



สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

ถึงแม้ว่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจะเกิดขึ้นได้ทั้งสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี แต่เพื่อความสะดวกจะอธิบายความหมายและปรากฏการณ์ต่าง ๆ ในสารชนิดเอ็น ซึ่งการอธิบายนี้ยังคงเป็นจริงอยู่สำหรับสารชนิดพี เมื่อมองในแง่มุมที่เหมาะสม

จากสมการพื้นฐานคือ [2]

$$\sigma = n\mu q$$

- โดย σ คือสภาพนำไฟฟ้า
 n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ
 μ คือสภาพเคลื่อนได้ (mobility)
 q คือประจุของอิเล็กตรอน

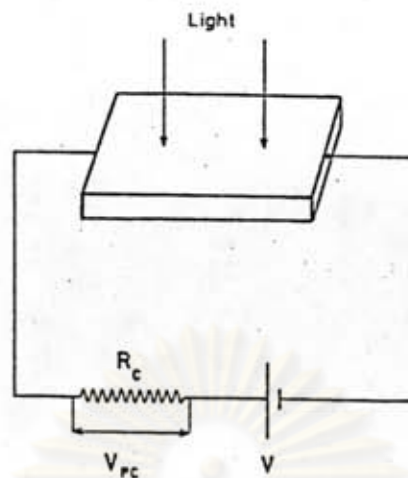
เมื่อมีแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ ทำให้ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไป Δn และสภาพเคลื่อนได้เปลี่ยนไป $\Delta \mu$ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าจะเปลี่ยนแปลงไป

$$\Delta \sigma = q\mu \Delta n + qn \Delta \mu$$

สภาพนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนไปนี้เรียกว่าสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง และโดยทั่วไปแล้วในสารกึ่งตัวนำเมื่อแสงตกกระทบสภาพเคลื่อนได้จะไม่เปลี่ยนแปลง [13] ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำ

$$\Delta \sigma = q\mu \Delta n$$

ก่อนที่จะกล่าวถึงรายละเอียดของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อความเข้าใจจะแสดงวงจรอย่างง่ายในเชิงปฏิบัติของการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงเสียก่อนในรูป 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงวงจรอย่างง่ายในเชิงปฏิบัติของการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

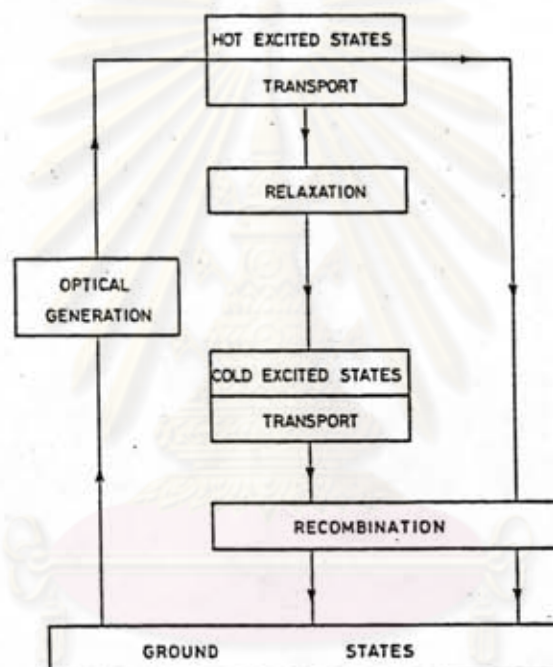
ในรูป 3.1 แพดเตอร์ที่มีความต่างศักย์ V และความต้านทาน R_C จะถูกต่ออนุกรมเข้ากับสารกึ่งตัวนำ ซึ่งก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรจำนวนหนึ่ง เมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำความต้านทานของสารกึ่งตัวนำจะลดลง ทำให้มีกระแสไหลเพิ่มขึ้น ΔI แทนที่เราจะวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง $\Delta \sigma$ จาก ΔI โดยตรง เพราะ $\Delta I = \Delta \sigma \mathcal{E}$ เมื่อ \mathcal{E} คือสนามไฟฟ้า ในทางปฏิบัติเราจะวัดความต่างศักย์ที่เปลี่ยนแปลงบน R_C คือ V_{PC} แทน

ปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงดังกล่าวนี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากปรากฏการณ์ระดับจุลภาคที่มีขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งสามารถแยกได้เป็นหลายกระบวนการ จึงจะกล่าวถึงรายละเอียดของสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงโดยเริ่มจากกระบวนการสำคัญที่เกี่ยวข้อง แล้วจะกล่าวถึงสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกที่มีคุณสมบัติผิดปกติ คือแทนที่จะทำให้ช่วงชีวิต (life time) ของพาหะอิสระสั้นลงกลับทำให้ช่วงชีวิตยาวนาน จากนั้นจะเป็นชนิดของการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ซึ่งจะเน้นการวัดที่เพิ่งมีการเสนอขึ้นมาเมื่อเร็ว ๆ นี้ คือการวัดแบบกระแสคงที่ และสุดท้ายจะกล่าวถึงปรากฏการณ์ที่สำคัญอันหนึ่งในการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง คือความไม่สามารถทำซ้ำได้ (non-reproducible) ในการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง



3.1 กระบวนการของสภานำไฟฟ้าเชิงแสง

สภานำไฟฟ้าเชิงแสงไม่ใช่กระบวนการที่ตรงไปตรงมา รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการของสภานำไฟฟ้าเชิงแสง ซึ่งประกอบด้วยกระบวนการที่สำคัญ 3 กระบวนการ คือ กระบวนการเกิดอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดสภานำไฟฟ้าเชิงแสง กระบวนการทรานสปอร์ต และกระบวนการเทรปปีงและรีคอมบิเนชัน



รูปที่ 3.2 แสดงกระบวนการของสภานำไฟฟ้าเชิงแสง

ในรูปที่ 3.2 อิเล็กตรอนจากสถานะพื้น (ในรูปคือ ground states) ถูกกระตุ้นจากแสงขึ้นไปอยู่แถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนร้อน (ในรูปคือ hot excited states) แล้วจึงผ่อนคลาย (relaxation) ลงมาสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าเดิมแต่ยังอยู่ในแถบนำ (ในรูปคือ cold excited states) ช่วงที่อิเล็กตรอนอยู่ในแถบนำ (คือเป็นอิเล็กตรอนอิสระ) นั้น จะมีกระบวนการทรานสปอร์ต (transport) เข้ามา

เกี่ยวข้องกับควย หลังจากนั้นก็ผ่านกระบวนการรีคอมบิเนชัน (recombination) กลับสู่สถานะพื้นเหมือนเดิม

