

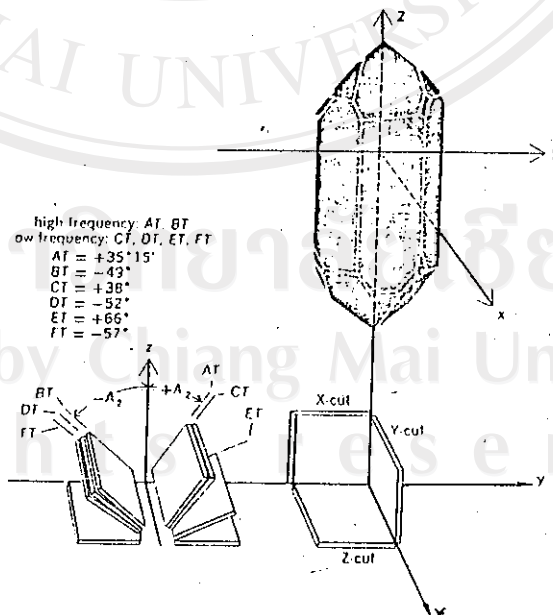
บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 ทฤษฎีพื้นฐานของผลึกควอตซ์ (7)

ผลึกควอตซ์ (Quartz crystal) เป็นสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีรูปผลึกเป็นแบบ Hexagonal เมื่อจะนำไปใช้งานจะต้องตัดผลึกเป็นแผ่นบางๆ แบบต่างๆ ดังรูปที่ 2.1 โดยมีโลหะฉาบอยู่ทั้งสองด้าน เชื่อมต่อมายังขั้วต่อภายนอกทั้งสองขั้ว การทำงานของผลึกควอตซ์อาศัยคุณสมบัติพิเศษที่ว่า เมื่อใส่แรงดันไฟฟ้าระหว่างขั้วต่อทั้งสอง สนามไฟฟ้าอันเนื่องมาจากแรงดันไฟฟ้าจะทำให้เกิดแรงต่อประจุในโครงสร้างของผลึก ทำให้ผลึกมีการเปลี่ยนรูป ในทางตรงกันข้ามถ้ามีแรงกลทำให้ผลึกเปลี่ยนรูป จะทำให้ประจุมีการกระจายไม่สม่ำเสมอ ทำให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วทั้งสอง

ในการใช้งานนั้น จะป้อนแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปคลื่นไปที่ขั้วทั้งสองของผลึก ซึ่งจะทำให้ผลึกนี้สั่น จึงเกิดแรงดันไฟฟ้าขึ้นที่ขั้วทั้งสองของผลึก ออกมาตามกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ตัวมัน แต่จะมีความถี่ค่าหนึ่งของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่ผลึก ไปทำให้ผลึกสั่นด้วยความถี่เท่ากัน ทำให้รูปคลื่นไฟฟ้าที่ได้มีแรงดันไฟฟ้า เสริมกันพอดี ความถี่จุดนี้เรียกว่า ความถี่เรโซแนนซ์ (Resonance frequency) ซึ่งมีความสัมพันธ์กับพื้นที่หน้าตัด และความหนาของผลึก (7)



รูปที่ 2.1 แสดงผลึกควอตซ์แท่งหกเหลี่ยมปลายแหลม แกน Z คือแกนออปติคของผลึก และแสดงแผ่นตัดแบบต่างๆ ซึ่งเอียงทำมุมต่างๆ กับแกนของผลึก (11)

โดยทั่วไปความถี่จากการสั่นของผลึกจะสัมพันธ์กับอุณหภูมิ โดยสัมประสิทธิ์อุณหภูมิของความถี่ (Temperature coefficient of frequency, TCF) เกี่ยวข้องกับค่าความยืดหยุ่น และทิศทางการสั่น

Sauerbrey และ Lostis⁽⁷⁾ ได้ทำการศึกษาโดยตัดผลึกควออร์ตซ์ให้เป็นแผ่นบางๆ แล้วใส่สนามไฟฟ้าเข้าไป ผลึกจะออสซิลเลต (Oscillate) ด้วยความถี่รีโซแนนซ์ค่าหนึ่ง ซึ่งจะแปรผกผันกับความหนาของแผ่นผลึก d_q ตามสมการ

$$f = C_q / 2d_q \quad (2.1)$$

เมื่อ f คือ ความถี่รีโซแนนซ์
 C_q คือ การแพร่กระจายความเร็วของคลื่นยืดหยุ่นในทิศทางของความหนา

$$\text{ซึ่ง } C_q = (C/\rho_q)^{1/2} \quad (2.2)$$

โดยที่ C คือ ค่าคงที่ของการยืดหยุ่นของ Shear
 ρ_q คือ ความหนาแน่นของผลึกควออร์ตซ์

จากสมการ(2.1) และ (2.2) จะได้

$$f = (1/2d_q)(C/\rho_q)^{1/2} \quad (2.3)$$

จากการทดลองพบว่า $1/2(C/\rho_q)^{1/2}$ มีค่าเป็น $1.67 \times 10^8 \text{ Hz}\cdot\text{mm}^{(7)}$
 สมมติให้ค่าคงที่นี้ คือ N
 ดังนั้นค่าความถี่รีโซแนนซ์จากสมการ (2.3) จะมีรูปสมการเป็น

$$f = N/d_q \quad (2.4)$$

ถ้ามีมวลมาเกาะบนผลึกควออร์ตซ์ Δm ความถี่ผลึกควออร์ตซ์จะเปลี่ยนไปเป็น

$$f = (N/d_q^2) \cdot \Delta d_q \quad (2.5)$$

จากความสัมพันธ์ $\rho = m/V$ และ $V = d_u \cdot A$ พบว่า

$$\Delta d_u = \Delta m / (\rho_u \cdot A) \quad (2.6)$$

แทนค่า (2.4) และ (2.6) ลงในสมการ (2.5) จะได้

$$\Delta f = (K f^2 \Delta m) / (N \rho_u A) \quad (2.7)$$

โดยที่ K ขึ้นอยู่กับการกระจายของสารที่ระเหย โดยปกติมีค่าเท่ากับ 1
 A เป็นพื้นที่ผิวทั้งหมดของแผ่นผลึก

ถ้ากำหนดค่า

$$C_f = f^2 / (N \cdot \rho_u) = N / (\rho_u \cdot d_u^2) \quad (2.8)$$

โดยที่ C_f เรียกว่า ความไวของ Mass-determination ของผลึกควอร์ตซ์

แทนค่าสมการ (2.8) ลงใน (2.7) จะได้

$$\Delta f = (-K C_f \Delta m) / A \quad (2.9)$$

จากสมการที่ 2.9 Δf แปรตาม Δm และเครื่องหมาย(-) หมายถึงความถี่จะลดลงเมื่อมวลเพิ่มขึ้น ซึ่งมวลที่เพิ่มขึ้นมากหรือน้อย ขึ้นกับอุณหภูมิที่ใช้เฟอสารให้ระเหยขึ้นไปเกาะบนผลึกควอร์ตซ์

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการระเหยสารในระบบสูญญากาศ ⁽⁷⁾

2.2.1 อัตราการระเหย (Evaporation Rate)

การหามวลของสารบนแผ่นนิลัมและการหาความหนาของแผ่นนิลัม พิจารณาได้จาก

อัตราการระเหย (Evaporation Rate) หรืออัตราการเกาะติดบนแผ่นรองรับซึ่งเป็นไปตามสมการของ เฮิร์ตซ์-ครูดเสน (Hertz-Knudsen equation)⁽⁷⁾ ซึ่งใช้ทฤษฎีจลน์ของก๊าซ (Kinetic gas theory) มาอธิบาย โดยที่อัตราของจำนวนโมเลกุลที่เกาะติดพื้นผิวของแผ่นรองรับ เป็นไปตามสมการที่ (2.10)

$$dN_{\text{u}}/A_{\text{u}} \cdot dt = (2mkT)^{-1/2} \cdot (P^* - P) \quad (2.10)$$

เมื่อ dN_{u} คือ จำนวนโมเลกุลที่ระเหยออกจากพื้นที่ผิว A_{u} ในช่วงเวลา dt

m คือ มวลของโมเลกุล

k คือ ค่าคงที่ของโบลต์ซมันน์ (Boltzmann constant)

T คือ อุณหภูมิองศาเคลวิน

P คือ ความดัน

P^* คือ ความดันสมดุล (Equilibrium pressure)

