บทที่ 5

สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

การศึกษาสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำ เป็นแนวทางหนึ่งที่ใช้ศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานของสารได้ เนื่องจากสมบัติเชิงแสงของสารกึ่งตัวนำมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับโครงสร้างแถบพลังงาน ซึ่งการศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงก็เป็นแนวทางหนึ่งในการศึกษาสมบัติของสารในแง่มุมต่าง ๆ โดยเฉพาะในด้านที่จะนำไปประยุกต์เป็นอุปกรณ์เชิงแสงต่าง ๆ

ปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงได้ถูกค้นพบเป็นครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2416 (ค.ศ. 1873) โดยสมิธ (W. Smith)[22] พบว่าความต้านทานของสารซีลีเนียม (Se) เปลี่ยนไปเมื่อมีแสงตกกระทบ ต่อมาจึงได้มีการนำปรากฏการณ์นี้มาใช้เป็นประโยชน์ เช่น ใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง หรือที่เรียกว่า ตัวนำเชิงแสง (photoconductor) เป็นต้น การศึกษาสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะสามารถเชื่อมโยงไปถึงโครงสร้างแถบพลังงานของสารได้

สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากกระบวนการต่าง ๆ หลายชนิด โดยมีกระบวนการหลักได้แก่ การดูดกลืนแสงเพื่อย้ายสถานะ และกระบวนการขนส่งของพาหะภายในชิ้นสาร นอกจากนั้นยังมีปรากฏการณ์พิเศษอื่น ๆ ที่ทำให้ผลของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเปลี่ยนแปลงไป สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและพี แต่ในการอธิบายปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงนี้ จะอธิบายเฉพาะในสารชนิดเอ็นเท่านั้น หากจะใช้อธิบายปรากฏการณ์ในสารชนิดพีก็ยังสามารถกระทำได้ โดยเลือกพิจารณาในแง่มุมที่เหมาะสม ในบทนี้จะได้กล่าวถึงกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

สำหรับการนำไฟฟ้ามีความสัมพันธ์พื้นฐาน คือ [23]

$$\sigma = n \mu q \qquad \text{--------- 5.1}$$

โดย σ คือ สภาพนำไฟฟ้าของสาร

n คือ ความหนาแน่นของอิเลกตรอนอิสระ

μ คือ สภาพเคลื่อนได้ของอิเลกตรอน

q คือ ค่าประจุของอิเลกตรอน

เมื่อมีแสงตกกระทบชิ้นสารกึ่งตัวนำ ความหนาแน่นและสภาพเคลื่อนได้ของอิเลก-ตรอนจะถูกเปลี่ยนแปลงไปเท่ากับ Δn และ $\Delta \mu$ ตามลำดับ จะทำให้สภาพนำไฟฟ้า σ เปลี่ยนไป $\Delta \sigma$ ซึ่ง

