

บทที่ 2

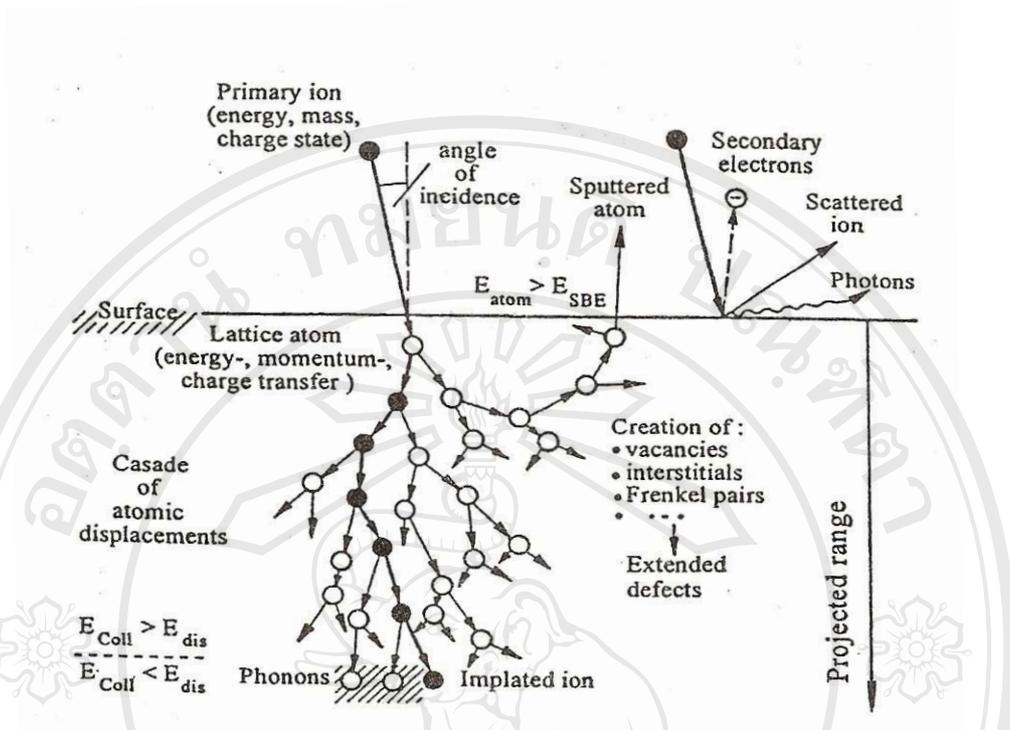
ทฤษฎี

2.1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้า

2.1.1 กระบวนการทางกายภาพของ Ion-solid interaction

เมื่อไอออนที่มีมวลและพลังงานเคลื่อนที่ไปชนกับผิวของเป้า ดังรูป 2.1 ไอออนที่เข้าชนจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ไอออนที่พุ่งเข้าชนเป้า เป็นการชนแบบยืดหยุ่นทำให้เมื่อชนแล้วมีการสะท้อนกลับออกมา ส่วนอะตอมของเป้าเมื่อได้รับการชนทำให้มีพลังงานจนวิ่งไปชนกับอะตอมอื่นๆ ของเป้าต่อกันไปเรื่อยๆ จนกว่าพลังงานในการชนจะน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมกับอะตอมจึงจะหยุดการชนซึ่งการชนแบบนี้เรียกว่าการชนแบบ cascade ส่วนที่ 2 ไอออนที่พุ่งเข้าชนสามารถผ่านเข้าไปในผิวของเป้าได้ จะทำให้เกิดการชนแบบ cascade เช่นเดียวกัน จนไปหยุดในผิวของเป้าซึ่งระยะทางที่วัดเป็นแนวเส้นตรงและตั้งฉากกับผิวตั้งแต่ผิวจนถึงจุดที่ไอออนหยุดจะถูกเรียกว่า projected range พลังงานที่สูญเสียไปขณะการชนจะอธิบายโดยค่า stopping cross section (Liangdeng, 1997) ในขณะชนกันนั้นสิ่งที่หลุดออกมาจากผิวของเป้า ได้แก่