อิเล็กตรอนร้อนที่เกิดจากการกระตุ้นโดยแสงนั้นอาจผ่านกระบวนการรีคอมบิเนชันกลับสู่สถานะพื้นโดยตรงเลยก็ได้ โดยไม่ผ่านการผ่อนคลายและกระบวนการทรานสปอร์ต ซึ่งในกรณีนี้จะไม่ทำให้เกิดปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

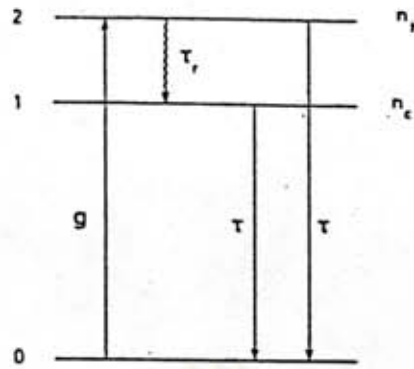
3.1.1 กระบวนการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนที่ทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

เมื่อแสงที่มีความเข้ม I ตกลงบนสารกึ่งตัวนำที่มีสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสง α อัตราการเกิดอิเล็กตรอน g (จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดในหนึ่งหน่วยปริมาตรในเวลาหนึ่งวินาที) เขียนได้เป็น [13]

$$g = \beta \alpha I$$

เมื่อ β คือควอนตัมยิลด์ (quantum yield) ซึ่งก็คือจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดจากโฟตอนหนึ่งตัว โดยทั่วไปแล้วในช่วงที่แสงมีพลังงานไม่ต่างจากช่องว่างแถบพลังงานมากนัก β จะมีค่าเท่ากับ 1

ในรูปที่ 3.3 เมื่ออิเล็กตรอนถูกกระตุ้นด้วยแสงขึ้นไปอยู่แถบนำเป็นอิเล็กตรอนร้อนคือ n_h ในรูปอิเล็กตรอนร้อนจะผ่อนคลายโดยการเกิดอันตรกิริยากับพาหะอื่นและโฟนอนลงมายู่สถานะที่มีพลังงานต่ำกว่า คือ n_c โดยใช้เวลาในการผ่อนคลาย τ_r จากนั้นก็จะอยู่แถบนำได้อีกช่วงเวลาหนึ่งคือ τ ก่อนที่จะผ่านกระบวนการรีคอมบิเนชันกลับสู่สถานะพื้นก่อนถูกกระตุ้นด้วยแสง

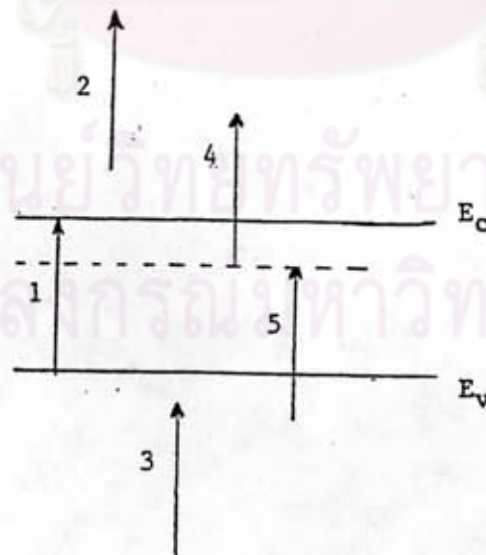


รูปที่ 3.3 แสดงการหวนคลายของอิเล็กตรอน

โดยทั่วไปแล้ว τ_r นั้นน้อยกว่าเมื่อเทียบกับ τ จึงสามารถตัดผลของอิเล็กตรอนรอนทิ้งได้ ดังนั้นที่สถานะคงที่ (steady state) จึงคำนวณจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นคือ Δn ได้จาก

$$\Delta n = g \tau$$

การย้ายสถานะของอิเล็กตรอนเนื่องจากพลังงานแสงนั้น (รูปที่ 3.4) สามารถแบ่งเป็นชนิดใหญ่ ๆ ได้ 3 ชนิด คือการย้ายสถานะข้ามแถบ การย้ายสถานะภายในแถบ และการย้ายสถานะเนื่องจากสถานะในช่องว่างแถบพลังงาน



รูปที่ 3.4 แสดงการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนเมื่อได้รับพลังงานจากแสง

3.1.1.1 การย้ายสถานะข้ามแถบ (interband transition)

การย้ายสถานะข้ามแถบคือการย้ายหมายเลข 1 ในรูป 3.4 อิเล็กตรอนจะย้ายจากแถบวาเลนซ์ไปอยู่แถบนำ การย้ายสถานะแบบนี้จะได้พาหะอิสระทั้งสองอย่างคือทั้งอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะแบบนี้มีค่าสูงมาก(14) (ประมาณ 10^2 ถึง 10^6 cm^{-1})

3.1.1.2 การย้ายสถานะภายในแถบ (intraband transition)

การย้ายสถานะแบบนี้คือการย้ายหมายเลข 2 และ 3 ในรูป 3.4 อิเล็กตรอนจะย้ายจากสถานะหนึ่งไปอีกสถานะหนึ่งในแถบเดียวกัน ซึ่งอาจเกิดขึ้นในแถบนำ (หมายเลข 2) หรือแถบวาเลนซ์ (หมายเลข 3) ก็ได้ การย้ายสถานะแบบนี้จะไม่มีพาหะอิสระเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลต่อสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง ในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพเคลื่อนได้เท่านั้น

3.1.1.3 การย้ายสถานะเนื่องจากสถานะในช่องว่างแถบพลังงาน (extrinsic transition)

สถานะในช่องว่างแถบพลังงานนี้อาจเป็นสถานะของสิ่งเจือปน (impurity) หรืออาจเป็นสถานะของความไม่สมบูรณ์ของผลึก (imperfection) การย้ายสถานะแบบนี้ (หมายเลข 4 และ 5 ในรูป 3.4) จะได้พาหะอิสระเพียงอย่างเดียว คืออิเล็กตรอนอิสระหรือโฮลอิสระ สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะแบบนี้มีค่าต่ำ (14) (ประมาณ 1 ถึง 10^2 cm^{-1})

การที่จะเกิดการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนในผลึกได้นั้น การเกิดจะต้องสอดคล้องกับกฎการคงค่าของทั้งพลังงานและโมเมนตัม ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสถานะเริ่มต้นและสถานะสุดท้าย ถ้าเป็นอันตรกิริยาเฉพาะโฟตอนกับอิเล็กตรอนโมเมนตัมของอิเล็กตรอนจะเปลี่ยนไปน้อย แต่รวมถึงอันตรกิริยาที่มีโฟนอนมาเกี่ยวข้องด้วย จะทำให้โมเมนตัมของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปมาก ดังนั้นการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนในผลึกจึงมี 2 แบบ คือแบบตรงซึ่งโมเมนตัมสุดท้ายเปลี่ยนไปน้อยหรือไม่เปลี่ยน และแบบเฉียงซึ่งโมเมนตัมเปลี่ยนไปมาก

3.1.1.4 การย้ายสถานะแถบตรง (direct transtion)

การย้ายสถานะของอิเล็กตรอนในแถบนี้จะมีเฉพาะโฟตอน (พลังงานแสง) เท่านั้น
มาเกี่ยวข้อง โดยการย้ายสถานะในแถบนี้จะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อ [15]

$$k' + k_{\text{pht}} - k = K$$

เมื่อ k และ k' คือ เลขคลื่นของอิเล็กตรอนก่อนและหลังถูกกระตุ้นด้วยแสง

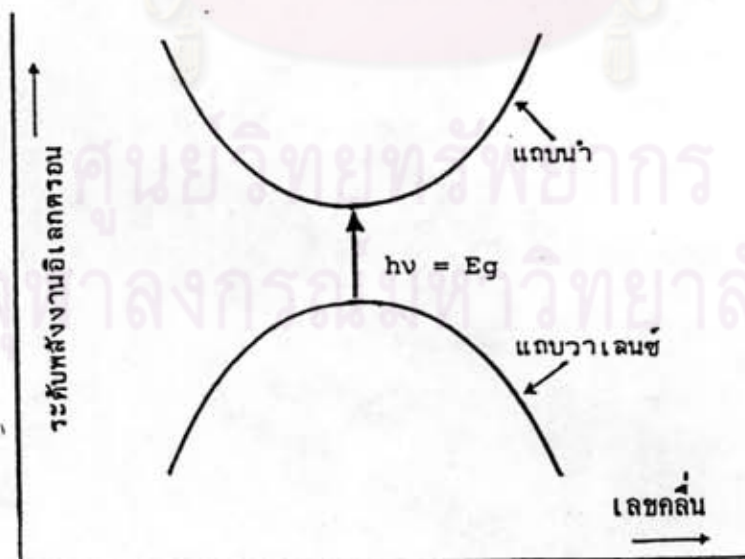
k_{pht} คือ เลขคลื่นของแสง

K คือ เวกเตอร์หลักในแลตทิซกลับ

แต่เนื่องจากแสงมีโมเมนตัมน้อยมาก ดังนั้น

$$k' = k + K$$

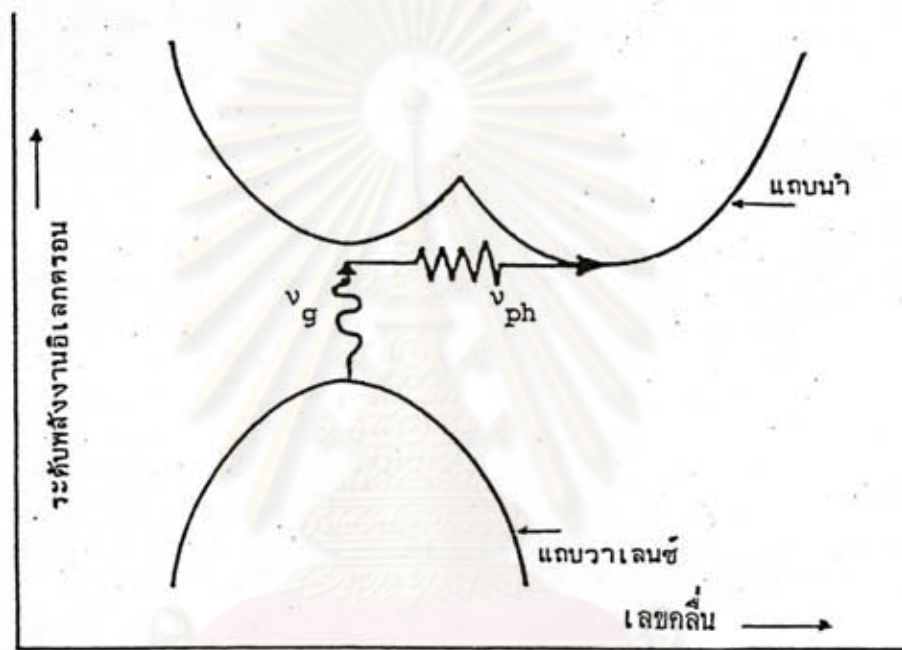
ซึ่งความหมายก็คือ ถ้าอิเล็กตรอนมีอันตรกิริยากับแสงเพียงอย่างเดียว การย้าย
สถานะจะเกิดขึ้นตามแนวตั้งของโครงสร้างแถบพลังงานแถบรีดิวซ์โซน เราเรียกการย้าย
สถานะแบบนี้ว่าการย้ายสถานะแถบตรง ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงการย้ายสถานะแถบตรง

3.1.1.5 การย้ายสถานะแบบอ้อม (indirect transition)

การย้ายสถานะของอิเล็กตรอนในแบบนี้จะมีทั้งโฟตอนและโฟนอนมาเกี่ยวข้อง โดยอิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจากแสงและได้รับโมเมนตัมจากโฟนอน (ถือว่าพลังงานของโฟนอนน้อยมากและโมเมนตัมของแสงน้อยมาก) ดังนั้นการย้ายสถานะแบบนี้จึงเป็นการย้ายในแนวเฉียงของโครงสร้างพลังงานแถบรีคิวิซโซน ดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงการย้ายสถานะแบบอ้อม

3.1.2 กระบวนการทรานสปอร์ต

ในรูปที่ 3.1 ซึ่งแสดงการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงในเชิงปฏิบัติ นั้น จะเห็นว่าเมื่อแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำแล้วทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้น ถ้าอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นนี้สามารถไหลผ่านวงจรได้โดยสะดวก เราก็จะสามารถวัดจำนวนการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระที่ถูกต้องได้ แต่ถ้าอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นถูกกั้นด้วยกำแพงศักย์ทำให้ไหลไม่สะดวก เราก็จะวัดจำนวนการเกิดของอิเล็กตรอนอิสระผิดจากความเป็นจริง

นี่คือเหตุผลของความต้องการรอยต่อแบบโอห์มมิคในการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงหรือการวัดอื่น ๆ ที่ต้องต่อขั้วไฟเข้ากับสารกึ่งตัวนำ สำหรับรายละเอียดของการเกิดกำแพงศักย์นั้นจะกล่าวในบทที่ 4

3.1.3 กระบวนการแตรปิงและกระบวนการรีคอมบิเนชัน (trapping and recombination)

โดยทั่วไปในผลึกจริง (real crystal) จะมีสิ่งเจือปนและความไม่สมบูรณ์ของผลึกปนอยู่เป็นจำนวนมาก ทั้งสิ่งเจือปนและความไม่สมบูรณ์เหล่านี้จะมีสถานะอยู่กับที่ (localized state) กระจายอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน การสูญหายของพาหะอิสระที่เกิดขึ้นจากแสงนั้นมักเกิดขึ้นจากอิทธิพลของสถานะอยู่กับที่เหล่านี้ ซึ่งเราเรียกว่าเซนเตอร์ (center) กระบวนการที่ทำให้เกิดการสูญหายหรือลดลงของพาหะอิสระมี 2 แบบคือ แตรปิงและรีคอมบิเนชัน ซึ่งเราจะเรียกเซนเตอร์นั้นว่าแตรปิงเซนเตอร์ (trapping center) สำหรับอิเล็กตรอน ถ้า [16]

$$n_T P v S_P \ll n_T S_n v N_C \exp \left(-\frac{E_{ct}}{k_B T} \right) \quad 3.1.3.1$$

และจะเรียกวารีคอมบิเนชันเซนเตอร์ถ้า

$$n_T P v S_P \gg n_T S_n v N_C \exp \left(-\frac{E_{ct}}{k_B T} \right) \quad 3.1.3.2$$

เมื่อ n_T คือความหนาแน่นของเซนเตอร์ที่ยังมีอิเล็กตรอนอยู่ที่เซนเตอร์นั้น

P คือความหนาแน่นของโฮลอิสระ

v คือความเร็วของพาหะอิสระเนื่องจากความร้อน (thermal velocity)

E_{ct} คือความแตกต่างของพลังงานระหว่างพลังงานของเซนเตอร์นั้นกับแถบนำ

S_P คือครอสเซกชัน (cross section) ของเซนเตอร์ซึ่งมีอิเล็กตรอน จะจับโฮลอิสระ

- S_n คือการอสเซชันของเซเนเตอร์ซึ่งมีโฮล จะจับอิเล็กตรอนอิสระ
- N_c คือความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบนำ (effective density of states in the conduction band) ของอิเล็กตรอนอิสระ
- k_B คือค่าคงที่ของโบลซ์มาน
- T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

ความหมายของสมการ 3.1.3.1 คือ เซเนเตอร์นั้นจะเป็นแตรปิงเซเนเตอร์ ถ้าอิเล็กตรอนซึ่งถูกจับโดยเซเนเตอร์นั้น มีโอกาสที่จะถูกกระตุ้นจากความร้อน กลับไปสู่แถบนำเหมือนเดิมมากกว่าโอกาสที่จะรวมตัวกับโฮลซึ่งถูกจับโดยเซเนเตอร์นั้น

และความหมายของสมการ 3.1.3.2 ก็คือ เซเนเตอร์นั้นจะเป็นรีคอมบิเนชันเซเนเตอร์ ถ้าอิเล็กตรอนซึ่งถูกจับโดยเซเนเตอร์นั้น มีโอกาสที่จะรวมตัวกับโฮลที่ถูกจับโดยเซเนเตอร์นั้น มากกว่าโอกาสที่จะถูกกระตุ้นกลับไปอยู่แถบนำเหมือนเดิม

ที่อุณหภูมิและความเข้มของแสงอันหนึ่ง เซเนเตอร์หนึ่งอาจทำหน้าที่เป็นแตรปิงเซเนเตอร์ แต่ที่อุณหภูมิและความเข้มของแสงอีกอันหนึ่ง เซเนเตอร์เดียวกันนั้นอาจทำหน้าที่เป็นรีคอมบิเนชันเซเนเตอร์ก็ได้

จากเหตุผลนี้เอง เราจึงนิยามระดับพลังงานที่เรียกว่าระดับคี่มาเคชัน (demarcation level) เพื่อให้แยงแยกชนิดของเซเนเตอร์ โดยนิยามดังนี้

ระดับคี่มาเคชันของอิเล็กตรอน คือระดับพลังงานที่ทำให้

$$n_T P v S_P = n_T S_n v N_C \exp\left(-\frac{E_{dn}}{k_B T}\right) \quad 3.1.3.3$$

เมื่อ E_{dn} คือความแตกต่างของพลังงานระหว่างแถบนำกับระดับอิเล็กตรอนคี่มาเคชัน สำหรับระดับคี่มาเคชันของโฮล คือระดับที่ทำให้

$$P_T n S_n v = P_T S_P v N_V \exp\left(-\frac{E_{dp}}{k_B T}\right) \quad 3.1.3.4$$

เมื่อ P_T คือความหนาแน่นของเซเนเตอร์ที่มีโฮลอยู่ที่เซเนเตอร์นั้น

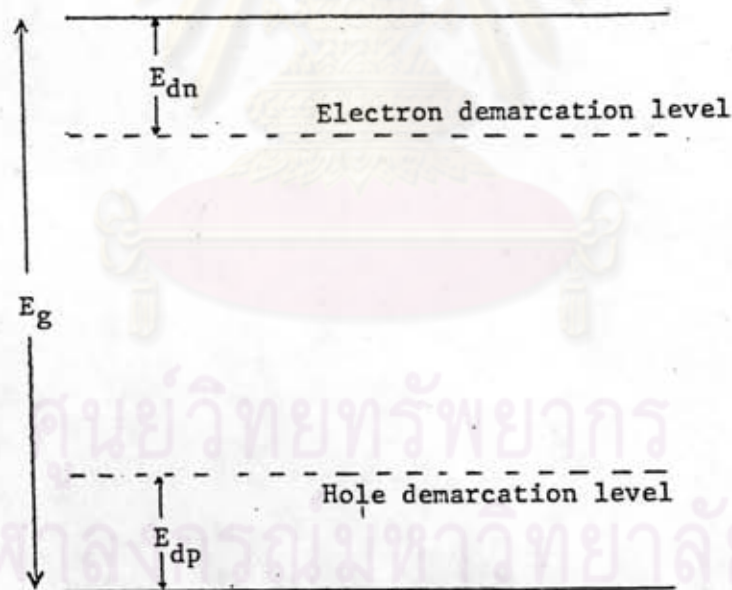
n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระ

N_V คือความหนาแน่นสถานะยังผลในแถบวาเลนซ์ของโฮลอิสระ

E_{dp} คือความแตกต่างของพลังงานระหว่างระดับโฮลตีมา เกชันกับแถบวาเลนซ์

รูป 3.7 แสดงให้เห็นระดับอิเล็กตรอนและโฮลตีมา เกชัน ที่ขณะใดขณะหนึ่ง (คือที่อุณหภูมิและความเข้มของแสงอันหนึ่ง) ถ้าระดับอิเล็กตรอนตีมา เกชันของ เซนเตอร์นั้นอยู่ใต้ระดับพลังงานของ เซนเตอร์นั้น ขณะนั้น เซนเตอร์นั้นจะเป็นแตรปปีง เซนเตอร์สำหรับอิเล็กตรอน หรือ ถ้าขณะใดขณะหนึ่งระดับโฮลตีมา เกชันของ เซนเตอร์นั้นอยู่เหนือระดับพลังงานของ เซนเตอร์นั้น ขณะนั้น เซนเตอร์นั้นจะเป็นแตรปปีง เซนเตอร์สำหรับโฮล และถ้าขณะใดขณะหนึ่ง เซนเตอร์โคอยู่ระหว่างระดับอิเล็กตรอนตีมา เกชันกับโฮลตีมา เกชัน ขณะนั้น เซนเตอร์นั้นจะเป็นรีคอมบิเนชัน เซนเตอร์

เนื่องจากระดับตีมา เกชันนิยามด้วยกรอบสี่เหลี่ยมของ เซนเตอร์ ดังนั้นแต่ละ เซนเตอร์ จึงมีระดับตีมา เกชันของตนเอง

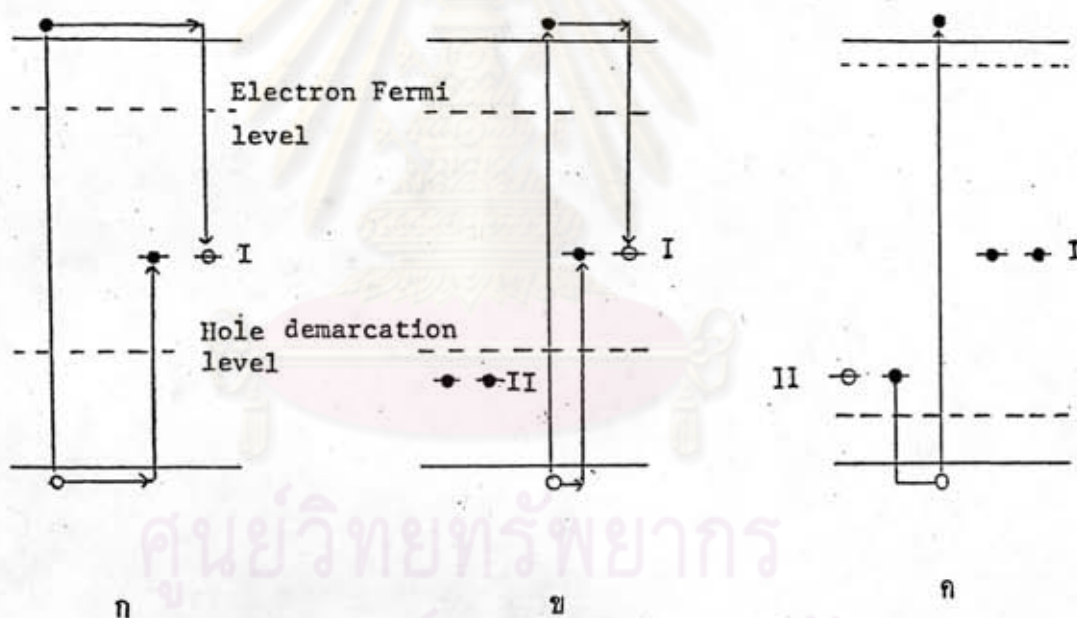


รูปที่ 3.7 แสดงระดับอิเล็กตรอนตีมา เกชันและระดับโฮลตีมา เกชัน

3.2 เซนซิไตซิงเซนเตอร์ [17] (sensitizing centers)

โดยทั่วไปแล้วสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกนั้น จะทำให้ช่วงชีวิตของพาหะอิสระสั้นลง แต่มีสิ่งเจือปนหรือความไม่สมบูรณ์ของผลึกบางจำพวก ซึ่งเรียกว่า เซนซิไตซิงเซนเตอร์ กลับทำให้ช่วงชีวิตของพาหะอิสระยาวขึ้น เซนเตอร์พวกนี้มีครอสเซกชันที่จะจับพาหะอิสระข้างน้อย (minority carriers) มากกว่าครอสเซกชันที่จะจับพาหะอิสระข้างมาก (majority carriers)

รูปที่ 3.8 แสดงสาเหตุที่เซนซิไตซิงเซนเตอร์ทำให้ช่วงชีวิตของพาหะอิสระยาวขึ้นได้ โดยในตัวอย่างนี้เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น สารนี้มี 2 เซนเตอร์คือเซนเตอร์ I ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงานและเซนเตอร์ II ซึ่งอยู่ตื้นไม่ห่างจากแถบวาเลนซ์มากนัก



ศูนย์วิทยทรัพยากร

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.8 แสดงกระบวนการของเซนซิไตซิงเซนเตอร์ในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น



- รูปที่ 3.8 ก เมื่อมีแคเซนเตอร์ I อย่างเดียว แคเซนเตอร์ I จะจับทั้ง อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระ
- รูปที่ 3.8 ข เมื่อมีทั้งแคเซนเตอร์ I และ II และเป็นกรณีที่อุณหภูมิสูง หรือความเข้มของแสงต่ำ รัศมีคัมมาเคชันของโฮลของแคเซนเตอร์ II จะอยู่เหนือแคเซนเตอร์ II แคเซนเตอร์ II จึงทำหน้าที่เป็น แทรปปีงแคเซนเตอร์ ในกรณีนี้ทั้งแคเซนเตอร์ I และ II จะ ทำให้ช่วงชีวิตของพาหะอิสระสั้นลง
- รูปที่ 3.8 ค เมื่ออุณหภูมิหรือความเข้มของแสงมาก รัศมีโฮลคัมมาเคชัน ของแคเซนเตอร์ II จะอยู่ต่ำกว่าแคเซนเตอร์ II แคเซนเตอร์ II จึงทำหน้าที่เป็นรีคอมบิเนชันแคเซนเตอร์ เนื่องจากแคเซนเตอร์ II มีครอสเซกชันที่จะจับโฮลอิสระมากกว่าที่จะจับอิเล็กตรอนอิสระ แคเซนเตอร์ II จึงจับโฮลไว้มาก เหลือแคอิเล็กตรอนไว้ให้ แคเซนเตอร์ I จับ ดังนั้นแคเซนเตอร์ I ที่มีความสามารถจับ อิเล็กตรอนอิสระจะน้อยลง

เนื่องจากอิเล็กตรอนอิสระมีโอกาสที่จะถูกจับน้อยลงนี้เอง ถ้าความหนาแน่นของ แคเซนเตอร์ I และ II มากกว่าความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระมาก ๆ แล้ว ช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนอิสระจะยาวนาน

แต่ถ้าความหนาแน่นของแคเซนเตอร์ I และ II ไม่มากกว่าความหนาแน่นของ อิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระมาก ๆ แล้ว จะไม่เห็นการยาวนานของช่วงชีวิตของพาหะอิสระ การที่สารกึ่งตัวนำมี เซนซิไตซิง แคเซนเตอร์อยู่จะทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นมีคุณสมบัติ

3 อย่างคือ

3.2.1 ซุปเปอร์ลิเนียร์ตี (superlinearity)

ในสารกึ่งตัวนำที่มีเซนซิไตซิงแคเซนเตอร์ที่อุณหภูมิคงที่ ถ้าเราเพิ่มความเข้มของ แสงที่ส่องลงบนสารกึ่งตัวนำรัศมีโฮลคัมมาเคชันของแคเซนเตอร์ II จะอยู่ต่ำกว่าแคเซนเตอร์ II ซึ่งจะทำให้

$\frac{\text{การเพิ่มของกระแสเนื่องจากแสง}}{\text{การเพิ่มของความเข้มของแสง}} > 1$

ปรากฏการณ์เองที่เรียกว่าซูปเปอร์ลิเนียร์ตี

3.2.2 เทอร์มัลควENCHING (thermal quenching)

ในสารกึ่งตัวนำที่มีเซนซีไตฟิเคชัน เช่น เซนเซอร์ที่ความเข้มของแสงคงที่ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ระดับคิมาเคชันของโฮลของเซนเซอร์ II จะอยู่เหนือเซนเซอร์ II ช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนอิสระก็จะไม่ยาวขึ้น กระแสเนื่องจากแสงจะลดลง ปรากฏการณ์การลดลงของกระแสเนื่องจากความร้อนนี้เรียกว่าเทอร์มัลควENCHING

3.2.3 ออปติคัลควENCHING (optical quenching)

ถ้าโฮลที่ถูกจับไว้โดยเซนเซอร์ II ของสารกึ่งตัวนำที่มีเซนซีไตฟิเคชันเซนเซอร์ ถูกกระตุ้นจากแสงไหลลงมาอยู่ที่แถบวาเลนซ์เหมือนเดิม เซนเซอร์ I ก็จะมีโอกาสจับโฮลได้ ช่วงชีวิตของอิเล็กตรอนอิสระจะไม่ยาวขึ้น กระแสเนื่องจากแสงก็จะลดลง ปรากฏการณ์การลดลงของกระแสเนื่องจากแสงนี้เรียกว่าออปติคัลควENCHING

การเพิ่มความเข้มของแสงนั้นที่ความเข้มของแสงอันหนึ่งปรากฏการณ์ซูปเปอร์ลิเนียร์ตีอาจจะเด่น แต่ที่ความเข้มของแสงอีกอันหนึ่งปรากฏการณ์ออปติคัลควENCHING อาจจะเด่น

3.3 ชนิดของวิธีวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

หลักใหญ่ ๆ ของการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงนั้นได้เคยแสดงไว้แล้วในรูป 3.1 แต่หากถึงรายละเอียดของวิธีวัดแล้ว จะทำให้แบ่งชนิดของวิธีวัดออกได้เป็น 2 วิธี คือ วิธีวัดตามแบบฉบับ และวิธีวัดตามแบบกระแสคงที่ ซึ่งข้อมูลที่ได้จากวิธีวัดแต่ละวิธีจะให้ความหมายไม่เหมือนกัน ความหมายของข้อมูลที่เหมือนกันนี้จะได้กล่าวโดยละเอียดในหัวข้อ 3.3.2

3.3.1 วิธีวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตามแบบฉบับ

วิธีวัดแบบนี้เป็นวิธีที่ใช้กันทั่ว ๆ ไป โดยในรูป 3.1 นั้น สมมติว่าเราให้โฟตอน ϕ_1 ตัวที่มีพลังงาน $h\nu_1$ ตกลงบนสารกึ่งตัวนำแล้วทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสง ΔJ_1 และให้โฟตอน ϕ_2 ตัวที่มีพลังงาน $h\nu_2$ ตกลงบนสารกึ่งตัวนำแล้วทำให้เกิดกระแสเนื่องจากแสง ΔJ_2 และอื่น ๆ อีก

ถ้าเราไม่สนใจปริมาณของ ΔJ ที่เกิดว่าจะเท่ากันหรือไม่ ก็ไม่สนใจว่า $\Delta J_1 = \Delta J_2 = \Delta J$ อื่น ๆ หรือไม่ เราเรียกวิธีวัดที่ไม่สนใจปริมาณ ΔJ ที่เกิดขึ้นนี้ว่า วิธีวัดตามแบบฉบับ

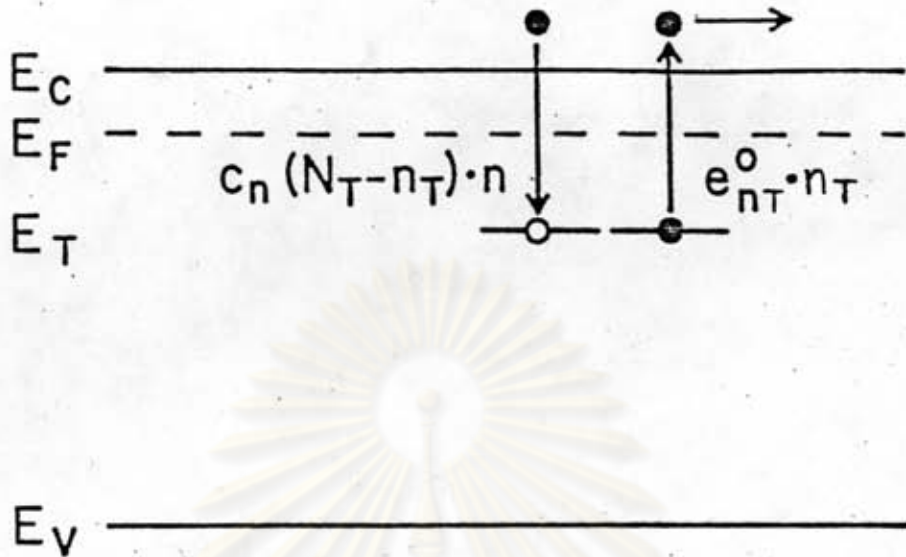
3.3.2 วิธีวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตามแบบกระแสคงที่ [2]

วิธีวัดในหัวข้อ 3.3.1 นั้นถ้าเราจัดให้ $\Delta J_1 = \Delta J_2 = \Delta J$ อื่น ๆ เราเรียกวิธีวัดที่จัด ΔJ ที่เกิดขึ้นให้คงที่นี้ว่า วิธีวัดแบบกระแสคงที่

ทั้งวิธีวัดตามแบบฉบับและวิธีวัดตามแบบกระแสคงที่นั้นหาผลตอบสนองต่อแสงได้จาก $\frac{\Delta J}{\phi}$ แต่ความหมายของ $\frac{\Delta J}{\phi}$ ที่ออกมาจากการวัดแต่ละวิธีจะแตกต่างกัน ซึ่งจะเห็นได้จากตัวอย่างดังต่อไปนี้

รูปที่ 3.9 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระจากเซมิคอนดักเตอร์ E_T ซึ่งอยู่ลึกเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงาน ถ้าแสงที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนมีพลังงาน $h\nu < E_T - E_V$ แต่ $h\nu > E_C - E_T$ และถ้าไม่คิดความมีการกระตุ้นเนื่องจากความร้อน อิเล็กตรอนอิสระทั้งหมดในแถบนำจะมาจากเซมิคอนดักเตอร์ E_T

ศูนย์วิทยพัทยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.9 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยอิเล็กตรอนอิสระทั้งหมดเกิดจากเซนเตอร์ E_T

ที่สถานะคงที่ (steady state) จำนวนอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำจะคงที่ นั่นคือ

$$\frac{dn}{dt} = e_{nT}^o n_T - c_{nT} n(N_T - n_T) = 0 \quad 3.3.2.1$$

- เมื่อ n คือความหนาแน่นของอิเล็กตรอนอิสระในแถบนำ
- t คือเวลา
- n_T คือความหนาแน่นของเซนเตอร์ E_T ที่ยังคงมีอิเล็กตรอนอยู่
- N_T คือความหนาแน่นของเซนเตอร์ E_T ทั้งหมด
- c_{nT} คือค่าคงที่ของการจับอิเล็กตรอนอิสระของเซนเตอร์ E_T
- e_{nT}^o คืออัตราการปล่อยอิเล็กตรอนเนื่องจากแสง (optical emission rate) ของเซนเตอร์ E_T
- ซึ่ง $e_{nT}^o = S_{nT}^o(h\nu) \cdot \phi(h\nu)$

เมื่อ $s_{nT}^0(h\nu)$ คือโฟโตไอออไนเซชันครอสเซกชัน (photoionization cross section) ของเซมิคอนดักเตอร์ E_T ซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานของโฟตอน

$\phi(h\nu)$ คือฟลักซ์ของโฟตอนซึ่งเป็นฟังก์ชันของพลังงานของโฟตอนเอง

เทอมแรกทางขวามือของสมการ 3.3.2.1 นั้นคืออัตราการเกิดอิเล็กตรอนอิสระ ส่วนเทอมที่สองนั้นคืออัตราการจับอิเล็กตรอนอิสระ

สมการ 3.3.2.1 นั้นอาจเขียนอีกอย่างหนึ่งเป็น

$$s_{nT}^0(h\nu) \phi(h\nu) (N_T - n) - c_{nT} n^2 = 0 \quad 3.2.2.2$$

ในสมการ 3.3.2.2 นี้จะเห็นว่าจำนวนอิเล็กตรอนอิสระ n มีความสัมพันธ์แบบไม่เป็นเชิงเส้นกับ $s_{nT}^0(h\nu)$ และ $\phi(h\nu)$

ดังนั้นเมื่อกำหนดผลตอบสนองต่อแสงของการวัดตามแบบฉบับผลที่คำนวณได้จึงไม่ได้ให้ความหมายอะไรเลย

ความยุ่งยากจะมีมากขึ้นอีก ถ้าสารกึ่งตัวนำนั้นมีเซมิคอนดักเตอร์หลายเซมิคอนดักเตอร์วิธีง่าย ๆ ที่จะขจัดความยุ่งยากอันนี้ ทำได้โดยการจำกัดให้ n คงที่ ผลที่ตามมาคือ $n_T = N_T - n$ จะคงที่ด้วย ดังนั้นในสมการ 3.3.2.2 ถ้า n คงที่จะได้

$$s_{nT}^0(h\nu) = \frac{\text{ค่าคงที่}}{\phi(h\nu)} \quad 3.3.2.3$$

การทำให้ n คงที่ในทางปฏิบัติคือทำกระแสเนื่องจากแสง ΔJ คงที่นั่นเอง นี่คือเหตุผลของการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงตามแบบกระแสคงที่

ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำนั้นมีเซมิคอนดักเตอร์อื่นซึ่งอยู่ติด ๆ ไม่ห่างจากแถบนำมากนัก สมมติให้เซมิคอนดักเตอร์นี้คือ E_{Ti} ถ้าขณะใดขณะหนึ่ง $h\nu \gg E_c - E_{Ti}$ ค่าโฟโตไอออไนเซชันครอสเซกชันของเซมิคอนดักเตอร์ E_{Ti} คือ s_{ni}^0 จะน้อยมาก การเกิดของอิเล็กตรอนอิสระเนื่องจากแสงของเซมิคอนดักเตอร์ E_{Ti} จึงคิดทิ้งได้ แต่จะมีการเกิดของอิเล็กตรอน

อิสระจากเซกเตอร์ E_{Ti} เนื่องจากความร้อนเพิ่มขึ้นมา ดังนั้นในกรณีที่มี E_{Ti} หลาย ๆ ชนิด

$$S_{nT}^o(h\nu) \phi(h\nu) n_T - C_{nT}(N_T - n_T)n + \sum (e_{ni}^t n_{Ti} - c_{ni}(N_{Ti} - n_{Ti})n) = 0 \quad 3.3.2.4$$

เมื่อ e_{ni}^t คืออัตราการปล่อยอิเล็กตรอนของเซกเตอร์ E_{Ti} แต่ละเซกเตอร์เนื่องจากความร้อน

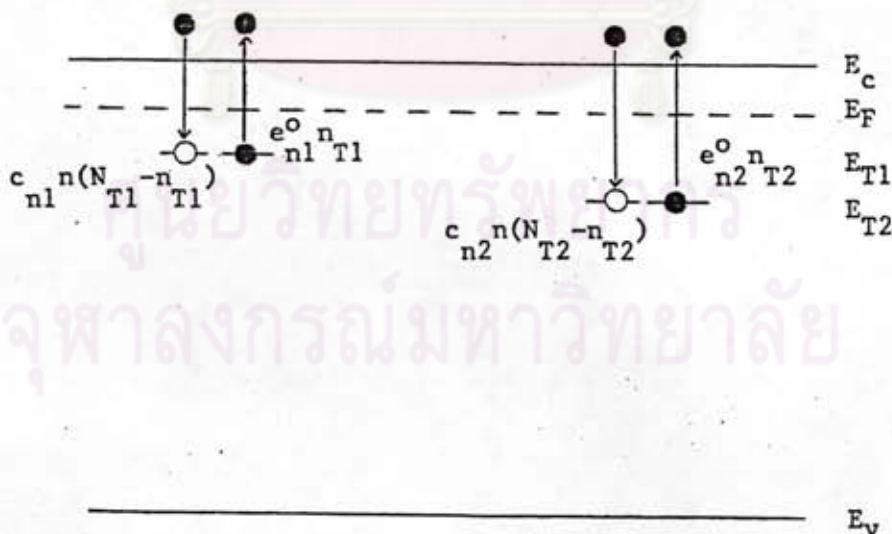
c_{ni} คือค่าคงที่ของการจับอิเล็กตรอนอิสระของเซกเตอร์ E_{Ti} แต่ละเซกเตอร์

N_{Ti} คือความหนาแน่นของเซกเตอร์ E_{Ti} แต่ละเซกเตอร์

n_{Ti} คือความหนาแน่นของแต่ละเซกเตอร์ E_{Ti} ที่ยังคงมีอิเล็กตรอนอยู่

ซึ่งในสมการ 3.3.2.4 นั้นถ้าทำให้ n คงที่แล้ว เซกเตอร์ E_{Ti} จะไม่มีผลต่อการคำนวณ นั่นคือสมการ 3.3.2.3 ยังคงใช้ได้

ในกรณีที่มีเซกเตอร์ที่มีระดับพลังงานลึกเข้าไปในช่องว่างแถบพลังงาน 2 เซกเตอร์ คือเซกเตอร์ E_{T1} และเซกเตอร์ E_{T2} โดย $E_{T2} < E_{T1}$ ดังรูป 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงการเกิดอิเล็กตรอนอิสระในสารชนิดเอ็นจากเซกเตอร์ E_{T1} และ E_{T2}

ในสภาวะที่การเกิดอิเล็กตรอนเนื่องจากแสงมากกว่าการเกิดอิเล็กตรอนเนื่องจากความร้อนมาก ๆ โดยแสงที่ใช้กระตุ้นอิเล็กตรอนมีพลังงาน $h\nu > E_c - E_{T2}$ แต่ $h\nu < E_{T2} - E_v$ ที่สถานะกึ่งที่จะได้ว่า

$$\frac{dn}{dt} = e_{n1}^0 n_{T1} - c_{n1} \rho n^2 + e_{n2}^0 n_{T2} - c_{n2} (1-\rho) n^2 = 0 \quad 3.3.2.5$$

ในที่นี้ $n\rho = N_{T1} - n_{T1}$ หรือก็คือ $(1-\rho)n = N_{T2} - n_{T2}$

โดยมีเงื่อนไขของสถานะกึ่งคือ

$$\frac{dn_{T1}}{dt} = e_{n1}^0 n_{T1} - c_{n1} \rho n^2 = 0 \quad 3.3.2.6$$

การวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงโดยทั่ว ๆ ไปนั้นใช้ความเข้มของแสงไม่มากนัก ซึ่งทำให้ $n \ll N_{T1}$ และ $n \ll N_{T2}$ นั่นคือ $n_{T1} \approx N_{T1}$ และ $n_{T2} \approx N_{T2}$ จากเงื่อนไขร่วมกับเงื่อนไขในสมการ 3.3.2.6 เมื่อแทนเข้าไปในสมการ 3.3.2.5 จะได้

$$\frac{S^0(h\nu)N_{T1}}{c_{n1}} + \frac{S^0(h\nu)N_{T2}}{c_{n2}} = \frac{n^2}{\phi(h\nu)} \quad 3.3.2.7$$

ถ้าจำกัดให้ n กงที่ในระหว่างวัด ในช่วงพลังงานของแสงซึ่ง

$$E_c - E_{T1} < h\nu < E_c - E_{T2} \quad \text{จะคำนวณ } S_{n1}^0(h\nu) \quad \text{ได้โดยตรงจาก } \frac{1}{\phi(h\nu)}$$

ส่วนในกรณีที่ $E_c - E_{T2} < h\nu < E_{T2} - E_v$ นั้น ถ้าการดูดซับของเซมิคอนดักเตอร์ทั้งสองจะรวมกัน โดยมีเวทแฟกเตอร์ (weight factors) $\frac{N_{T1}}{c_{n1}}$ และ $\frac{N_{T2}}{c_{n2}}$ ตามลำดับ

ที่กล่าวมาแล้วทั้งหมดในหัวข้อนี้เป็นกรณีที่ยังไม่มีโฮลอิสระมาเกี่ยวข้อง
 ถ้า $E_g > h\nu > E_T - E_V$ แล้ว จะมีโฮลอิสระเกิดขึ้นด้วย แต่โฮลอิสระที่เกิดขึ้น
 นั้นน้อยมากเมื่อเทียบกับอิเล็กตรอนอิสระที่เกิด จึงสามารถตัดทิ้งได้ สมการ 3.3.2.7
 จึงยังคงเป็นจริงอยู่

อย่างไรก็ตามโฮลอิสระที่มีจำนวนน้อยนั้นจะมีผลขึ้นมาถ้าหากว่าสารนั้นมีเซนเตอร์
 ที่มีประสิทธิภาพในการจับโฮลเพิ่มขึ้นไปอีก ดังรายละเอียดในหัวข้อ 3.2

3.4 ความสามารถทำซ้ำได้ในการวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง

กระบวนการสำคัญที่ทำให้การวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงไม่สามารถทำซ้ำได้
 เหมือนเดิม ก็คือกระบวนการแตรปิงและกระบวนการรีคอมบิเนชัน ดังได้กล่าวมาแล้ว
 ในหัวข้อ 3.1.3 ว่าเซนเตอร์หนึ่งจะทำหน้าที่เป็นแตรปิงเซนเตอร์หรือรีคอมบิเนชัน
 เซนเตอร์นั้น ขึ้นกับความเข้มของแสงและขึ้นกับอุณหภูมิ ดังนั้นช่วงชีวิตของพาหะอิสระ
 จึงขึ้นกับความเข้มของแสงและขึ้นกับอุณหภูมิด้วย

ยิ่งไปกว่านั้นอัตราการจับพาหะอิสระยังแปรผันตรงกับผลคูณของความหนาแน่นของ
 พาหะอิสระกับความหนาแน่นของเซนเตอร์นั้นที่วางอยู่ นั่นหมายความว่า การจับพาหะแต่ละ
 ครั้งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการจับพาหะครั้งต่อไป คือเงื่อนไขของการจับพาหะครั้งที่ 1
 ครั้งที่ 2 และครั้งต่อไปนั้น ไม่เหมือนกัน

ด้วยเหตุผลดังกล่าว การวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสงจึงไม่สามารถทำซ้ำได้
 เหมือนเดิม และเพื่อที่จะให้ทำซ้ำได้ เราจึงใช้แสงอีกอันหนึ่งที่มีพลังงานเท่ากับพลังงาน
 ไอออไนเซชัน (ionization energy) ของเซนเตอร์นั้น ส่งลงบนสารถึงตัวนำที่เรา
 ทดลองวัดสภาพนำไฟฟ้าเชิงแสง เพื่อจะให้เซนเตอร์นั้นไอออไนซ์ให้หมด เป็นการควบคุม
 เงื่อนไขของการจับพาหะแต่ละครั้งให้เหมือนกัน