$$\Delta \sigma = q \mu \Delta n + q n \Delta \mu \qquad \text{--------- 5.2}$$

สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงคือค่า $\Delta \sigma$

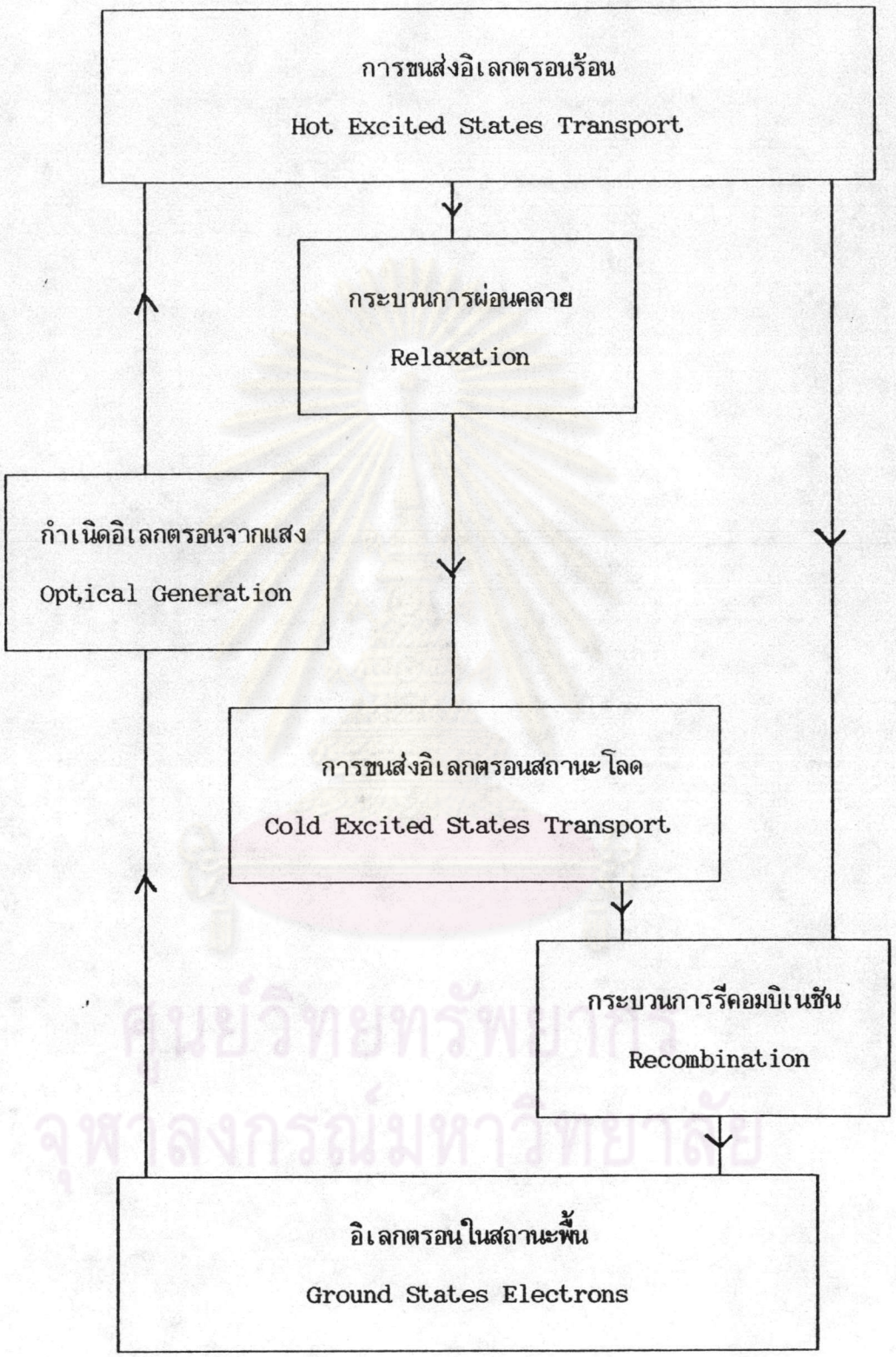
โดยทั่วไปถือว่าขณะมีแสงตกกระทบ ค่าสภาพเคลื่อนได้ μ จะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้น

$$\Delta \sigma = q \mu \Delta n \qquad \text{--------- 5.3}$$

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

<u>กระบวนการนำไฟฟ้าเชิงแสง</u>

กระบวนการนำไฟฟ้าเชิงแสงไม่ใช่กระบวนการที่ตรงไปตรงมา ประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการ ได้แก่กระบวนการกำเนิดอิเลกตรอน กระบวนการขนส่งและกระบวนการแทรปปิงและรีคอมบิเนชัน ดังภาพที่ 5.1



ภาพที่ 5.1 แสดงกระบวนการของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จากภาพที่ 5.1 อิเลกตรอนจากสถานะพื้น (ground states) ถูกกระตุ้นจากแสงขึ้นไปในแถบนำ เป็นอิเลกตรอนร้อน (hot excited states) แล้วผ่านกระบวนการผ่อนคลาย (relaxation) ลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำกว่าเดิม แต่ยังอยู่ในแถบนำ คือ เป็นอิเลกตรอนในสถานะโลด (cold excited states) ในช่วงที่อิเลกตรอนอยู่ในแถบนำ จะมีกระบวนการขนส่งเข้ามาเกี่ยวข้อง ในส่วนนี้ทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงขึ้น หลังจากนั้นอิเลกตรอนในแถบนำจะผ่านกระบวนการรีคอมบิเนชันกลับสู่สถานะพื้นดังเดิม

อิเลกตรอนร้อนที่เกิดจากการกระตุ้นของแสง อาจผ่านกระบวนการรีคอมบิเนชันกลับสู่สถานะพื้นโดยตรงก็ได้ โดยไม่ผ่านกระบวนการผ่อนคลาย และกระบวนการขนส่ง ซึ่งในกรณีนี้จะไม่เกิดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

