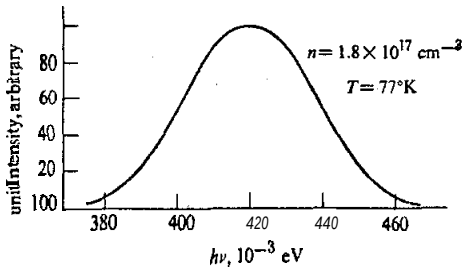
ที่กล่าวมาทั้งหมดเป็นทฤษฎีเชิงอุดมคติ เพราะไม่ได้คิดผลจากสิ่งอื่นๆ อีกหลายอย่าง เช่น ไม่ได้คิดการรวมตัวกันใหม่บริเวณผิว เป็นต้น

5.7 ลูมิเนสเซนซ์

ในขบวนการดูดกลืนแสง เมื่ออิเลคตรอนดูดกลืนโฟตอนจะเกิดการเปลี่ยนสถานะทำให้การกระจายของอิเลคตรอนไม่สมดุล ผลก็คืออิเลคตรอนจะต้องเปลี่ยนสถานะหรือตกกลับไปสู่ยังสถานะที่มีพลังงานต่ำกว่า คือเกิดการรวมตัวกันใหม่และปล่อยแสงออกมา การปล่อยแสงนี้เองที่เรียกว่าลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) ดังนั้นลูมิเนสเซนซ์จึงเป็นขบวนการกลับกันกับขบวนการดูดกลืนแสง เนื่องจากลักษณะการดูดกลืนแสงมีด้วยกันหลายรูปแบบดังที่กล่าวในหัวข้อที่แล้ว ดังนั้นลูมิเนสเซนซ์ก็มีจุดกำเนิดหลายรูปแบบเช่นกัน

ลูมิเนสเซนซ์อาจเกิดขึ้นโดยไม่ต้องอาศัยขบวนการดูดกลืนแสงก็ได้ เช่นการกระตุ้น (excitation) โดยกระแสไฟฟ้าใน พี-เอ็นจังค์ชัน (ดูบทที่ 6) ซึ่งเรียกว่าอิเลคโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) ส่วนการกระตุ้นโดยแสงในลักษณะดังหัวข้อที่ผ่านๆ มาจะได้โฟโตลูมิ-เนสเซนซ์ (photoluminesconce) ถ้ากระตุ้นจากลำอิเลคตรอน (electron beam) ที่มีพลังงานสูงก็เรียกว่า คาโธโดลูมิเนสเซนซ์ (cathodoluminescence) สำหรับการกระตุ้นจากความร้อนและเปล่งแสงออกมา คือ อินแคนเดสเซนซ์ (incandescence) ลูมิเนสเซนซ์ซึ่งเกิดขึ้นขณะเดียวกับการกระตุ้นเรียกว่า ฟลูเรสเซนซ์ (fluorescence) ส่วนลูมิเนสเซนซ์หลังจากการกระตุ้นช่วงเวลาหนึ่ง เรียกว่า ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence)

ขบวนการที่ทำให้เกิดลูมิเนสเซนซ์ ก็คือขบวนการแบบเดียวกับขบวนการดูดกลืนแสงที่กล่าวถึงในหัวข้อที่แล้วๆ มานั่นเอง เพียงแต่เกิดในทิศทางตรงกันข้ามและแทนที่จะดูดกลืนโฟตอนก็กลับคายโฟตอนออกมา ขบวนการที่สำคัญที่สุดก็คือ ทรานซิชันจากแถบความนำไปสู่แถบวาเลนซ์ รูป 5.12 แสดงสเปคตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ InAs ชนิดเอ็น ซึ่งมีรูปร่างขยายกว้างออกตามลักษณะความหนาแน่นของสถานะในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ลูมิเนสเซนซ์จากเอ็กซิตอน, สารเจือกับแถบพลังงาน, โดเนอร์กับแอคเซพเตอร์ และจากพาหะอิสระ ก็ได้รับการศึกษาและตรวจวัดด้วย



รูป 5.12 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ InAs ชนิดเอ็น จากการรวมตัวกันใหม่ของอิเลคตรอนและโฮล

การศึกษาและจัดคุณลักษณะของลูมิเนสเซนซ์เหล่านี้ในสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ นับเป็นเรื่องสำคัญในงานวิจัยเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำ งานวิจัยเหล่านี้ส่งผลสำคัญต่อการประยุกต์ทางเทคโนโลยี อนุกลที่ใช้หลักการของลูมิเนสเซนซ์ที่รู้จักกันดีก็คือจอทีวี ภาพที่เห็นเกิดจากลูมิเนสเซนซ์ของสารที่ฉาบไว้ซึ่งถูกกระตุ้นโดยลำอิเลคตรอน นอกจากนี้ก็มีเลเซอร์ซึ่งเปล่งแสงโคเฮียเรนท์ โดยการกระตุ้นจากกระแสไฟฟ้าของพี-เอ็นจังค์ชันและทรานซิชันเกิดระหว่างแถบความนำกับแถบวาเลนซ์, LED ฯลฯ รายละเอียดเรื่องนี้จะได้กล่าวถึงในบทที่ 6

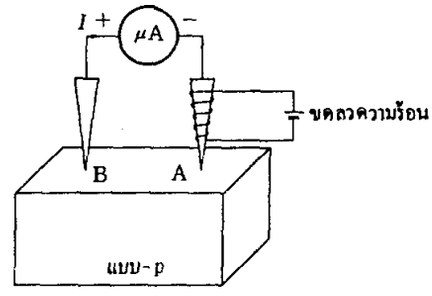
5.8 การวัดค่าต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำ

เรื่องต่อไปจะเป็นการวัดค่าต่างๆ ของสารกึ่งตัวนำที่สำคัญบางค่า โดยเน้นลักษณะการวัดในเชิงปฏิบัติ

5.8.1 การวัดเพื่อหาชนิดของสารกึ่งตัวนำ

วิธีง่ายๆ ในการวัดเพื่อที่จะได้ทราบว่าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพีหรือเอ็น หรือเพื่อที่จะได้ทราบชนิดของพาหะนำประจุเอก สามารถวัดได้ดังแสดงในรูป 5.13 ซึ่ง B และ A เป็นเข็ม

โลหะ เข็ม A มีขดลวดความร้อนพันไว้โดยรอบ (โดยมีฉนวนหุ้มเข็มส่วนนั้นไว้) ถ้าจัดอุปกรณ์ดังรูปและสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดพีจะมีกระแสไฟฟ้าจากเข็ม B ผ่านแอมมิเตอร์ไปสู่เข็ม A ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดเอ็นจะได้ผลตรงกันข้าม เหตุผลในเรื่องนี้ก็คือถ้าสารตัวอย่างเป็นชนิดพีพาหะนำประจุส่วนใหญ่จะเป็นโฮล เมื่อเข็ม A ร้อน เนื่อสารบริเวณใต้เข็ม A จะร้อนกว่าที่อื่นๆ ทำให้โฮลบริเวณนั้นแพร่ออกไปจนกระทั่งถึงเข็ม B และทำให้เกิดกระแสเนื่องจากการแพร่ขึ้นดังกล่าว

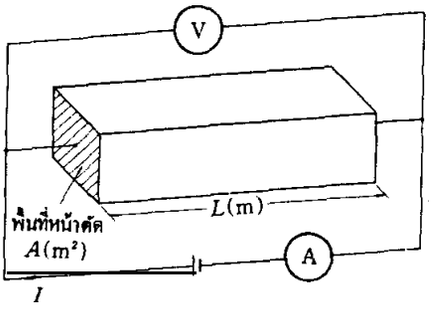


รูป 5.13 การวัดเพื่อหาชนิดของสารกึ่งตัวนำ

5.8.2 <u>การวัดสภาพนำไฟฟ้า และค่าช่องว่างแถบพลังงาน</u>

สภาพนำไฟฟ้าและสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่งเป็นส่วนกลับ สามารถวัดได้โดยจัดอุปกรณ์ดังรูป 5.14 ซึ่งแท่งสารกึ่งตัวนำรูปสี่เหลี่ยมมีพื้นที่หน้าตัด A ตารางเมตร ยาว L เมตร กระแสไฟฟ้าวัดได้ I แอมแปร์ และความต่างศักดาไฟฟ้าคร่อมแท่งสารกึ่งตัวนำดังรูปมีค่า V โวลต์ บริเวณแรเงาเป็นผิวสัมผัสโอห์มมิค (ดูรายละเอียดในบทที่ 7)

จาก $J = \sigma \varepsilon$



รูป 5.14 การทดลอง เพื่อวัดค่าสภาพนำไฟฟ้า

และ $$J = I/A$$

$$\varepsilon = V/L$$

ดังนั้น $$\sigma = \frac{IL}{AV} \quad (\Omega\text{-m})^{-1} \qquad \text{.....(5-27)}$$

ซึ่งค่าต่างๆ ทางด้านขวาของสมการ เป็นค่าที่วัดได้จากการทดลองทั้งสิ้น ส่วนค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าซึ่ง เป็นส่วนกลับก็คือ

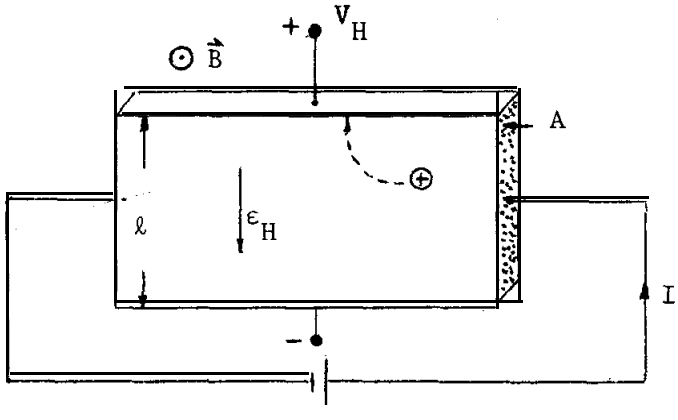
$$\rho = \frac{AV}{IL} \quad (\Omega\text{-m})$$

จากการทดลองดังกล่าวถ้า เรานำสารตัวอย่างไว้ในระบบที่ปรับอุณหภูมิได้ แล้วทำการวัด σ ที่อุณหภูมิต่างๆ เช่นจาก $300^{o}K$ - $400^{o}K$ แล้วพลอต $\log \sigma$ เทียบกับ T^{-1} จะได้กราฟ เส้นตรงที่มีความชัน เท่ากับ $-E_g/2\,k_B$ ดังนั้น ก็จะคำนวณหาค่า E_g ได้ (ดูหัวข้อ 3.3.2) สำหรับ เครื่องวัดกระแสในกรณีการวัด σ ต้องมีความละ เอียดระดับ μA หรือละ เอียดกว่า

ในบางกรณีที่ไม่สามารถแบ่งแยกชิ้นสารกึ่งตัวนำออกมาเป็นแท่ง หรือกรณีที่สารกึ่งตัวนำมีลักษณะเป็นแผ่น หรือฟิล์มบางๆ เราสามารถวัดค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าได้อีกแบบหนึ่ง โดยการใช้เครื่องวัดชนิด 4 จุด (four - point probe)

5.8.3 การวัดความหนาแน่นของพาหะนำประจุ

ความหนาแน่นของพาหะนำประจุวัดได้โดยวิธีการของฮอลล์ ในที่นี้จะเป็นการวัดความหนาแน่นของพาหะชนิดเดียว (อิเลคตรอนหรือโฮล) คือสารตัวอย่างเป็นชนิดพีหรือเอ็น จัดอุปกรณ์ดังรูป 5.15 แผ่นสารกึ่งตัวนำมีความกว้าง ℓ พื้นที่หน้าตัด A มีกระแสผ่านเท่ากับ I สนามไฟฟ้าของฮอลล์เท่ากับ E_H และศักย์ของฮอลล์เท่ากับ V_H สนามแม่เหล็ก B อยู่ในทิศตั้งฉากกับแผ่นสารตัวอย่าง



รูป 5.15 การทดลองวัดความหนาแน่นของโฮล

ในกรณีตัวอย่างเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพี ให้ p เป็นความหนาแน่นของโฮล จาก

$$R_h = 1/pe \qquad \text{.....(5-28)}$$

และ $R_h = \varepsilon_H / JB$

แต่ $J = I/A$

$\varepsilon_H = V_H / \ell$

ดังนั้น $$R_H = \frac{V_H \cdot A}{\ell IB} \qquad \text{.....(5-29)}$$

ค่า V_H , A , ℓ, I , B , e เป็นค่าที่เราวัดได้หรือทราบแล้ว ดังนั้นจาก (5-28) และ (5-29) จึงสามารถคำนวณหาค่า p ได้ คือ

$$p = \frac{RIB}{e\, V_H A} \qquad \text{.....(5-30)}$$

(ดูคำถามข้อ 5,หัวข้อ 4.2 และคำถามข้อ 3 ของบทที่ 4 เพิ่มเติม)

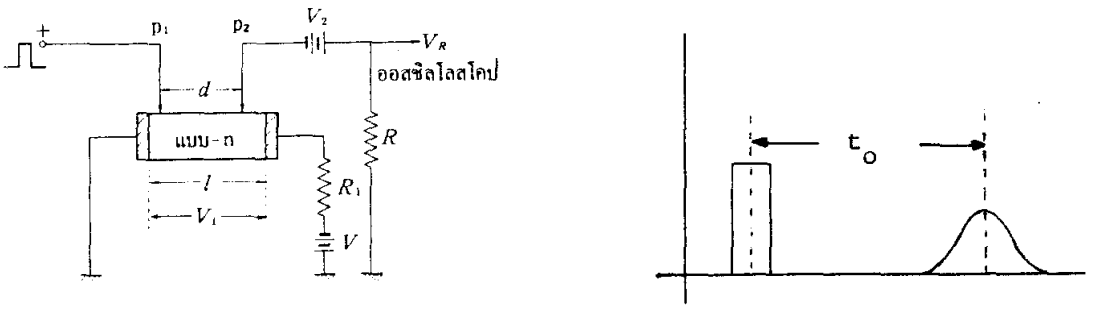
ในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะเห็นว่าขอบด้านบน (ตามรูป) ของสารกึ่งตัวนำเป็นบวกคือมีศักดาไฟฟ้าสูงกว่าขอบล่าง สำหรับในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นขอบด้านบนจะเป็นลบ และ V_H จะมีเครื่องหมายเป็น ลบ

เรื่องของฮอลล์เอฟเฟคยังสามารถนำไปใช้วัดค่าสนามแม่เหล็กที่ไม่ทราบค่าได้ด้วย ถ้าเราทราบความหนาแน่นของพาหะนำประจุ

5.8.4 <u>การวัดค่าความคล่องตัวของพาหะนำประจุ</u>

เราอาจวัดค่าความคล่องตัวของพาหะนำประจุจากนิยามของมันโดยตรง ($\mu = v/\varepsilon$) โดยจัดอุปกรณ์ดังรูป 5.16 ซึ่งเป็นการจัดอุปกรณ์เพื่อวัดความคล่องตัวของโฮลในสารกึ่งตัวนำแบบ

เอ็น (พาหะนำประจุรอง) V_1 เป็นความต่างศักดาไฟฟ้าระหว่างปลายทั้งสองของแท่งสารกึ่งตัวนำ ซึ่งยาว ℓ สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจึงมีค่า V_1/ℓ ถ้าเราจ่ายสัญญาณไฟฟ้าบวกในลักษณะคลื่นรูปสี่เหลี่ยม



รูป 5.16 การทดลองวัดค่าความคล่องตัวของพาหะนำประจุ

ไปยังเข็ม p_1 ผลตอบสนองของคลื่นดังกล่าวจะสังเกตได้ที่เวลา t_o ต่อมาที่ p_2 คือโฮลถูกฉีดจากเข็ม p_1 เข้าไปในสารตัวอย่างกลุ่มของโฮลจะเคลื่อนที่ไปยังเข็ม p_2 เนื่องจากแรงจากสนามไฟฟ้า V_1/ℓ เมื่อไปถึงเข็ม p_2 โฮลจะถูกรวบรวมโดยเข็ม p_2 ซึ่งต่อกับศักย์ไฟฟ้าลบ V_2 และปรากฏผลบนจอออสซิลโลสโคป ถ้าเวลาที่ใช้ในการเดินทางของโฮลจาก p_1 ไปสู่ p_2 มีค่า t_o (วัดได้จากออสซิลโลสโคป) จะได้ความเร็วของโฮลเท่ากับระยะห่างของเข็มทั้งสองคือ d หารด้วย t_o

$$v = d/t_o$$

แต่

$$\mu_h = v/\varepsilon$$

และ

$$\varepsilon = V_1/\ell$$

ดังนั้น $$\mu_h = \frac{d\ell}{V_1 t_o} \qquad \text{.....(5-31)}$$

เนื่องจาก d , ℓ , V_1 และ t_o สามารถวัดได้ดังนั้น เราจึงคำนวณค่า μ_h ได้

นอกจากวิธีนี้ μ ยังสามารถวัดได้จากเรื่องของฮอลล์ เอฟ เฟค และสภาพนำไฟฟ้า คือ จากบทที่แล้ว เราทราบว่า

$$\mu = R_H / \sigma$$

ดังนั้นจากการวัด R_H และ σ ที่อุณหภูมิใดๆ ก็จะทราบความคล่องตัวที่อุณหภูมินั้น ค่าความคล่องตัวจากการวัดโดยวิธีการของฮอลล์ เอฟ เฟคและวิธีการโดยตรงจะต่างกัน เล็กน้อย

บทสรุป

1. <u>สัมประสิทธิการดูดกลืนแสง</u>

$$\alpha = 4nnk / \lambda_0$$

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

2. <u>ขบวนการดูดกลืนแสง</u>

$h\nu \geq E_g$ สำหรับการดูดกลืนมูลฐาน

$\nu_0 = E_g/h$ คือ "absorption edge"

หรือ "fundamental edge"

$$\alpha_d = A (h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}}$$

$$\alpha_i = A'(T) (h\nu - E_g)^2$$

สารกึ่งตัวนำแบบไดเรค-แกพ $\vec{k}_{\text{ต่ำสุด}} = \vec{k}_{\text{สูงสุด}} = 0$

3. <u>สภาพนำไฟฟ้า เนื่องจากแสง</u>

$$\sigma = \sigma_o + e \Delta n \mu_h (1 + b)$$

$$An = \frac{\alpha\ I(\omega)}{\hbar\omega}\ \tau'$$

4. <u>ลูมิเนสเซนซ์</u>

ขบวนการกลับกันของการดูดกลืนแสง ลูมิเนสเซนว์ที่เกิดขณะเดียวกับการกระตุ้นคือฟลูเรสเซนซ์ ส่วนลูมิเนสเซนซ์ ที่เกิดหลังจากการกระตุ้นช่วงเวลาหนึ่งเรียกว่าฟอสฟอเรสเซนซ์

คำถามท้ายบท

1. สมมุติว่าในการทดลองเกี่ยวกับสารกึ่งตัวนำที่กำหนดให้โดยท่านมีแหล่งกำเนิดแสงความเข้มสูงมาก เป็นไปได้หรือไม่ที่จะเกิดการดูดกลืนแสงในขบวนการดูดกลืนมูลฐาน ที่ความถี่น้อยกว่า E_g/h

2. จงหาค่าพลังงานต่ำสุดของโฟตอนที่จะทำให้เกิดการดูดกลืนมูลฐานใน Ga As , Si , Ge ที่อุณหภูมิห้อง และให้หาความยาวคลื่นของโฟตอนเหล่านั้นด้วย (ดูตาราง 2.1)

3. จงตอบแบบนักฟิสิกส์ว่าทำไมซิลิคอนจึงมีลักษณะเป็นมันวาวคล้ายโลหะในแสงสว่างธรรมดา แต่โปร่งแสงกับอินฟราเรด

4. จงคำนวณหาความยาวคลื่นสูงสุดของแสงที่จะทำให้เกิดไอออไนซ์กับโดเนอร์ As ใน Si และกับแอคเซฟเตอร์ Ga ใน Si (ดูตาราง 3.1)

5. สารกึ่งตัวนำเอกซ์ทรินซิคมีรูปร่างเป็นแผ่นสี่เหลี่ยมยาว 5 ซ.ม. กว้าง 0.5 ซ.ม. หนา 1 ม.ม. วางอยู่ในสนามแม่เหล็กความเข้ม 0.6 Wb/m^2 ทิศตั้งฉากกับแผ่นสารกึ่งตัวนำ ศักย์ของฮอลล์มีค่า 8 mV เมื่อกระแสมีค่า 10 mA จงคำนวณหาค่าความหนาแน่นของพาหะนำประจุและความคล่องตัว