- 1) Sputtered atom ซึ่งเป็นอะตอมของเป้าที่มีการชนกันไปมาจนหลุดออกจากเป้า เรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมเป้าว่า secondary electrons ซึ่งเป็นอิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจากการชน
- 2) Auger electrons เป็นอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมเป้าโดยได้รับพลังงานกระตุ้นจากการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนภายในอะตอมเอง
- 3) โฟตอนเป็นสเปกตรัมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนของโมเลกุลของเป้า
- 4) X-ray เกิดจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนภายใน K-shell ของอะตอม
- 5) gamma ray เกิดจากปฏิกิริยานิวเคลียร์



รูป 2.1 อันตรกิริยาระหว่างไอออนกับเป้าซึ่งมีการชนกันแบบ cascade (Ullman, et al., 1995)

2.1.2 Stopping cross section

Stopping cross section เป็นค่าที่อธิบายการสูญเสียพลังงานของไอออนขณะที่ผ่านเข้าไปในผิวของเป้า ตามสมการ 2.1

$$S(E) = \frac{-1}{N} \frac{dE}{dx} \tag{2.1}$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 Copyright © by Chiang Mai University
 All rights reserved

- เมื่อ $S(E)$ คือ stopping cross section
- N คือ จำนวนความหนาแน่นของอะตอมเป้า
- E คือ พลังงานในการเคลื่อนที่ที่ตำแหน่ง x
- $-dE$ คือ พลังงานที่สูญเสียไปขณะที่ไอออนเคลื่อนที่ไปในเป้าเป็นระยะ dx

Stopping cross section ประกอบด้วย 2 ส่วนคือ nuclear stopping (S_n) และ electronic stopping (S_e) ดังนั้น total stopping cross section ตามสมการ 2.2

$$S = S_n + S_e \quad (2.2)$$

เมื่อ S_n คือ nuclear stopping
 S_e คือ electronic stopping

Nuclear stopping (S_n) เป็นการชนแบบยืดหยุ่น (elastic collision) ระหว่างนิวเคลียสกับนิวเคลียส เกิดการถ่ายเทพลังงานจากไอออนไปยังอะตอมของแข็ง ทำให้เปลี่ยนจุดศูนย์กลางมวลของอะตอมที่ถูกระเบิด โดยปกติกระบวนการนี้จะเกิดที่พลังงานต่ำกว่า 20 keV

Electronic stopping (S_e) เป็นการชนแบบไม่ยืดหยุ่น (non-elastic collision) ระหว่างกลุ่มอิเล็กตรอนของไอออนและเป้า กระบวนการนี้มักจะเกิดที่พลังงานมากกว่า 10- 20 keV เพราะเมื่อพลังงานสูง ไอออนสามารถจะเข้าใกล้อะตอมของเป้าได้ทำให้เกิดอันตรกิริยาระหว่างกลุ่มของอิเล็กตรอนทั้งสองและเกิดการถ่ายเทพลังงานระหว่างอิเล็กตรอนขึ้น ซึ่งกระบวนการนี้จะซับซ้อนกว่ากระบวนการแรก

2.1.3 Projected range

ระยะทางที่ไอออนเข้าไปในผิวของเป้าสามารถแบ่งได้ 2 แบบคือ ระยะทางทั้งหมดที่ไอออนสามารถเคลื่อนไปได้ในผิวของเป้าเรียกว่า total path length (R) และระยะทางตั้งฉากจากผิวของเป้าถึงจุดที่ไอออนหยุดเรียกว่า projected range (R_p) เสมือนว่าวัดจากระยะของเงาของ total path length ตามรูป 2.2 โดยค่า total path length สามารถหาได้จากสมการ 2.3

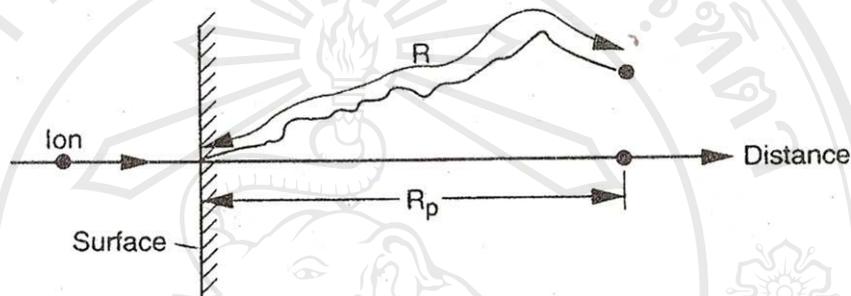
$$R = \int_0^{E_0} \frac{1}{N S(E)} dE \quad (2.3)$$

เมื่อ R คือ total path length
 N คือ จำนวนความหนาแน่นของอะตอมเป้า
 E_0 คือ พลังงานเริ่มต้นของไอออน

และค่า R_p หาได้จากสมการ 2.4

$$R_p = \sum dR_p = \sum_i dR \cos \phi_i \quad (2.4)$$

เมื่อ ϕ_i คือ มุมที่เบี่ยงเบนไปของไอออนที่เข้าชนจากแนวตั้งฉาก



รูป 2.2 Total path length (R) และ projected range (R_p) (Liangdeng, 1997)

2.2 กลไกพื้นฐานของการกระตุ้นที่ทำให้เกิดการเปล่งแสง

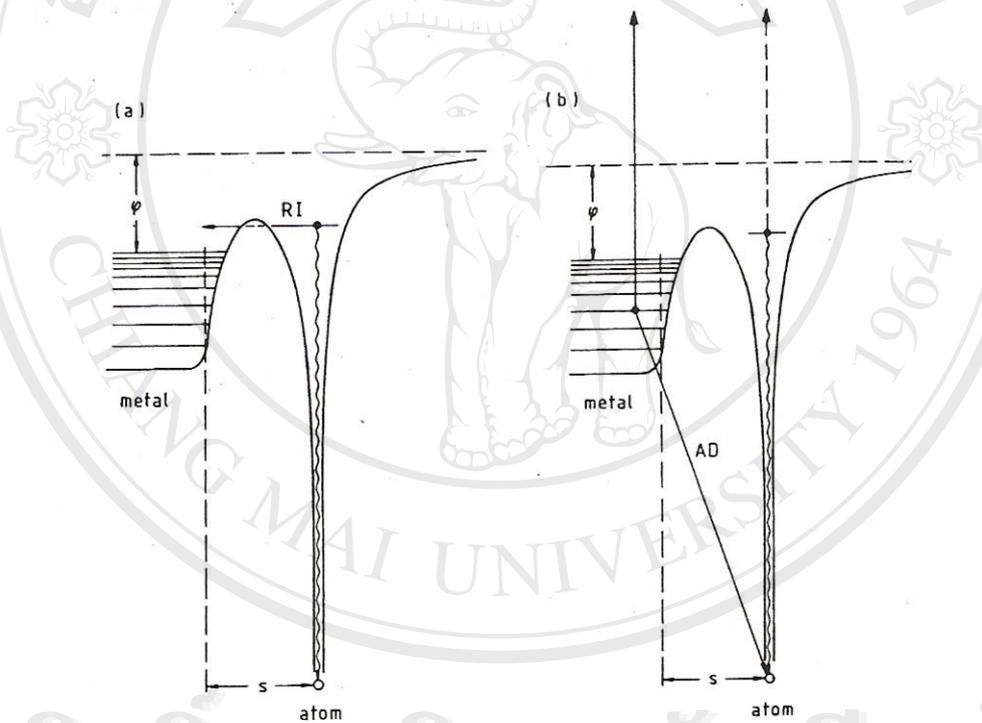
กลไกพื้นฐานต่างๆ ของการกระตุ้นทำให้เกิดการเปล่งแสงแบบ IL นั้นนักวิทยาศาสตร์หลายคนได้ใช้ความพยายามที่จะศึกษาและอธิบายมาเป็นเวลานานไม่น้อยกว่า 28 ปีมาแล้วโดยอธิบายในรูปของแบบจำลองต่างๆ (Vij, 1998) ดังต่อไปนี้

2.2.1 แบบจำลอง Electron Transfer

แบบจำลองนี้เกิดขึ้นจากการทดลองที่พบว่า อนุภาคที่ถูกกระตุ้นแล้วพุ่งออกจากพื้นผิวของเป้า (sputtered excited atom) มีผลกระทบต่อความเข้มของการเปล่งแสงแบบ IL จากบันทึกของ Van der weg and Rol (1965) พบว่ามีอะตอมในสถานะกระตุ้นที่พุ่งออกจากผิวโลหะขณะถูกระดมยิงด้วยไอออนที่มีพลังงาน และการที่พบเช่นนั้นเนื่องมาจากการชนกันแบบไม่ยืดหยุ่นของไอออนกับอะตอมภายในแลตทิซมากกว่าการชนแบบ cascade จากเหตุการณ์ที่พบในการทดลองที่กล่าวมาแล้ว สันนิษฐานว่ามีกระบวนการหลัก เกิดขึ้นในระหว่างการชนอยู่ 2 กระบวนการ ได้แก่

- 1) non-radiative deexcitation process ได้แก่ resonance ionization (RI) และ Auger deexcitation (AD)
- 2) radiative deexcitation process ได้แก่ photon emission

แบบจำลอง electron transfer เป็นแบบจำลองที่อธิบายเกี่ยวกับการเกิด resonance ionization (RI) และ Auger deexcitation (AD) พิจารณาตามรูป 2.3 ซึ่งแสดงแผนภาพบ่อพลังงานศักย์ของโลหะและระยะระหว่างอะตอมที่เรียงกันอยู่บริเวณผิวของโลหะ บ่อพลังงานศักย์ลึกเท่ากับ ϵ_0 มีอิเล็กตรอนอยู่เต็มทุกชั้นระดับพลังงานจนถึง Fermi level (ϵ_F) และ Fermi level อยู่ต่ำกว่า vacuum level เท่ากับฟังก์ชันงาน (work function; ϕ) กระบวนการ resonance ionization (RI) เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนที่หลุดจาก sputtered excited atom ซึ่งมีระดับพลังงานสูงกว่า Fermi level เกิดการ tunnel ผ่าน surface potential barrier ไปยังสถานะที่ว่างอยู่ในอะตอม



รูป 2.3 แผนภาพบ่อพลังงานศักย์ของโลหะและระยะระหว่างอะตอมที่เรียงกันอยู่บริเวณผิวของโลหะ (Vij, 1998)

a) เป็นกระบวนการ resonance ionization (RI)

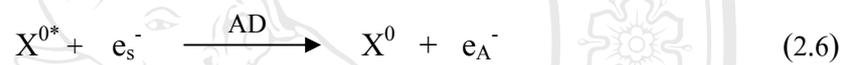
b) เป็นกระบวนการ Auger deexcitation (AD)

กระบวนการ resonance ionization (RI) แสดงอยู่ในรูปสมการได้ตามสมการ 2.5



เมื่อ X^{0*} คือ sputtered excited atom
 X^+ คือ ไอออน
 e_s^- คือ transfer electron

กระบวนการ Auger deexcitation (AD) เป็นกระบวนการที่อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับชั้นพลังงานที่สูงกว่าลดระดับพลังงานไปอยู่ระดับชั้นพลังงานที่ต่ำกว่าและว่างอยู่ แล้วปล่อยพลังงานออกมาไปกระตุ้นอิเล็กตรอนตัวอื่นให้หลุดออกจากอะตอมไป



เมื่อ e_A^- คือ Auger electron
 X^0 คือ อะตอมในสถานะพื้น

โดยการที่จะเกิด RI และ AD มากน้อยเพียงใดจะขึ้นอยู่กับค่า survival probability $R(s)$ ซึ่งคำนวณตามสมการ 2.7 - 2.9

$$\frac{dR(s)}{dt} = -R(s)A_{nr}(s) \quad (2.7)$$

เมื่อ $A_{nr}(s)$ คือ total non-radiative transition probability
 $R(s)$ คือ survival probability
 dt คือ เวลาที่เปลี่ยนแปลงไป

และ

$$A_{nr}(s) \approx \sum_k A_k \exp(-a_k s) \quad (2.8)$$

จากสมการ 2.8 แทนค่าเงื่อนไขขอบเขต $R(0) = 1$

จะได้

$$R(s) = \exp\left\{-\frac{1}{v_{\perp}} \sum_k \frac{A_k}{a_k} [1 - \exp(-a_k s)]\right\} \quad (2.9)$$

เมื่อ v_{\perp} คือ ความเร็วของอะตอมที่ถูกกระตุ้นในทิศทางตั้งฉากกับผิว
 $\frac{A_k}{a_k}$ คือ The survival parameter ของกระบวนการ non-radiative
 deexcitation ที่เป็นไปได้ k กระบวนการ ที่อยู่ในสถานะกระตุ้น
 s คือ ระยะทางตั้งฉากของอะตอมที่ถูกกระตุ้นกับผิว

สำหรับ long survival times ($t \rightarrow \infty$)

$$R(\infty) = \exp\left(\frac{-1}{v_{\perp}} \sum_k \frac{A_k}{a_k}\right) \quad (2.10)$$

จากสมการ 2.10 ข้างต้นนี้ ค่า A_k/a_k เรียกว่า the survival parameter ของกระบวนการ non-radiative deexcitation ที่เป็นไปได้ k กระบวนการที่อยู่ในสถานะกระตุ้น โดยถ้า A_k/a_k ยิ่งมีค่ามากก็จะทำให้เกิดการลดระดับพลังงานโดยไม่มีการแผ่รังสีออกมามาก ซึ่ง RI กับ AD โดยมากจะเกิดขึ้นกับโลหะ แต่สารจำพวกฉนวนจะไม่เกิดเนื่องจากมี band gap ที่กว้าง ดังนั้นวัสดุที่เป็นฉนวนจะให้ความเข้มของการเปล่งแสงแบบ IL สูงกว่าสารจำพวกโลหะ และสารจำพวกโลหะที่มีออกไซด์และไนไตรด์ อยู่บริเวณผิวก็จะให้ความเข้มของการเปล่งแสงแบบ IL สูงกว่าสารจำพวกโลหะชนิดเดียวกันที่ไม่มีส่วนประกอบของออกไซด์และไนไตรด์

2.2.2 แบบจำลอง Quantum mechanical

แบบจำลอง Quantum mechanical เป็นแบบจำลองที่พยายามอธิบายถึงอนุภาคที่อยู่ในสถานะกระตุ้นและสถานะไอออนไนซ์ในรูปของการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์ของอะตอมจากสถานะเริ่มต้น (initial state) ใน band structure ของของแข็งจนไปถึงสถานะที่ไม่ต่อเนื่อง (discrete state) สุดท้ายหรือสถานะไอออนไนซ์ในสุญญากาศ แบบจำลองนี้มีพื้นฐานมาจาก adiabatic perturbation theory, a molecular orbital model และ a dynamical equation of motion method ซึ่งจากพื้นฐานทั้ง 3 อย่างนี้ มีเพียง adiabatic perturbation

เท่านั้นที่เป็นการพิจารณาเฉพาะของ IL (Schroerer, *et al.*, 1973) สมการในการหาค่า excitation probability, R_q เป็นดังนี้

$$R_q = (A/\Delta E_q)^2 4(\hbar/\Delta t \Delta E_q)^4 \quad (2.11)$$

$$R_q = (A/\Delta E_q)^2 (\pi^2/4) \exp(-\Delta t \Delta E_q/\hbar)^4 \quad (2.12)$$

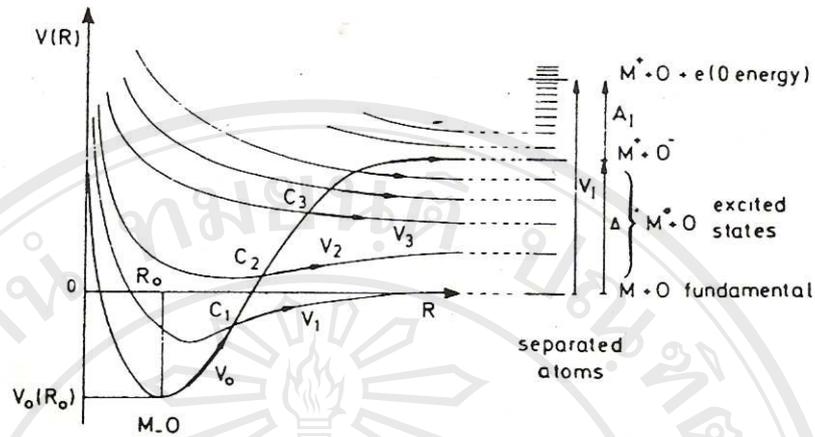
$$R_q = (A/\Delta E_q)^2 \pi \exp[-\frac{1}{2}(-\Delta t \Delta E_q/\hbar)^2]^2 \quad (2.13)$$

$$R_q = (A/\Delta E_q)^2 4(\hbar/\Delta t \Delta E_q)^n \quad (2.14)$$

เมื่อ	A	คือ	พลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอมที่ผิว
	ΔE_q	คือ	พลังงานกระตุ้น
	Δt	คือ	เวลาทั้งหมดในการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทางอิเล็กทรอนิกส์

2.2.3 แบบจำลอง Molecular

แบบจำลอง Molecular เป็นอีกแบบจำลองหนึ่งที่ยพยายามจะอธิบายการกระตุ้นของโมเลกุลจำพวกโลหะออกไซด์ต่างๆ โดยมีสัจพจน์ (postulated) ว่าการกระตุ้นเกิดขึ้นตามกราฟพลังงานศักย์ของโมเลกุล ดังรูป 2.4 ซึ่งมีการตัดกันของพลังงานศักย์ระหว่างอะตอมที่ถูกกระตุ้นกับอะตอมที่ถูกไอออนไนซ์ จะเห็นได้ว่าที่ระยะภายในนิวเคลียสมากขึ้น เส้นกราฟพลังงานศักย์ของอะตอมที่ถูกไอออนไนซ์จะตัดกันกับเส้นกราฟพลังงานศักย์ของอะตอมในสภาวะกระตุ้น ส่งผลให้ถ้าต้องการให้อะตอมอยู่ในรูปแบบของระดับการกระตุ้นจะต้องใช้พลังงานที่สูงขึ้นในพวกโลหะออกไซด์



รูป 2.4 แผนภาพพลังงานศักย์ของระบบ โมเลกุลของ โลหะกับออกซิเจน (M-O) เป็นฟังก์ชันของ ระยะภายในนิวเคลียส (Vij, 1998)

2.2.4 แบบจำลอง Local thermodynamic equilibrium and related

แบบจำลอง Local thermodynamic equilibrium and related เป็นแบบจำลองที่พยายามอธิบาย secondary-ion emission ที่เกิดขึ้น โดยอาศัยอยู่บนพื้นฐานที่ว่าขณะที่ระดมยิงไอออนไปบนผิวของชิ้นงานจะทำให้เกิดพลาสมาบริเวณผิวเนื่องจาก sputtering ของอะตอม ไอออน อิเล็กตรอนและโมเลกุล ทำให้เกิด local thermodynamic equilibrium ขึ้น จำนวนอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น i จะเป็นไปตาม Boltzmann distribution

$$N_i^* \approx \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \tag{2.15}$$

- เมื่อ N_i^* คือ จำนวนของอะตอมที่อยู่ในสถานะกระตุ้น i
- E_i คือ พลังงานที่สถานะกระตุ้น i
- k คือ ค่าคงที่ของ Boltzmann
- T คือ อุณหภูมิ

และความเข้มของเส้นสเปกตรัมจะเป็นไปตามสมการ 2.16 (Tsong and Yusuf, 1979)

$$I_{if} \approx g_i A_{if} \tau_i \exp\left(\frac{-E_i}{kT}\right) \quad (2.16)$$

เมื่อ	I_{if}	คือ	ความเข้มของเส้นสเปกตรัม
	g_i	คือ	the statistical weight of the upper level i
	A_{if}	คือ	Einstein coefficient สำหรับการทรานซิชันระหว่างระดับที่สูงกว่า i และระดับสุดท้าย f
	τ_i	คือ	lifetime ของสถานะกระตุ้น i

แต่แบบจำลองนี้ไม่เป็นที่น่าสนใจเนื่องจากไม่มีการทดลองมารองรับและแนวความคิดเกี่ยวกับแบบจำลองนี้มีโอกาสที่จะเกิดขึ้นน้อย

2.3 ฟิสิกส์ของการเปล่งแสง

2.3.1 หลักการการเกิด Ionoluminescence

อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นขณะที่ไอออนผ่านเข้าไปในผิวของเป้านำไปสู่การถ่ายทอดพลังงานจากไอออนสู่โมเลกุลของเป้า ทำให้เกิดทั้งการกระตุ้นโดยตรงและการไอออนไนซ์ของอะตอมและโมเลกุล ทั้งสองกรณีมีผลต่อการดูดกลืนพลังงานในแลตทิซ ทำให้ไอเล็กตรอนภายในแลตทิซมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานไปอยู่ในสถานะกระตุ้น เมื่อมีการลดระดับพลังงานลงมาทำให้เกิดการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของสเปกตรัม ซึ่งการเปล่งแสงที่เกิดขึ้นอาจจะเกิดขึ้นโดยตัวของวัตถุเองเป็นปัจจัยภายใน (intrinsic) หรือเกิดจากสารเจือซึ่งเป็นปัจจัยภายนอก (extrinsic) ก็ได้ ในการอธิบายผลที่ได้จากการทดลองจึงอธิบายเป็นเฉพาะกรณีไป

2.3.2 กระบวนการเปล่งแสงในของแข็ง

กระบวนการเปล่งแสงเกิดขึ้นได้ทั้งอินทรีย์วัตถุและอนินทรีย์วัตถุ ในกรณีของอินทรีย์วัตถุ การเปล่งแสงเป็นผลของการกระตุ้นโมเลกุล และมีทรานซิชันที่เกี่ยวข้องกับโหนดการสั่นของโมเลกุล ในกรณีของอนินทรีย์วัตถุนั้นจะต่างออกไปการเปล่งแสงซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับสารเจือ (impurities) สถานการณ์กระตุ้นของทั้งอะตอม โมเลกุลและไอออน และลักษณะของคำนิ

กระบวนการเปล่งแสงในของแข็งนั้นมีการแข่งขันกับกระบวนการ nonradiative การแข่งขันที่เกิดขึ้นนี้มีความสัมพันธ์กับผิว บริเวณหน้าสัมผัส ระดับความลึกของสารเจือ และตำแหน่งของผลึก โดยสิ่งที่มีอิทธิพลต่อการเปล่งแสงในของแข็งเป็นอย่างมากคือ extrinsic factors และในสารกึ่งตัวนำพบว่าสิ่งที่มีอิทธิพลมากต่อการเปล่งแสงคือ Shallow impurities นอกจากนี้การเปล่งแสงยังมีความสัมพันธ์กับ activators ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการเปล่งแสงดังนี้

1) Shallow impurities

พิจารณาตามรูป 2.5 แสดงการทรานซิชันแบบต่างๆระหว่าง band gap ที่ทำให้เกิดแสงของสารกึ่งตัวนำ semiconductor จะเห็นว่า การเปล่งแสงได้รับอิทธิพลมาจาก radiative recombination ของ free electron และ free hole ระหว่าง conduction band และ valence band ทรานซิชันของ (a) และ (b) เป็น extrinsic มีความสัมพันธ์กับ donor (E_D) และ acceptor (E_A) ของสารเจือ (a) เป็นทรานซิชันของ electron bound กับ neutral donor รวมกับ free hole ใน valence band (b) เป็นทรานซิชันของ free electron และ hole bound กับ neutral acceptor (c) เป็นอันตรกิริยาของ excitonic และ (d) เป็นทรานซิชันแบบ donor-acceptor pair recombination ซึ่งพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาตามสมการ 2.17 (Vij, 1998)

$$h\nu = E_g - (E_A + E_D) + (q^2/\epsilon r) - (q^2 b^5/\epsilon r^6) \quad (2.17)$$

เมื่อ E_g คือ energy gap

E_A คือ ระดับพลังงานของ acceptor

E_D คือ ระดับพลังงานของ donor

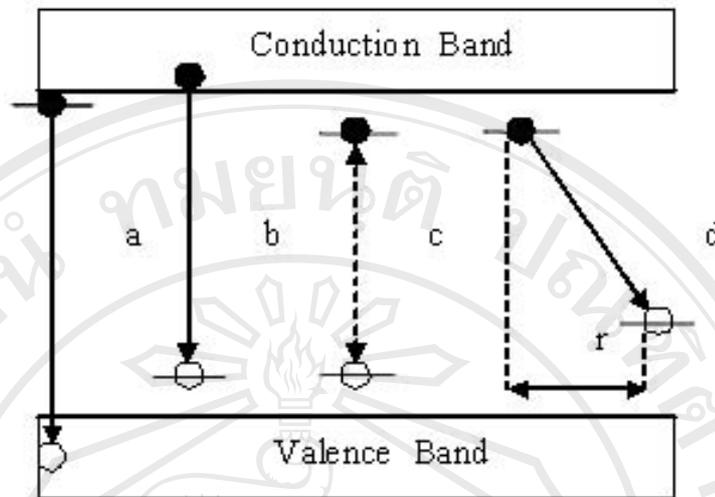
q คือ ประจุ

ϵ คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของผลึก

b คือ ค่า adjustable van der Waals

$q^2/\epsilon r$ แสดงอันตรกิริยาเนื่องมาจากคูลอมบ์

$q^2 b^5/\epsilon r^6$ แสดงโพลาไรเซชัน



รูป 2.5 แผนผังของการทรานซิชันทางอิเล็กทรอนิกส์ระหว่าง band gap ซึ่งเป็นสาเหตุของการเปล่งแสง (a, b) band-to-impurity, (c) excitonic interaction and (d) donor-acceptor pair transitions (Vij, 1998)

2) Excitons and Polaritons

excitons เป็นสมบัติของผลึกเกิดจาก Coulomb-coupled electron-hole pair โดยอันตรกิริยาจะมีค่ามากหรือน้อยก็ได้ สมบัติพื้นฐานของ Wannier- Mott excitons อธิบายได้โดย effective-mass approximation ซึ่งมีค่าพลังงานไอออนไนเซชันของ exciton เป็น

$$E_x = \frac{-m^* q^4}{2h^2 \epsilon^2 n^2} \quad (2.18)$$

เมื่อ m^* คือ reduced effective mass ของ อิเล็กตรอน (m_e) และ โฮล (m_h)

q คือ ประจุ

h คือ Planck's constant

n คือ จำนวนเต็มบวกมากกว่าหรือเท่ากับ 1 สำหรับสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น

ค่าของ reduced effective mass (m^*) ของ อิเล็กตรอน และ hole หาได้จากสมการ 2.19

$$m^* = \frac{m_e m_h}{m_e + m_h} \quad (2.19)$$

เมื่อ m_e คือ มวลของอิเล็กตรอน
 m_h คือ มวลของโฮล

polaritons เป็นโหมดผสมของการกระตุ้นภายในผลึกซึ่งเกิดจาก polarizing interaction ระหว่างการเคลื่อนที่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้ากับการสั่นแบบ harmonic ที่มีความถี่เดียวกันในผลึก อย่างไรก็ตามการที่ผลึกจะเปล่งแสงออกมาได้เกิดจากการที่ polaritons เคลื่อนที่ในผลึกแล้วเกิดเหตุการณ์ที่เรียกว่า inelastic event เช่น impurity scattering เป็นผลให้เกิดโฟตอนเกิดขึ้น

3) Activators และ Co-activators

activators เป็นการแสดงลักษณะเด่นของการเปล่งแสงโดยการเปลี่ยนระดับชั้นพลังงานของสารเจือโดยไม่เกี่ยวข้องกับโมเลกุลของผลึกที่มีสารเจือเข้าไปเจือปนอยู่ เช่น การเปล่งแสงของ Cr^{3+} ที่เป็นสารเจือใน Al_2O_3 โดยสามารถอธิบายได้จากการใช้ทฤษฎีสถานผลึก โดยการอธิบายระดับชั้นพลังงานต่างๆ มีพื้นฐานจาก symmetry coordination เช่น octahedral tetrahedral เป็นต้น และ co-activators เป็นสารเจือที่อยู่ในผลึกเช่นกัน แต่จะไม่เปล่งแสงเมื่อถูกกระตุ้นแต่จะมีส่วนช่วยให้ activators มีการเปล่งแสงได้ดียิ่งขึ้น

4) Deep impurities

ในกรณีนี้สารเจือมีผลต่อการเปล่งแสงเช่นกัน แต่ไม่สามารถอธิบายโดยใช้ effective-mass approximation ได้ เช่นทรานซิชันของโลหะที่เจือไปใน semiconductor ที่สร้างพันธะแบบโควาเลนต์ จึงจะอธิบายในรูปของ configurational - coordinate (CC) diagram ซึ่ง CC diagram จะอธิบายสถานะพื้นและสถานะกระตุ้นอันดับหนึ่งของสารเจือ เมื่อโครงสร้างผลึกถูกรบกวนมีโฟนอนเกิดขึ้นทำให้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของสารเจือ จากสถานะพื้นไปสถานะกระตุ้นอันดับหนึ่ง จากนั้นมี relaxation ปลดปล่อยโฟตอนออกมา ทำให้ atomic displacement กลับไปอยู่ที่เดิมในแลตทิซ