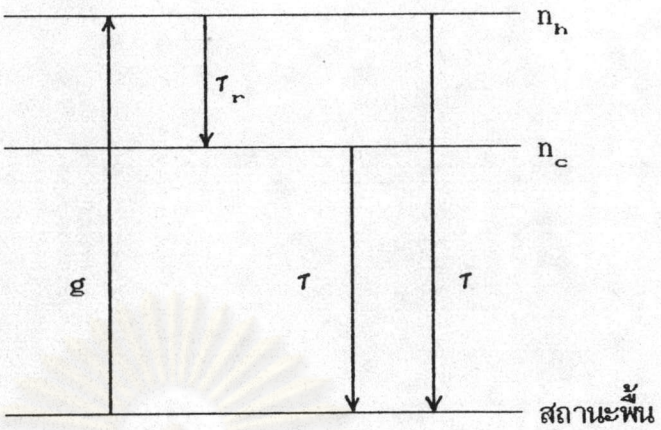
1. <u>กระบวนการย้ายสถานะของอิเลกตรอนที่ทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง</u>

เมื่อแสงที่มีความเข้ม I ตกลงบนสารกึ่งตัวนำที่มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α จะมีอัตราการเกิดของอิเลกตรอน g (คือจำนวนอิเลกตรอนที่ย้ายสถานะไปยังแถบนำ ในหนึ่งหน่วยปริมาตร ในเวลาหนึ่งวินาที) ดังความสัมพันธ์ [24]

$$g = \beta \alpha I \qquad \text{--------- 5.4}$$

เมื่อ β คือค่าควอนตัมยิล (quantum yield) ซึ่งคือจำนวนอิเลกตรอนที่เกิดจากโฟตอนหนึ่งตัว โดยทั่วไปในช่วงที่พลังงานของโฟตอนใกล้กับช่องว่างแถบพลังงาน ค่า β จะประมาณเท่ากับ 1

จากรูปที่ 5.2 เมื่ออิเลกตรอนได้รับพลังงานจากโฟตอนแล้วย้ายสถานะขึ้นไปอยู่ในแถบนำ กลายเป็นอิเลกตรอนร้อน มีระดับพลังงานอยู่ที่ n_h แล้วผ่อนคลายโดยมีอันตรกิริยากับอิเลกตรอนอื่นและโฟนอนลงมาอยู่ที่สถานะพลังงานต่ำกว่า คือระดับ n_c โดยใช้ระยะเวลาในการผ่อนคลาย τ_r จากนั้นยังสามารถอยู่ในแถบนำได้อีกระยะหนึ่ง คือ τ ก่อนผ่านกระบวนการรีคอมบิเนชันกลับสู่สถานะพื้นดังเดิม



ภาพที่ 5.2 แสดงการผ่อนคลายของอิเลกตรอน

โดยทั่วไปแล้ว τ_r มีค่าน้อยมากเมื่อเทียบกับ τ เราจึงสามารถตัดผลจากอิเลกตรอนร้อนทิ้งได้ ดังนั้นในสถานะคงที่ (steady state) จำนวนอิเลกตรอนอิสระที่เกิดขึ้น Δn คำนวณได้จากสมการ

$$\Delta n = g\tau \qquad \text{--------- 5.5}$$

กระบวนการย้ายสถานะของอิเลกตรอน สามารถแยกได้เป็น 3 แบบ ได้แก่ การย้ายสถานะภายในแถบเดียวกัน, การย้ายสถานะข้ามแถบ, และการย้ายสถานะเนื่องจากสถานะในช่องว่างแถบพลังงาน การย้ายสถานะที่มีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงมาก ได้แก่การย้ายสถานะไปยังแถบนำ ส่วนการย้ายสถานะภายในแถบเดียวกันนั้นจะมีผลน้อยมาก โดยจะเป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพเคลื่อนได้ของพาหะเท่านั้น

2. <u>กระบวนการขนส่ง</u>

เมื่ออิเลกตรอนได้ย้ายสถานะไปยังแถบนำแล้ว จะผ่านกระบวนการขนส่ง ซึ่งมีผลในการเปลี่ยนแปลงสภาพนำไฟฟ้าของสารได้ หากอิเลกตรอนไม่ผ่านกระบวนการขนส่งนี้แล้ว ก็จะไม่เกิดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงขึ้น