สมการที่(2.10) นี้เป็นอัตราการเกาะติดในกรณีอุดมคติ แต่ในทางปฏิบัติการเกาะติดไม่ได้เกิดขึ้นเนื่องมาจากโมเลกุลของสารทุกตัว จะมีเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้น ถ้าให้สัมประสิทธิ์ของจำนวนโมเลกุลของสารที่เกาะติดจริง ต่อจำนวนโมเลกุลทั้งหมดของสารที่ระเหยเป็น α_{u} จะได้ตามสมการที่ (2.11) ดังนี้

$$dN_{\text{u}}/A_{\text{u}} \cdot dt = \alpha_{\text{u}} (2mkT)^{-1/2} \cdot P^* \quad (2.11)$$

จากสมการที่ (2.11) ได้ประยุกต์ใช้ในการหาอัตราการกระทบของการระเหยสาร จากจุดใดพบว่าถ้า Γ เป็นค่าอัตราการระเหยของมวล จะได้ความสัมพันธ์ตามสมการที่(2.12)

$$\Gamma = m(dN_{\text{u}}/A_{\text{u}} \cdot dt) = (m/2kT)^{1/2} \cdot P^* \quad (2.12)$$

สมการที่ (2.12) สามารถเขียนใหม่เป็น

$$\Gamma = 5.834 \times 10^{-2} \cdot (m/T)^{1/2} \cdot P^* \quad (2.13)$$

ถ้าให้ m_e เป็นมวลทั้งหมดในการระเหยสาร จะพบว่า

$$m_e = \int \int \rho dA dt \quad (2.14)$$

2.2.2 ทิศทางการระเหยของโมเลกุลจากแหล่งกำเนิดแบบพื้นที่เล็ก (Directionality of evaporating molecules from small area source)

ทฤษฎีแหล่งกำเนิดในการระเหยสารมี 2 แบบ คือ แบบจุด (Point source) ซึ่งเป็นการระเหยของสารที่ออกจากแหล่งกำเนิดที่เป็นจุด เคลื่อนที่ออกในทุกทิศทาง และแบบพื้นที่เล็ก (Small area source) ซึ่งเป็นการกระจายของสาร ที่ออกจากแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่เล็กกระจายออกไป ขึ้นอยู่กับมุมและระยะห่างจากแหล่งกำเนิด จากผลการทดลองพบว่า แหล่งกำเนิดในการระเหยสารของระบบสอดคล้องกับแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่เล็ก^(๒.๑๑) ฉะนั้นการกระจายความหนาของฟิล์ม (Film thickness distribution) สามารถอาศัยสมมติฐานแหล่งกำเนิดดังกล่าวได้

พิจารณาการระเหยสารที่พื้นที่จุดระเหยเป็นจุดเล็ก จำนวนโมเลกุลที่ขึ้นไปเกาะบนแผ่นรองรับ จะเป็นไปตามกฎของ Cosine law of emission โดยที่การกระจายตัวของโมเลกุลเป็นแบบ Maxwellian speed distribution คือ

$$d^3N(\varphi) = (N/V)c\phi(c^2)dc dA dt \cos\varphi (d\Omega/4\pi) \quad (2.15)$$

เมื่อ N คือ จำนวนโมเลกุล

V คือ ปริมาตรของแหล่งกำเนิด

c คือ ความเร็วของโมเลกุล

dA คือ พื้นที่เล็กของแหล่งกำเนิด

$\phi(c^2)$ คือ ฟังก์ชันการกระจายของความเร็ว ซึ่งขึ้นอยู่กับค่า c^2

ทำการอินทิเกรตรวมความเร็ว c ทั้งหมด จะได้ว่า

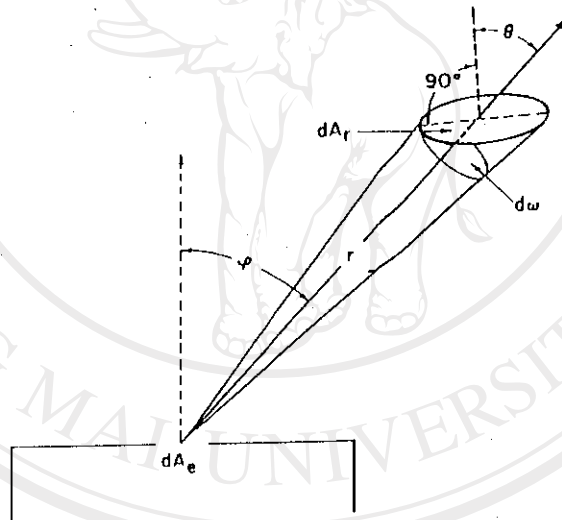
$$c\phi(c^2)dc = C$$

และ
$$d^2N(\varphi) = (1/4)(N/V)\rho dA dt \cos\varphi (d\omega/T) \quad (2.16)$$

มวลทั้งหมดของสารที่ใช้ในการระเหยเป็น m_e จากสมการที่ (2.14) และ (2.16) จะได้เป็น

$$dm(\varphi) = m_e \cos\varphi (d\omega/T) \quad (2.17)$$

สมการที่ (2.17) พบว่าทิศทางที่ตั้งฉากกับพื้นผิวที่ปลดปล่อยสาร ค่า $\cos\varphi$ จะมีค่าสูงสุด ได้ค่า dm มากที่สุด แต่มวลของสารที่ระเหยเกาะติดบนแผ่นรองรับ ขึ้นอยู่กับตำแหน่งของพื้นผิวรองรับ (Receiving surface) ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 แสดงการระเหยจากแหล่งกำเนิดที่เป็นพื้นที่เล็ก ๆ

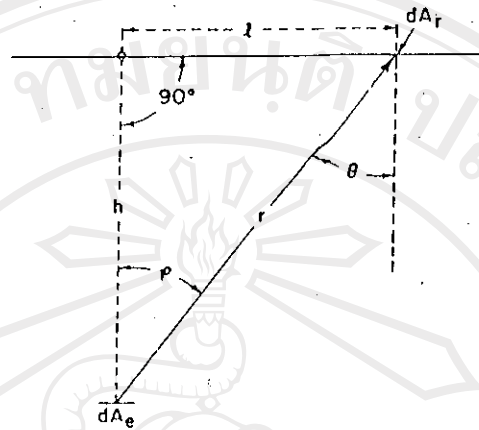
ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่เล็ก ๆ dA กับมุมตัน $d\omega$ ขึ้นอยู่กับระยะทางของแหล่งกำเนิด และมุมตกกระทบ θ จะเป็นไปตามสมการที่ (2.18)

$$dA = r^2 d\omega / \cos\theta \quad (2.18)$$

เพราะฉะนั้นมวลที่เกาะติดต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ จะเป็นไปตามสมการที่ (2.19)

$$dm/dA = (m_e / 4r^2) \cos\varphi \cos\theta \quad (2.19)$$

2.2.3 การกระจายความหนาของฟิล์ม (Film thickness distribution)



รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายความหนาของฟิล์มในระยะ l ต่างๆ

พิจารณารูปที่ 2.3 กำหนดให้ h เป็นระยะความสูงจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นรองรับ และให้ l เป็นระยะห่างจากจุดกึ่งกลางของแหล่งกำเนิดถึงพื้นที่เล็ก dA ที่มีมวลระเหยขึ้นไป เกาะติด ถ้าให้ความหนาแน่นของสารที่เกาะเป็นแผ่นฟิล์มมีค่า P จะได้ว่า

$$t = (1/P)(dm/dA) \quad (2.20)$$

เมื่อ t เป็นความหนาของแผ่นฟิล์ม

แทนค่า dm/dA จากสมการที่(2.19)ลงในสมการที่(2.20) เมื่อ $\cos\theta = \cos\phi$

และ $r^2 = l^2 + h^2$ จะได้

$$t = (m_c/1P)[h^2/(l^2+h^2)^2] \quad (2.21)$$

ถ้าค่าความไวของผลึกควอเตอร์ซ์ (Sensitivity) หรือ $\Delta f/\Delta m_{x-t_{m_1}}$ มีค่าคงที่เท่ากับ K

เมื่อวางตำแหน่งของผลึกควอเตอร์ซ์ห่างจากจุดศูนย์กลางแผ่นรองรับเป็นระยะ l_1 และสูงจากจุดระเหยเป็นระยะ h_1 โดยพื้นที่ที่เปิดรับให้มวลระเหยขึ้นไปเกาะเป็น A_u จะได้ว่า

$$m_c = 1(\Delta f/K A_u)[(l_1^2+h_1^2)^2/h_1^2] \quad (2.22)$$

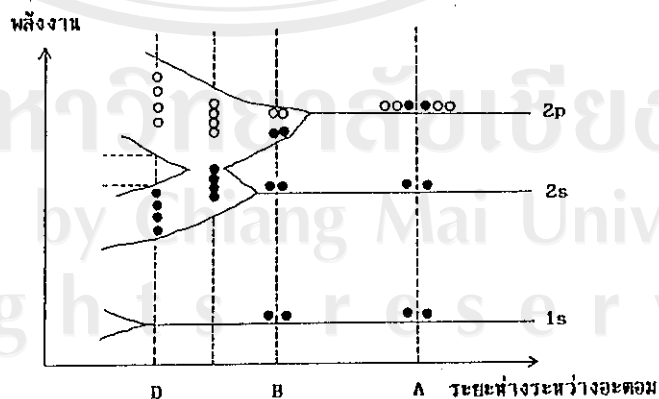
แทนค่า m_e ในสมการ (2.22) ลงในสมการ (2.21)

$$t = (\Delta F / PK_A) [\{ (1_1^2 + h_1^2)^2 / (1^2 + h^2)^2 \} (h^2 / h_1^2)] \quad (2.23)$$

สมการที่ (2.23) เป็นการกระจายความหนาของแผ่นฟิล์มที่ระยะ 1 ต่างๆ โดยใช้ผลึกควอ์ตซ์เป็นมอนิเตอร์

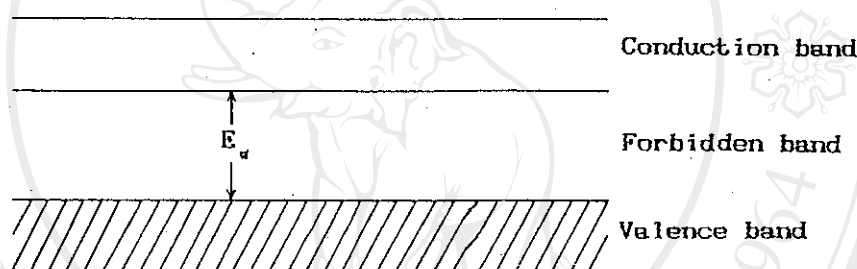
2.3 ทฤษฎีแถบพลังงานของของแข็ง (๘.๘)

อะตอมของของแข็งที่เป็นผลึกของโลหะและอโลหะจะอยู่ใกล้ชิดกันมาก ทำให้เกิดระบบของเวเลนซ์อิลีคตรอนเป็นระบบเดียวกันสำหรับผลึกทั้งก้อน โดยอิลีคตรอนจะจัดเรียงตัวกันอย่างเป็นระเบียบ ในระดับพลังงานของเวเลนซ์อิลีคตรอนที่อยู่นอกสุดจะเกิดอันตรกิริยากับระดับพลังงานของอิลีคตรอนที่อยู่ข้างเคียง ทำให้เกิดการซ้อนเหลื่อมกัน (over lap) กับระดับพลังงานของอิลีคตรอนเดิม แล้วระดับเวเลนซ์ (Valence level) จะแยกต่างระดับกับพลังงานใกล้เคียง จากอันตรกิริยานี้ทำให้ระดับพลังงานเดิมคมชัด (sharp) แบ่งออกเป็นช่วงต่อเนื่องกัน เรียกว่าแถบพลังงาน (Band) เมื่ออิลีคตรอนอยู่ในแถบพลังงาน เวเลนซ์อิลีคตรอนจะไม่ถูกบังคับให้อยู่กับอะตอมใดอะตอมหนึ่งสามารถข้ามไปมาระหว่างอะตอมได้ และเมื่อระยะระหว่างอะตอมใกล้กันมากขึ้น ระดับพลังงานของอิลีคตรอนในขั้นถัดไปก็จะเกิดอันตรกิริยาด้วย ทำให้มีการแยกเป็นระดับพลังงานออกเป็นแถบพลังงานดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงแผนภาพการจัดเรียงอิลีคตรอนที่ระดับพลังงานต่างๆ ตามตำแหน่งระยะห่างของอะตอมต่างๆกัน โดยให้ \bullet เป็นอิลีคตรอน

จากรูปที่ 2.4 แสดงการจัดเรียงอิเล็กตรอนในอะตอมของธาตุคาร์บอนเป็น $1s^2, 2s^2, 2p^2$ ที่ระยะต่างๆกัน พิจารณาที่ระยะ A มีระยะห่างระหว่างอะตอมมาก ระดับพลังงานคล้ายกับของอะตอมอิสระ อันตรกิริยาระหว่างอะตอมมีน้อยมาก ที่ระยะ B อะตอมเข้าชิดกันมากขึ้น มีอันตรกิริยาระหว่างอะตอมที่ระดับพลังงานของ เวเลนซ์อิเล็กตรอนเกิดการแยกออก (split) ของระดับพลังงาน ที่ระยะ C การแยกออกของระดับพลังงานยังไม่เด่นชัดมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ อิเล็กตรอนในแถบที่ว่างพลังงานสามารถเคลื่อนที่ไปมาอย่างอิสระ ซึ่งเป็นลักษณะโครงสร้างของสารพวกตัวนำ ที่ระยะ D อะตอมอยู่ใกล้กันมากจะเกิดอันตรกิริยาสูง ทำให้แถบพลังงานแยกเป็นแถบอย่างชัดเจน ยอมให้อิเล็กตรอนอยู่ในแถบพลังงานได้ ซึ่งจะเขียนให้ดูง่ายดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงแถบพลังงานของแถบนำ แถบต้องห้ามและแถบเวเลนซ์

ช่องว่างระหว่างแถบพลังงานเรียกว่าแถบต้องห้าม (Forbidden band) แถบล่างที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มหรือเกือบเต็มเรียกว่าแถบเวเลนซ์ (Valence band) ส่วนแถบบนที่ยอมให้อิเล็กตรอนอยู่ได้เรียกว่าแถบนำ (Conduction band) อิเล็กตรอนจากแถบเวเลนซ์สามารถกระโดดไปสู่แถบนำได้ถ้าได้รับพลังงานพอเพียง สารแต่ละชนิดจะมีความกว้างของแถบต้องห้ามต่างกัน สารพวกฉนวนจะมีความกว้างของแถบต้องห้ามมาก สารกึ่งตัวนำจะมีความกว้างของแถบต้องห้ามน้อยกว่าสารพวกฉนวน ส่วนสารพวกตัวนำ แถบนำและแถบเวเลนซ์จะซ้อนทับกันหรือเหลื่อมกัน ทำให้ในแต่ละแถบมีอิเล็กตรอนอยู่บ้าง แต่ถ้าแถบทั้งสองไม่เหลื่อมกัน ในแถบนำจะมีอิเล็กตรอนอยู่ครึ่งแถบ ทั้งนี้เพราะว่าอะตอมของโลหะมักจะมีจำนวนอิเล็กตรอนวงนอกสุดเป็นเลขคู่ ซึ่งถ้าให้ระดับพลังงานสูงสุดของแถบเวเลนซ์เป็น E_v ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำเป็น E_c และ E_g เป็นช่องว่างของแถบพลังงาน (Energy gap) จะได้ความสัมพันธ์ดังสมการ $E_g = E_c - E_v$ ส่วนระดับพลังงานที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้การแยกระดับพลังงานที่เต็มและที่ว่างอยู่ถัดไปเรียกว่าระดับเฟอร์มี (Fermi level)

2.4 โครงสร้างของแถบพลังงาน ^(๘)

โดยปกติที่อุณหภูมิศูนย์องศาเคลวิน ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่เต็มในแถบเวเลนซ์ ในแถบนำจะว่างเปล่าและมีค่าช่องว่างของแถบพลังงานไม่มากนัก ดังนั้นที่อุณหภูมิห้อง อิเล็กตรอนจึงสามารถถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบนำได้ ขณะเดียวกันก็จะทิ้งสถานะว่างไว้ในแถบเวเลนซ์ ซึ่งสถานะว่างนี้จะทำตัวเหมือนอนุภาคที่มีประจุบวกเคลื่อนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ เราเรียกว่า โฮล (Hole) มีผลทำให้สารกึ่งตัวนำมีพาหะนำประจุ (Charge carriers) 2 ชนิด คือ อิเล็กตรอนในแถบนำและโฮลในแถบวาเลนซ์ จึงมีการถ่ายเทกระแสไฟฟ้าระหว่างแถบทั้งสองได้ เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็กเข้าไป

ในการพิจารณาโครงสร้างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน ได้ใช้ฟังก์ชันการกระจายของเฟร์มี-ดิแรก ซึ่งบอกถึงโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานต่างๆ และใช้สมการของชเรอดิงเงอร์ร่วมกับทฤษฎีของบลอชในการกำหนดขอบเขตและพิจารณาในรูปฟังก์ชันคลื่น สำหรับที่จะใช้ในการแก้ปัญหาเพื่อจะศึกษาพลังงานของอิเล็กตรอนที่ระดับต่างๆ จากหลักการดังกล่าวจึงสามารถที่จะหาค่าพลังงานของอิเล็กตรอนในแถบนำและพลังงานของโฮลในแถบวาเลนซ์ได้คือ

$$E_{\uparrow}(k) = E_{\uparrow} + (\hbar^2 k^2 / 2m_{\uparrow}^*) \quad (2.24)$$

และ
$$E_{\downarrow}(k) = - (\hbar^2 k^2 / 2m_{\downarrow}^*) \quad (2.25)$$

เมื่อค่า k เป็นค่าเวกเตอร์ของคลื่น

E_{\uparrow} เป็นค่าช่องว่างของแถบพลังงาน

m_{\uparrow}^* เป็นค่ามวลประสิทธิผล (Effective mass) ของอิเล็กตรอน

m_{\downarrow}^* เป็นค่ามวลประสิทธิผลของโฮล

2.5 สมบัติทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ ^(๘.๑)

2.5.1 ผลของอุณหภูมิต่อสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ

สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำสามารถ ใช้การนำไฟฟ้าในโลหะทั่วไปมาอธิบายได้

ซึ่งเป็นไปตามสมการที่ (2.26)

$$\sigma = ne\mu \quad (2.26)$$

โดยที่ σ เป็นสภาพนำไฟฟ้า n เป็นความหนาแน่นของอิเล็กตรอน μ เป็นสภาพความคล่องตัว (Mobility) ของประจุพาหะ
ในกรณีของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ มีประจุพาหะ 2 ชนิดคือ อิเล็กตรอนกับโฮล ซึ่งจำนวนอิเล็กตรอนกับโฮลเท่ากัน จึงสามารถเขียนสภาพนำไฟฟ้าได้เป็นไปตามสมการที่ (2.27)

$$\sigma_i = n_i e (\mu_n + \mu_p) \quad (2.27)$$

ซึ่งค่าของ n_i ที่เป็นค่าความหนาแน่นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นแบบเอ็กโปเนนเชียลกับอุณหภูมิ ตามสมการที่ (2.28)

$$n = 2(k_B T / 2\pi h^2)^{3/2} (m_n m_p)^{3/4} [\exp(-E_g / 2k_B T)] \quad (2.28)$$

จากสมการที่ (2.27) และสมการที่ (2.28) สามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\sigma_i = 2e(k_B T / 2\pi h^2)^{3/2} (m_n m_p)^{3/4} [\exp(-E_g / 2k_B T)] (\mu_n + \mu_p) \quad (2.29)$$

โดยที่ μ_n และ μ_p เป็นสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ซึ่งค่าสภาพความคล่องตัวนิยามได้ตามสมการที่ (2.30)

$$\mu = e\tau / m^* \quad (2.30)$$

เมื่อ m^* เป็นมวลประสิทธิผล และ τ เป็นเวลาช่วงชีวิตของพาหะ (Life time) และพบว่าค่าสภาพความคล่องตัวจะแปรผกผันกับอุณหภูมิตามสมการที่ (2.31)

$$\mu \propto T^{-3/2} \quad (2.31)$$

ดังนั้นสมการที่ (2.29) จึงสามารถเขียนใหม่ได้เป็นสมการที่ (2.32)

$$\sigma = f(T) \exp(-E_g/2k_B T) \quad (2.32)$$

โดยที่ $f(T)$ เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ จากความสัมพันธ์ของสมการที่ (2.32) นี้ ทำให้สามารถหาค่า E_g ของสารกึ่งตัวนำได้ โดยอาศัยความชันของกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln \sigma$ กับ $1/T$ ในทำนองเดียวกันถ้ามีกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln R$ กับ $1/T$ ก็จะสามารถหาค่า E_g ของสารกึ่งตัวนำได้จากความสัมพันธ์ตามสมการที่ (2.33)

$$E_g = 2k_B \cdot (\text{ความชันของกราฟ}) \quad (2.33)$$

2.5.2 สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสงในสารกึ่งตัวนำ ^(๑)

ปรากฏการณ์สภาพนำไฟฟ้าเนื่องจากแสง (Photoconductivity) เกิดเมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำและทำให้สภาพนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากอิเล็กตรอนดูดกลืนโฟตอนแล้วโดดข้ามช่องว่างแถบพลังงาน ทำให้จำนวนพาหะนำประจุมีค่ามากขึ้นทั้งอิเล็กตรอนและโฮล กรณีสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ พลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบจะต้องมีค่าเท่ากับ หรือมากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำนั้น แต่ในกรณีสารกึ่งตัวนำที่มีสารอื่นเจือปนอยู่แม้ว่าพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบจะน้อยกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานก็ตาม คู่พาหะประจุก็มีโอกาสเกิดขึ้นได้ โดยพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบ จะไปกระตุ้นอิเล็กตรอนของสารเจือที่มีระดับของพลังงานอยู่ในแถบเวเลนซ์ ให้เข้าไปอยู่ในแถบนำได้

ในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ สภาพการนำไฟฟ้าจะหาได้จากสมการ

$$\sigma_0 = e(n_0 \mu_n + p_0 \mu_p) \quad (2.34)$$

เมื่อ n_0 และ p_0 เป็นความหนาแน่นของพาหะนำประจุที่สภาวะสมดุล σ_0 เป็นสภาพนำไฟฟ้าในที่มืด เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนพาหะนำประจุจะเพิ่มขึ้นด้วยปริมาณ Δn และ Δp ซึ่ง $\Delta n = \Delta p$ ดังนั้นสภาพนำไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบจะเป็นไปตามสมการที่ 2.35

$$\sigma = \sigma_0 + e\Delta n (\mu_n + \mu_p) \quad (2.35)$$

เมื่อให้ $b = \mu_{\text{e}} / \mu_{\text{h}}$ สภาพการนำไฟฟ้าเนื่องจากแสงจึงมีค่าตามสมการ

$$\Delta\sigma = e\Delta n\mu_{\text{h}}(1 + b) \quad (2.36)$$

ในขณะที่โฟตอนจากแสงสร้างพาหะขึ้นอย่างต่อเนื่อง พาหะก็จะรวมตัวกันหายไปตลอดเวลาด้วย ความหนาแน่นของพาหะจะแตกต่างจากสภาพสมดุล จำนวนพาหะที่เพิ่มขึ้นหาได้จากผลต่างของพาหะที่เกิดขึ้นเนื่องจากแสงกับพาหะที่หายไปเนื่องจากการรวมตัวกัน ตามความสัมพันธ์

อัตราการเกิดสุทธิ = อัตราการเกิดเนื่องจากแสง - อัตราการรวมตัวใหม่

$$\text{หรือ} \quad \frac{dn}{dt} = g - (n - n_0)/\tau \quad (2.37)$$

เมื่อ g เป็นอัตราการเกิดอิเล็กตรอนต่อหน่วยปริมาตร

τ เป็นเวลารวมตัวใหม่ซึ่งก็คือช่วงชีวิต(Life time)ของพาหะ

ที่สภาวะสมดุลอัตราการเกิดเท่ากับอัตราการรวมตัวใหม่ นั่นคือ $dn/dt = 0$

และเมื่อให้ $\Delta n = n - n_0$ จะได้ว่า

$$\Delta n = g\tau \quad (2.38)$$

ซึ่งอัตราการเกิดพาหะขึ้นอยู่กับจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนต่อหนึ่งหน่วยเวลา มีค่าเป็น $\alpha dN(\nu)$ และเนื่องจากการดูดกลืนโฟตอน 1 ตัวจะทำให้เกิดพาหะ 1 คู่ ดังนั้นจะได้ว่า

$$g = \alpha dN(\nu) / V \quad (2.39)$$

เมื่อ α เป็นสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

d เป็นความหนาของสาร

V เป็นปริมาตรของสาร

$N(\nu)$ เป็นจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อหน่วยเวลา

เนื่องจากจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบต่อหน่วยเวลา มีความสัมพันธ์กับความเข้มแสง

ตามสมการที่ (2.40)

$$N(\nu) = I_{\nu}(\nu)A / h\nu \quad (2.40)$$

โดยที่ $I_{\nu}(\nu)$ เป็นความเข้มแสง
 $I_{\nu}(\nu)A$ เป็นกำลังของแสงที่ตกกระทบ
 ν เป็นความถี่ของโฟตอน
 A เป็นพื้นที่ที่แสงตกกระทบ

จากสมการที่ (2.38) สมการที่ (2.39) และสมการที่ (2.40) จะได้ว่า

$$\Delta n = I_{\nu}(\nu) \tau / h\nu \quad (2.41)$$

แทนค่าสมการที่ (2.41) ลงในสมการที่ (2.36) จะได้เป็น

$$\Delta \sigma = dI_{\nu}(\nu) \tau \mu_{\nu} (1 + b) / h\nu \quad (2.42)$$

จากสมการที่ (2.42) จะเห็นว่าสภาพการนำไฟฟ้าเนื่องจากแสงในสารกึ่งตัวนำ จะแปรผันโดยตรงกับความเข้มของแสงที่ตกกระทบ