โดยหลักการแล้ว การวัดจำนวนอิเลกตรอนอิสระที่เกิดขึ้นเมื่อแสงตกกระทบให้ได้ผลที่แม่นยำขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งดังกล่าว หากอิเลกตรอนสามารถผ่านกระบวนการขนส่งได้อย่างคล่องตัว จะทำให้สามารถวัดจำนวนอิเลกตรอนอิสระที่เกิดขึ้นได้แม่นยำ แต่เนื่องจากมีกระบวนการต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องมาก โอกาสที่อิเลกตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะผ่านกระบวนการรีคอมบิเนชันกลับไปสู่สถานะพื้นก่อนจะผ่านกระบวนการขนส่งมีมาก ทำให้ไม่สามารถวัดผลของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงได้ ในการวิจัยจึงได้สร้างรอยต่อพี-เอ็นขึ้นบนชิ้นสารเพื่อช่วยเร่งกระบวนการขนส่งให้เร็วขึ้น โดยมีรายละเอียดของการสร้างรอยต่อพี-เอ็นในบทที่ 6

3. <u>กระบวนการแทรปปิง และรีคอมบิเนชัน</u>

ในผลึกจริง (real crystal) จะมีสิ่งเจือปนและความไม่สมบูรณ์ต่าง ๆ อยู่ในเนื้อสารเป็นจำนวนมาก สิ่งเจือปนและความไม่สมบูรณ์เหล่านี้จะมีสถานะอยู่กับที่ (localized state) กระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เราเรียกสถานะที่อยู่กับที่เหล่านี้ว่า เซนเตอร์ (center) เซนเตอร์เหล่านี้จะมีผลต่อการลดลง หรือสูญหายของพาหะอิสระที่เกิดขึ้น โดยกระบวนการที่เรียกว่า แทรปปิง และรีคอมบิเนชัน เราจะเรียกเซนเตอร์นั้นว่า แทรปปิงเซนเตอร์ (trapping center) สำหรับอิเลกตรอน ถ้า [25]

$$n_T P v S_P \ll n_T S_n v N_C \exp[-E_{ct}/kT] \quad \text{---- 5.6.1}$$

และจะเรียกว่ารีคอมบิเนชันเซนเตอร์ ถ้า

$$n_T P v S_P \gg n_T S_n v N_C \exp[-E_{ct}/kT] \quad \text{---- 5.6.2}$$

เมื่อ n_T คือความหนาแน่นของเซนเตอร์ที่ยังมีอิเลกตรอนอยู่ที่เซนเตอร์นั้น

P คือความหนาแน่นของโฮลอิสระ

v คือความเร็วของพาหะอิสระเนื่องจากความร้อน (thermal velocity)

E_{ct} คือความแตกต่างของพลังงานระหว่างพลังงานของเซนเตอร์นั้นกับแถบนำ

S_p คือค่าครอสเซคชัน (cross section) ของเซนเตอร์ซึ่งมีอิเลกตรอนอยู่ จะจับโฮลอิสระ

S_n คือค่าครอสเซคชันของเซนเตอร์ซึ่งมีโฮลอยู่ จะจับอิเลกตรอนอิสระ

N_C คือความหนาแน่นของสถานะยังผลในแถบนำ (effective density of states in the conduction band) ของอิเลกตรอนอิสระ

k คือค่าคงตัวของโบลซ์มาน

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

ทางด้านซ้ายของสมการ 5.6.1 และสมการ 5.6.2 คือโอกาสที่อิเลกตรอนที่ถูกจับโดยเซนเตอร์นั้นจะรวมตัวกับโฮลอิสระ ส่วนทางขวาคือโอกาสที่อิเลกตรอนที่ถูกจับโดยเซนเตอร์นั้นจะถูกกระตุ้นโดยความร้อนกลับไปสู่แถบนำเช่นเดิม ถ้าอิเลกตรอนในเซนเตอร์ใดมีโอกาสถูกกระตุ้นกลับไปแถบนำได้มากกว่าโอกาสที่จะรวมตัวกับโฮล เซนเตอร์นั้นจะเรียกว่า แทรปปิงเซนเตอร์ แต่ถ้ามีโอกาสที่จะรวมตัวกับโฮลมากกว่าโอกาสที่จะถูกกระตุ้นกลับไปแถบนำ เซนเตอร์นั้นจะเรียกว่า รีคอมบิเนชันเซนเตอร์ เซนเตอร์ใดเซนเตอร์หนึ่งอาจเป็นได้ทั้งแทรปปิงเซนเตอร์ และรีคอมบิเนชันเซนเตอร์ ที่อุณหภูมิและความเข้มแสงแตกต่างกัน เราจึงนิยามระดับพลังงานที่เรียกว่า ระดับดีมาเคชัน (demarcation level) เพื่อใช้แบ่งแยกชนิดของเซนเตอร์ เมื่อคิดว่าโอกาสทั้งสองข้างต้นเท่ากันพอดี ดังนี้

ระดับดีมาเคชันของอิเลกตรอน คือระดับพลังงานที่ทำให้

$$n_T P v S_p = n_T S_n v N_C \exp[-E_{dn}/kT] \quad \text{----- 5.7.1}$$

เมื่อ E_{dn} คือความแตกต่างของพลังงานระหว่างแถบนำ กับระดับอิเลกตรอนดีมาเคชัน สำหรับระดับดีมาเคชันของโฮล คือระดับพลังงานที่ทำให้

$$P_T n v S_n = P_T S_p v N_V \exp[-E_{dp}/kT] \quad \text{----- 5.7.2}$$

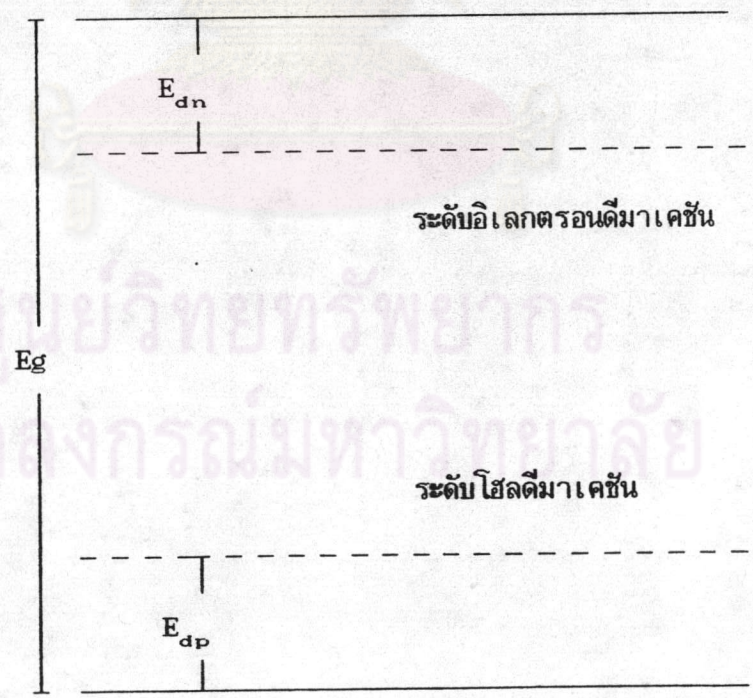
เมื่อ P_T คือความหนาแน่นของเซนเตอร์ที่มีโฮลอยู่ที่เซนเตอร์นั้น

n คือความหนาแน่นของอิเลกตรอนอิสระ

N_v คือความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบวาเลนซ์ของโฮลอิสระ

E_{dp} คือความแตกต่างของพลังงานระหว่างระดับโฮลดีมาเคชันกับแถบวาเลนซ์

ภาพที่ 5.3 แสดงระดับอิเลกตรอนและโฮลดีมาเคชันที่อุณหภูมิและความเข้มแสงอันหนึ่ง ถ้าระดับพลังงานของเซนเตอร์ใดอยู่เหนือระดับอิเลกตรอนดีมาเคชัน เซนเตอร์นั้นจะเป็นแทรปปิงเซนเตอร์สำหรับอิเลกตรอน ถ้าระดับพลังงานของเซนเตอร์ใดอยู่ใต้ระดับโฮลดีมาเคชัน เซนเตอร์นั้นจะเป็นแทรปปิงเซนเตอร์สำหรับโฮล และถ้าเซนเตอร์ใดอยู่ระหว่างระดับอิเลกตรอนดีมาเคชัน และระดับโฮลดีมาเคชัน เซนเตอร์นั้นจะเป็นรีคอมบิเนชันเซนเตอร์ และเนื่องจากระดับดีมาเคชันของเซนเตอร์นี้ยามด้วยครอสเซคชันของเซนเตอร์นั้น แต่ละเซนเตอร์จะมีระดับดีมาเคชันของตนเอง



ภาพที่ 5.3 แสดงระดับอิเลกตรอนดีมาเคชัน และโฮลดีมาเคชัน

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย