

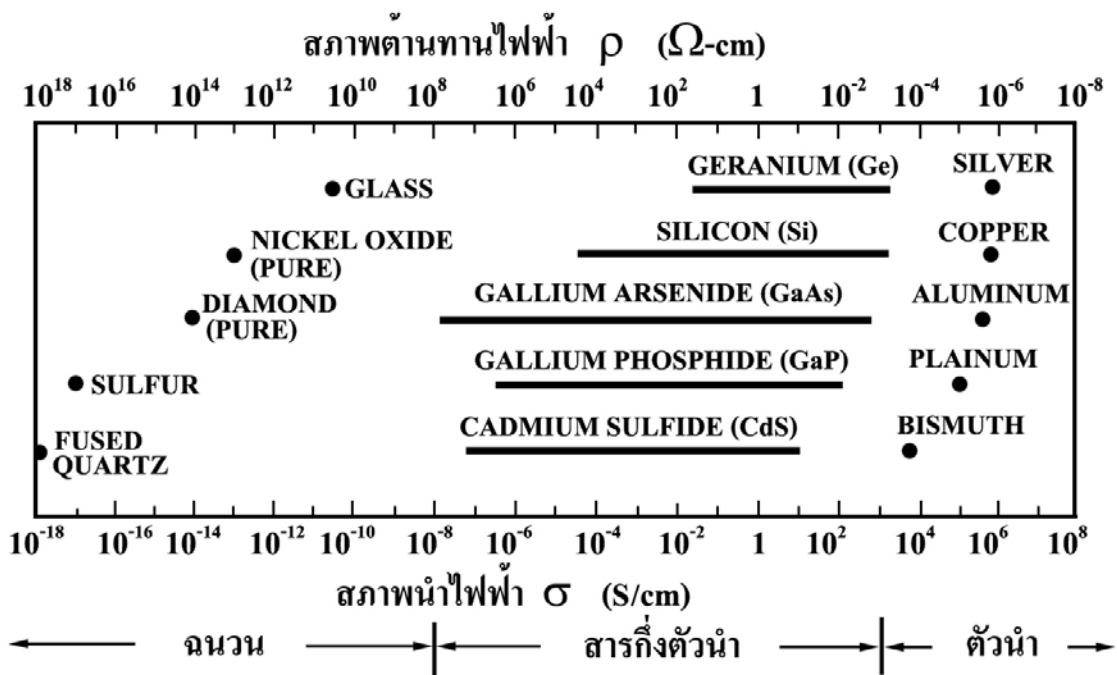
บทที่ 2

แนวคิด ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สารกึ่งตัวนำ [20-24]

ในบรรดาวัสดุไฟฟ้า โดยมี ตัวนำ ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะพบว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจ เนื่องจากมีสมบัติพิเศษอื่น ๆ แตกต่างจากตัวนำและฉนวน ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้สร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ ได้เป็นอย่างดี

สารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน โดยพบว่าโลหะมีสมบัติเป็นตัวนำที่ดี ส่วนฉนวนมีการนำไฟฟ้าได้น้อย และในสภาพปกติหรือที่อุณหภูมิห้องสารดังกล่าวจะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-18} ถึง 10^8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร โดยวัสดุที่เป็นฉนวนจะมีสภาพนำไฟฟ้าอยู่ในช่วง 10^{-18} ถึง 10^{-8} ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร สำหรับตัวนำมีสภาพนำไฟฟ้าที่สูงโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 10^3 ถึง 10^8 ซีเมนส์ต่อเซนติเมตร และสารกึ่งตัวนำเป็นสารที่มีสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน ดังแสดงในภาพที่ 2.1



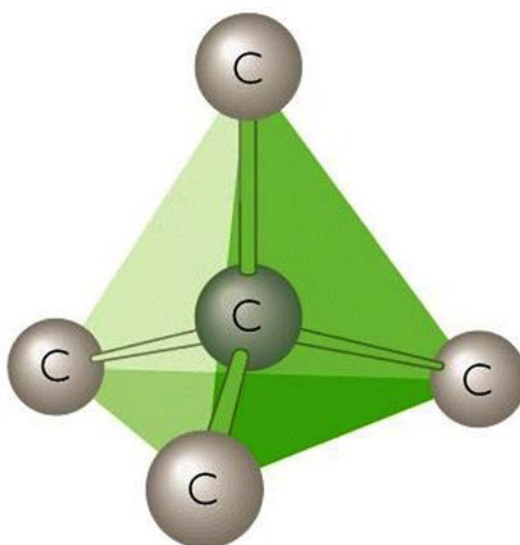
ภาพที่ 2.1 แสดงค่าสภาพต้านทานและสภาพนำไฟฟ้าของตัวนำ สารกึ่งตัวนำและฉนวน

และนอกจากนี้สารกึ่งตัวนำยังมีสมบัติที่แตกต่างจากสารอื่น ๆ อีกดังนี้

1. สภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มแบบเอกซ์โพเนนเชียลกับอุณหภูมิ (thermister action) หรือกล่าวได้อีกนัยหนึ่งคือ มีสัมประสิทธิ์การเปลี่ยนความต้านทานตามอุณหภูมิเป็นลบ กล่าวคือ เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความต้านทานจะลดต่ำลง
2. มีสมบัติยอมให้กระแสไฟฟ้าผ่านทางเดียวหรือเปลี่ยนกระแสไฟสลับให้เป็นกระแสไฟตรง (rectifying effect) เมื่อประจุเป็นรอยต่อขอตักหรือรอยต่อพี-เอ็น
3. สภาพนำไฟฟ้าของสารจะขึ้นกับปริมาณของสารเจือหรืออาจกล่าวได้ว่าสารเจือทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนไป
4. เมื่อมีแสงมาตกกระทบ จะทำให้สภาพนำไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง (อาจจะเท่าเดิมหรือเพิ่มขึ้น) กล่าวได้อีกนัยหนึ่ง เมื่อมีแสงตกกระทบจะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าเกิดขึ้นทำให้ความต้านทานไฟฟ้าเปลี่ยนแปลง
5. เมื่อมีความแตกต่างของอุณหภูมิจะเกิดแรงเคลื่อนไฟฟ้าเรียกว่ามีปรากฏการณ์เทอร์โมอิเล็กตริก (thermoelectric effect)
6. จะคงรักษาโครงสร้างผลึกแบบพันธะสี่หน้า (tetrahedral bond) แม้ลักษณะของหนึ่งหน่วยเซลล์ของผลึกจะแตกต่างกันไปก็ตาม

2.2 โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ

ตามธรรมชาติผลึกสารกึ่งตัวนำโดยส่วนมากจะมีลักษณะทางโครงสร้างผลึกเป็นแบบพันธะสี่หน้า กล่าวคือ ทุก ๆ อะตอมในผลึก มีอะตอมอื่น ๆ ที่อยู่ใกล้เคียงที่สุดล้อมรอบอยู่สี่อะตอม ดังภาพที่ 2.2

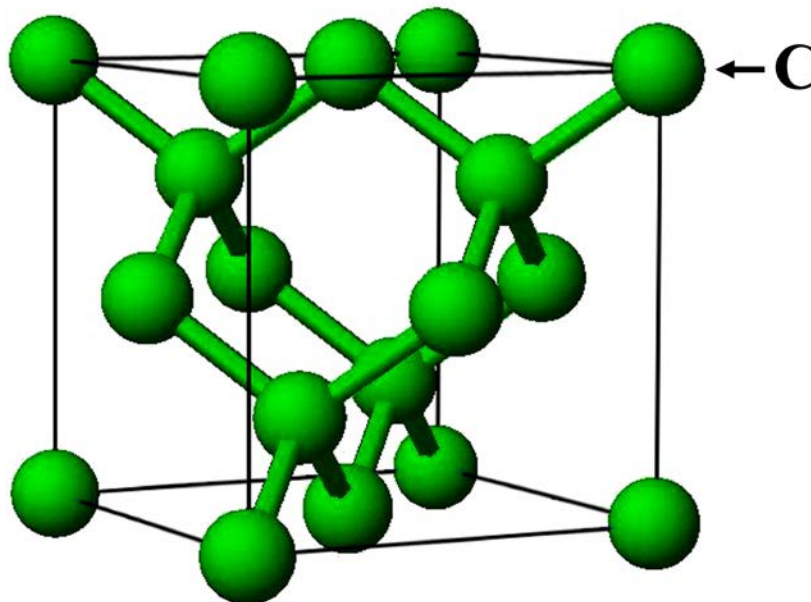


ภาพที่ 2.2 แสดงพันธะสี่หน้า

แม้ว่าสารประกอบและโพลีเมอร์ที่มีลักษณะของพันธะเป็นแบบพันธะสี่หน้า แต่เนื่องจากอะตอมของธาตุชนิดต่าง ๆ กันนั้น มีขนาดและอำนาจดึงดูดซึ่งกันและกันไม่เท่ากัน เป็นผลให้โครงสร้างผลึกมีลักษณะแตกต่างกันไป ซึ่งอาจแบ่งโครงสร้างของพันธะสี่หน้าออกเป็น โครงสร้างผลึกหลายแบบดังนี้

2.2.1 โครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond structure) [25-32]

โครงสร้างผลึกแบบนี้เป็นโครงสร้างผลึกของธาตุกลุ่ม IV คือ C, Si, Ge และ α -Sn เราอาจพิจารณาได้ว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชรนี้เกิดจากการนำเอาโครงผลึกแบบเพรสเชนเตอร์คิวบิก (face-center cubic lattices, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) สองโครงมาวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะทาง $\frac{1}{4}$ ของเส้นทแยงมุม หนึ่งหน่วยเซลล์มี 8 อะตอมและอะตอมของโครงผลึกทั้งสองเป็นชนิดเดียวกันมีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีเท่ากัน และอยู่ที่ตำแหน่ง $000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0, \frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$ ดังภาพที่ 2.3 ดังนั้นแต่ละแขนของพันธะสี่หน้าจึงมีแรงดึงดูดซึ่งกันและกันเท่ากันทุกทิศทุกทาง นอกจากนี้แต่ละอะตอมยังมีพันธะโควาเลนต์ที่แข็งแรงกับอะตอมข้างเคียง 4 อะตอม ทำให้โครงผลึกแบบนี้เป็นรูปคิวบิกซึ่งบิดเบี้ยวได้ยาก โครงผลึกจึงสมมาตรมากที่สุด ในจำนวนโครงสร้างผลึกทั้งหมดของกลุ่มนี้

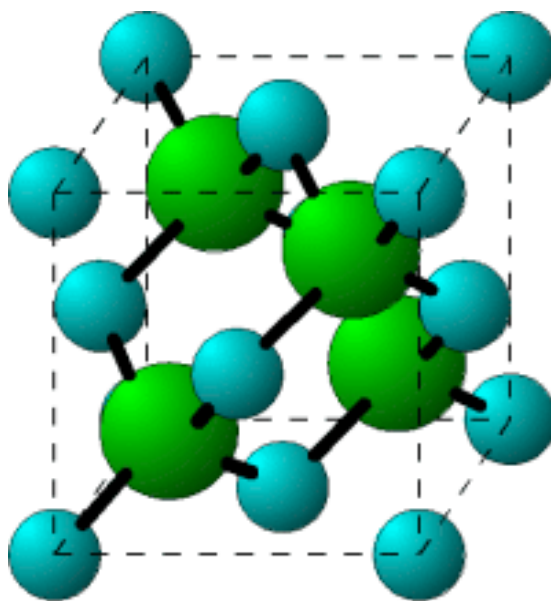


ภาพที่ 2.3 แสดงการจัดเรียงตัวของอะตอมในโครงสร้างผลึกแบบเพชรของสารกึ่งตัวนำ

2.2.2 โครงสร้างผลึกแบบสฟาเลอร์ไรท์หรือซิงค์เบลนด์ (sphalerite or zincblende structure)

[25-30]

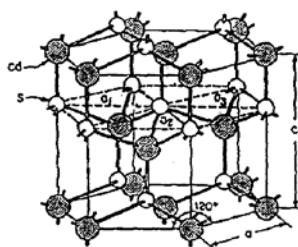
โครงสร้างผลึกแบบนี้มักพบในสารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยอะตอมของธาตุ 2 ชนิด หรือเรียกว่าเป็นสารประกอบกึ่งตัวนำเชิงคู่ (binary compound semiconductor) ได้แก่ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม III-V เช่น GaAs และ InSb และ สารประกอบสารกึ่งตัวนำในกลุ่ม II-VI เช่น CdS, CdTe และ ZnS เป็นต้น โครงสร้างผลึกแบบนี้มีลักษณะคล้ายโครงสร้างผลึกแบบเพชร คือ อาจพิจารณาว่าเป็นโครงสร้างผลึกแบบเฟซเซนเตอร์ คิวบิก 2 โครงสร้างซ้อนกันอยู่แต่โครงสร้างหนึ่งเป็นธาตุหมู่ II (หรือ III) ส่วนอีกโครงสร้างเป็นธาตุหมู่ VI (หรือ V) สำหรับสารกึ่งตัวนำเชิงคู่ II-VI (หรือ III-V) ในหนึ่งหน่วยเซลล์ประกอบด้วยอะตอม 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม เช่นใน CdS อะตอมของ Cd จะอยู่ที่ตำแหน่ง $000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}$ และ $\frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ ส่วนตำแหน่งของอะตอม S จะอยู่ที่ $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}$ และ $\frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$ จึงมีความแข็งแรงน้อยกว่าและมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าโครงสร้างผลึกแบบเพชรดังแสดงใน ภาพที่ 2.4 สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ ZnS, CdTe, และ CdS เป็นต้น ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่มีความสำคัญสำหรับนำมาประยุกต์เพื่อประดิษฐ์เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เชิงแสง



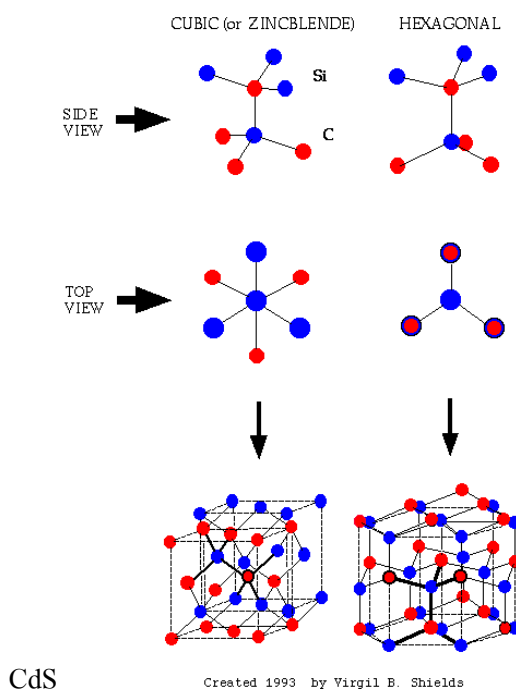
ภาพที่ 2.4 แสดงโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS

2.2.3 โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ (wurtzite structure)

โครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์แสดงใน ภาพที่ 2.5 ซึ่งจัดอยู่ในระบบโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัล เกิดจากการนำโครงสร้างผลึกแบบเฮกซะโกนัลที่มีอะตอมของธาตุต่าง ๆ อยู่ 2 ชนิด วางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ $5/8$ ตามแนวแกน c หนึ่งหน่วยเซลล์จะมี 8 อะตอม มีอะตอมเพื่อนบ้านอยู่ 4 อะตอม มีพันธะเคมีของโมเลกุลเป็นพันธะเตตระฮีดรัน และมีพันธะเคมีระหว่างอะตอมเป็นแบบโควาเลนต์ ดังนั้นจึงมีการจัดเรียงระนาบของอะตอมคล้ายกับโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์แต่จะมีความแตกต่างกันคือในโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรันเป็นแบบ ABAB ... หรือ 0101 ... ส่วนในโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์จะมีการจัดเรียงระนาบของพันธะเตตระฮีดรันแบบ ABCABC ... หรือ 012012 ... สารที่มีโครงสร้างผลึกแบบนี้ ได้แก่ CdS และ ZnS เป็นต้น



ภาพที่ 2.5 แสดงโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ของสารกึ่งตัวนำ



ภาพที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์กับแบบซิงค์เบลนด์

2.3 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ [25-28]

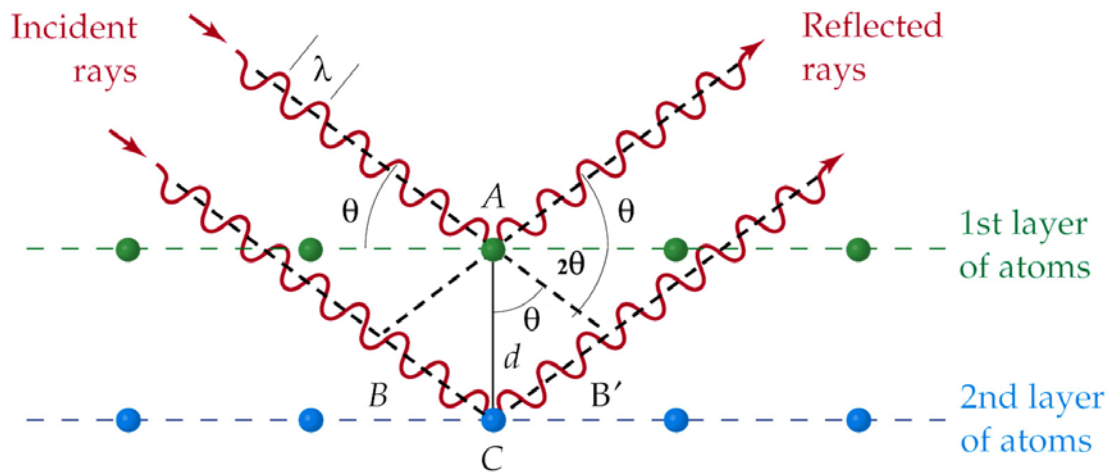
การศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำด้วยวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction) เป็นการศึกษาเพื่อยืนยันว่าฟิล์มบาง ของสารกึ่งตัวนำที่เตรียมได้มีโครงสร้าง ผลึก สมบูรณ์เป็นไปตามที่ต้องการและเมื่อทราบผลแล้วจึงจะนำฟิล์มบางที่ได้ไปตรวจสอบสมบัติทาง ฟิสิกส์อื่น ๆ ต่อไป

ในปี 1912 นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ มากซ์ ฟอน เลาเอ (Max Von Laue) ได้ค้นพบการจัดเรียงตัวของอะตอมในผลึก (มีระยะห่างระหว่างอะตอมประมาณ 10^{-10} เมตร) โดยการผ่าน รังสีเอกซ์เข้าไปในผลึกแล้วศึกษาถึงรูปร่างการแทรกสอดของแสงบนแผ่นฟิล์ม โดยสังเกตว่า รูปแบบการเลี้ยวเบนที่เกิดขึ้นเกิดจากการที่รังสีเอกซ์ถูกกระเจิงด้วยอะตอมหรือโมเลกุลภายในผลึก

ต่อมาในปีเดียวกันนักวิทยาศาสตร์พ่อลูกตระกูลแบรกก์คือ วิลเลียม เฮนรี แบรกก์ และ วิลเลียม ลอร์เรนซ์ แบรกก์ (William Henry Bragg และ William Lawrence Bragg) ได้เสนอแนวคิด ว่าเราสามารถมองได้ว่าผลึกจัดเรียงตัวเป็นชั้น (layer) หรือ ระนาบ (plane) ของอะตอมซึ่งสามารถ สะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน และได้ตั้งกฎการ เลี้ยวเบนของ รังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดเสริมกันมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วย ระยะที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ และกฎนี้เรียกว่ากฎ ของแบรกก์ (Bragg's Law) ดังสมการที่ (2.1)

$$2d_{hkl} \sin \theta = n\lambda \quad (2.1)$$

เมื่อ	d_{hkl}	คือ ระยะห่างระหว่างระนาบของอะตอมในผลึกที่ขนานกัน
	θ	คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	2θ	คือ มุม แบรกก์หรือมุมเลี้ยวเบนซึ่งเป็นมุมที่รังสีตกกระทบทำมุมกับ รังสีสะท้อน
	n	คือ อันดับการเลี้ยวเบนมีค่าตั้งแต่ 1, 2, 3, ...
	λ	คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์



ภาพที่ 2.7 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จากระนาบผลึก

จากข้อมูลการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เราสามารถนำมาหาค่าคงที่ของโครงผลึกได้ ในกรณีของผลึกที่มีโครงสร้าง ผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ซึ่งจัดอยู่ในระบบคิวบิก (cubic system, $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.2)$$

จากสมการที่ (2.1) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.2) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a) เมื่อทราบมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ ($h \ k \ l$) ดังสมการ

$$\frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (2.3)$$

ส่วนผลึกคอปเปอร์อินเดียมไดซัลไฟด์ มีโครงสร้างแบบซาลโคไฟไรท์ จัดอยู่ในระบบเตตระโกนัล (tetragonal system, $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90$ องศา) มีความสัมพันธ์ดังนี้คือ

$$\frac{1}{d_{hkl}^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.4)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการที่ (2.1) เมื่อ $n = 1$ แทนใส่ในสมการที่ (2.4) จะได้ความสัมพันธ์ที่ใช้หาค่าคงที่ของโครงผลึก (a, c) เมื่อเราทราบขนาดมุมแบรกก์ (θ) ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ (λ) และดัชนีมิลเลอร์ ($h \ k \ l$) ดังสมการ

$$\frac{4\sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (2.5)$$

นอกจากนั้นเรายังสามารถนำข้อมูลที่ได้นำไปหาสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (texture coefficient) ของระนาบ (h k l) ขนาดของเกรน ความหนาแน่นของ ดิสโลเคชัน (dislocation density) ความเครียด (strain) และ ความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผิดพลาด (stacking fault probability) ได้ดังนี้

สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึกหาได้จากสมการ

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)/I_0(hkl)}{(1/N)\sum_N I(hkl)/I_0(hkl)} \quad (2.6)$$

เมื่อ	TC(h k l)	คือ	สัมประสิทธิ์การจัดเรียงระนาบผลึก (h k l)
	I(h k l)	คือ	ความเข้มของฟลัก การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ของฟิล์มบางที่ปรากฏ
	I ₀ (h k l)	คือ	ความเข้มมาตรฐาน ASTM ของฟลักการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์
	N	คือ	จำนวนฟลัก การเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่ปรากฏ

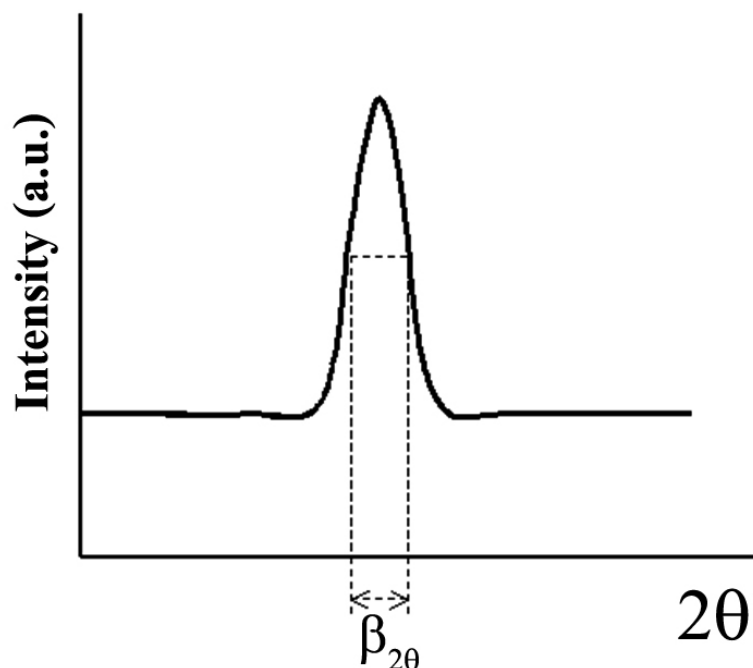
ขนาดของเกรน (D) และความเครียด (ϵ_s) เราสามารถหาได้จากสมการ

$$\beta = \frac{\lambda}{D \cos \theta} - \epsilon_s \tan \theta \quad (2.7)$$

ดังนั้น

$$\beta \cos \theta = \frac{\lambda}{D} - \epsilon_s \sin \theta \quad (2.8)$$

เมื่อ	D	คือ	ขนาดของเกรน
	β	คือ	ความกว้างของฟลักการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)
	θ	คือ	มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอกซ์ที่ทำกับระนาบของผลึก
	ϵ_s	คือ	ความเครียด



ภาพที่ 2.8 แสดงวิธีการหา $\beta_{2\theta}$ เพื่อนำไปหาขนาดของเกรนจากสเปกตรัมของการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์

จากสมการที่ (2.8) ถ้าเราให้ $\sin\theta = 0$ แล้วเราจะสามารถหาขนาดของเกรนได้ ส่วนขนาดของความเครียดสามารถหาได้จากความชันของกราฟที่วัดระหว่าง $\beta\cos\theta$ และ $\sin\theta$

จำนวนของดิสโลเคชันในหนึ่งหน่วยพื้นที่ หรือที่เราเรียกว่า “ความหนาแน่นของดิสโลเคชัน (γ)” จะหาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการ (2.9)

$$\gamma = \frac{c}{D^2} \quad (2.9)$$

โดยที่ γ มีหน่วยเป็น ไลน์ต่อตารางเมตร (line/m²), D มีหน่วยเป็นเมตรและ c เป็นค่าค่าคงที่ที่ทำความหนาแน่นของดิสโลเคชันมีค่าน้อยที่สุด ในงานวิจัยนี้เราให้มีค่าเท่ากับ 1

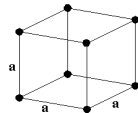
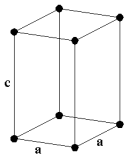
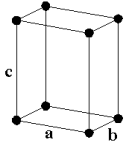
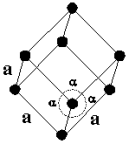
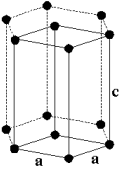
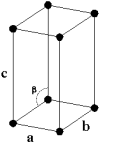
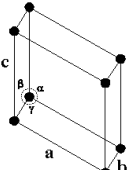
ความน่าจะเป็นของสัมประสิทธิ์การจัดเรียงระยะนาบผิดพลาด (S_f) หาได้จากความสัมพันธ์ดังสมการที่ (2.10)

$$S_f = \frac{2\pi^2 \beta}{45(3 \tan \theta_{hkl})^{1/2}} \quad (2.10)$$

เมื่อ β คือ ความกว้างของพีการเลี้ยวเบน รังสีเอกซ์ที่มีความเข้มเป็นครึ่งหนึ่งของความเข้มสูงสุด (full width at half maximum, FWHM)

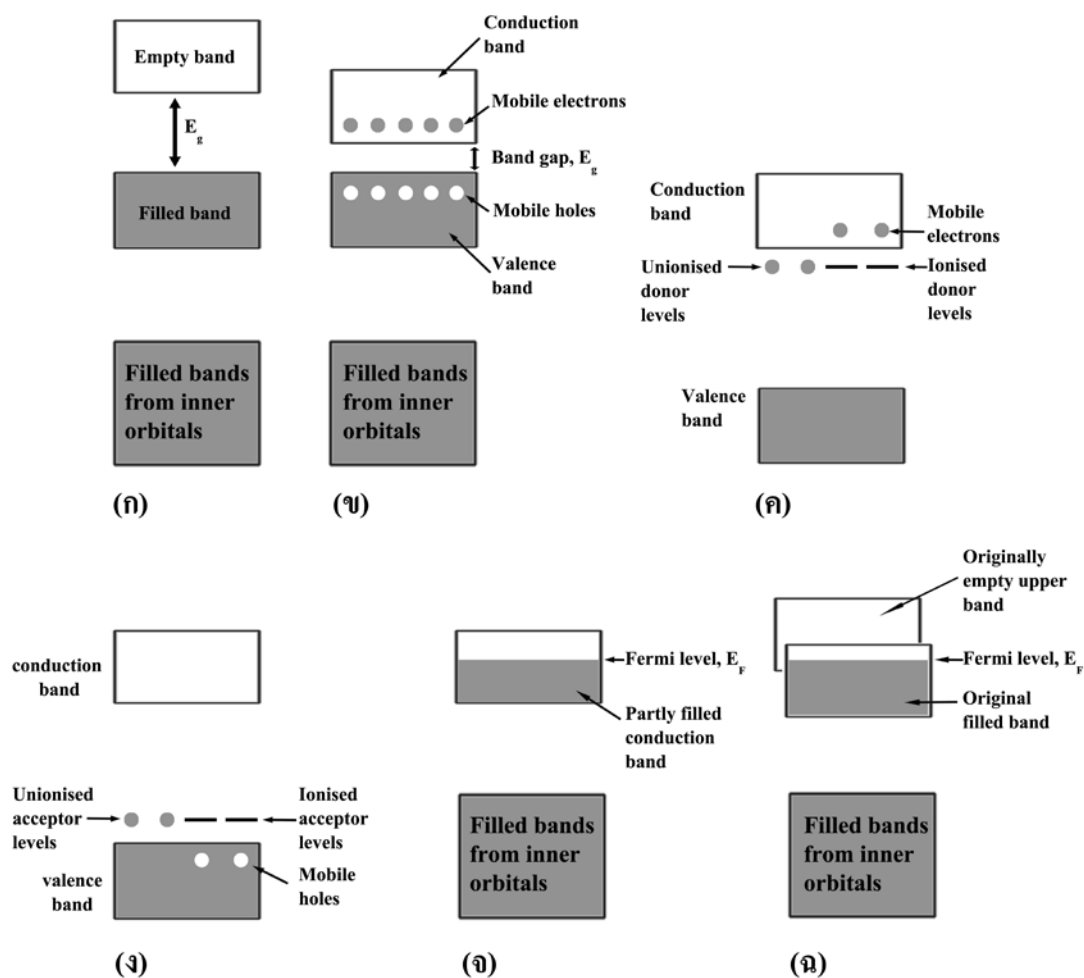
θ_{hkl} คือ มุม เลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มสูงสุด ในงานวิจัยนี้คือ θ_{112}

ตารางที่ 2.1 แสดงระบบผลึก ค่าคงที่ของโครงผลึก มุมที่อยู่ระหว่างค่าคงที่ของผลึกและรูปทรงเรขาคณิตของหนึ่งหน่วยเซลล์

ระบบผลึก(system)	ค่าคงที่ของโครงผลึกและมุมที่อยู่ระหว่างค่าคงที่ของผลึก	รูปทรงเรขาคณิตของหน่วยเซลล์
คิวบิก (cubic)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
เตตระโกนัล (tetragonal)	$a = b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
ออร์โธโรมบิก (orthorhombic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	
รอมโบฮีดรัล (rhombohedral)	$a = b = c,$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$ $a = b \neq c,$	
เฮกซะโกนัล (hexagonal)	$\alpha = \beta = 90^\circ, \gamma = 120^\circ$	
โมนอคลินิก (monoclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha = \gamma = 90^\circ \neq \beta$	
ไทรคลินิก (triclinic)	$a \neq b \neq c,$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$	

2.4 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ [21-24, 30-36]

เมื่อแสงตกกระทบกับสารกึ่งตัวนำ พฤติกรรมทางแสงที่สังเกตได้ก็คือ การดูดกลืน การสะท้อน และการส่งผ่านของแสง จากผลของสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถหาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน และขนาดช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของสารกึ่งตัวนำได้ โดยจะกล่าวถึงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ การส่งผ่านแสงและการคำนวณค่าช่องว่างแถบพลังงาน



ภาพ ที่ 2.9 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานอย่างง่ายของ

- ก. ฉนวน
- ข. สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์
- ค. สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
- ง. สารกึ่งตัวนำชนิดพี
- จ. โลหะ
- ฉ. สารกึ่งโลหะ

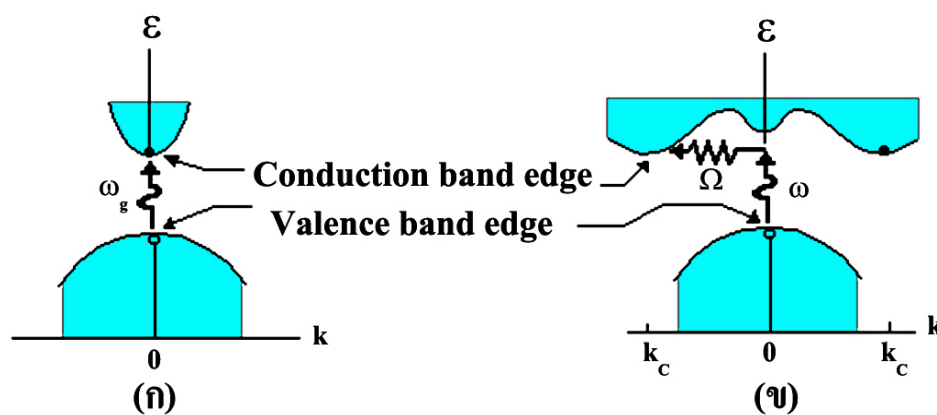
2.4.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน [21-24, 33-36]

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานจะประกอบไปด้วยส่วนใหญ่ ๆ 3 ส่วน คือ แถบนำไฟฟ้า (conduction band) แถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบพลังงานต้องห้าม (forbidden band หรือ forbidden region หรือ forbidden gap) และเรียกความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบนำกับ แถบวาเลนซ์นั้นว่า ช่องว่างแถบพลังงาน (energy gap) โดยเราสามารถที่จะแบ่งประเภทของวัสดุว่า เป็นฉนวน (insulator) โลหะหรือตัวนำ (metal หรือ conductor) และสารกึ่งตัวนำ (semiconductor) ได้โดยดูจากขนาดของช่องว่างแถบพลังงานที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 2.9

ในวัสดุที่เป็นฉนวนเมื่อดูจากแถบพลังงานจะเห็นได้ว่าขนาดช่องว่างแถบพลังงานจาก ขอบล่างสุดของแถบวนำ (แถบนำ) ถึงขอบบนสุดของแถบเต็ม (แถบวาเลนซ์) มีขนาดกว้างมาก ประมาณได้ว่า $E_g \gg kT$ หรือมากกว่า 3 อิเล็กตรอนโวลต์ ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ก) การที่จะทำให้ วัสดุนำไฟฟ้าได้ต้องใส่พลังงานที่สูงมาก เพื่อที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ถ้าช่องว่างแถบพลังงานระหว่างแถบนำกับแถบวาเลนซ์มีขนาดเล็กพอที่อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เมื่อได้รับพลังงานความร้อนสามารถเคลื่อนย้ายขึ้นไปยังแถบนำ และทำให้วัสดุนำไฟฟ้าได้ จะเรียกสารชนิดนี้ว่า สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์ (intrinsic semiconductors) (ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ข)) จากรูปจะเห็นได้ว่าเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายขึ้นไปอยู่ในแถบนำแล้วจะเหลือที่ว่างไว้ใน แถบวาเลนซ์ โดยจะมีสภาพทางไฟฟ้าเป็นบวก และจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน เมื่ออยู่ภายใต้สนามไฟฟ้า จะเรียก ที่ว่างนี้ว่าโฮล และถ้าทำการเจือ อะตอมของธาตุบางอย่าง ลงไปในสารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์แล้ว อะตอมของสารเจือประพติดัวเป็น อะตอมผู้ให้ ก็จะทำให้เกิด ระดับพลังงานผู้ให้ โดยให้อิเล็กตรอนกับแถบนำ จะเรียกสารนี้ว่าสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductors) ดังแสดงใน ภาพที่ 2.9 (ค) และถ้าอะตอมประพติดัวเป็นอะตอมผู้รับก็จะทำให้เกิดระดับพลังงานผู้รับโดยทำการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ จะเรียกสารนี้ว่า สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductors) ดังแสดงในภาพที่ 2.9 (ง) สำหรับแถบพลังงานของวัสดุที่เป็นโลหะ หรือตัวนำจะพบว่าอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในแถบนำแล้วบางส่วน (ภาพที่ 2.9 (จ)) และบอกได้ว่า แถบวาเลนซ์กับแถบนำมีการซ้อนเหลื่อมกันอยู่ ทำให้สารสามารถนำไฟฟ้าได้ และในภาพที่ 2.9 (ฉ) ถ้าขอบล่างของแถบวนำที่ (n+1) ซ้อนเหลื่อมกับขอบสูงสุดของแถบที่มีอิเล็กตรอนบรรจุอยู่ที่ n และระดับเฟอร์มีอยู่ระหว่างแถบทั้งสอง อิเล็กตรอนก็จะสามารถไหลจากแถบเต็มไปยังด้านล่างของแถบวนำได้ จะเรียกสารที่มีโครงสร้างแถบพลังงานแบบนี้ว่าเป็นสารกึ่งโลหะ

ลักษณะของ โครงสร้าง แถบพลังงานแบบตรง คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่า เท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($\hbar\omega = E_g$) อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและ อยู่ในสภาวะ ถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน (transition) จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยัง จุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่ โครงสร้างผลึก คือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงใน ภาพที่ 2.10 (ก) และเมื่อเขียน

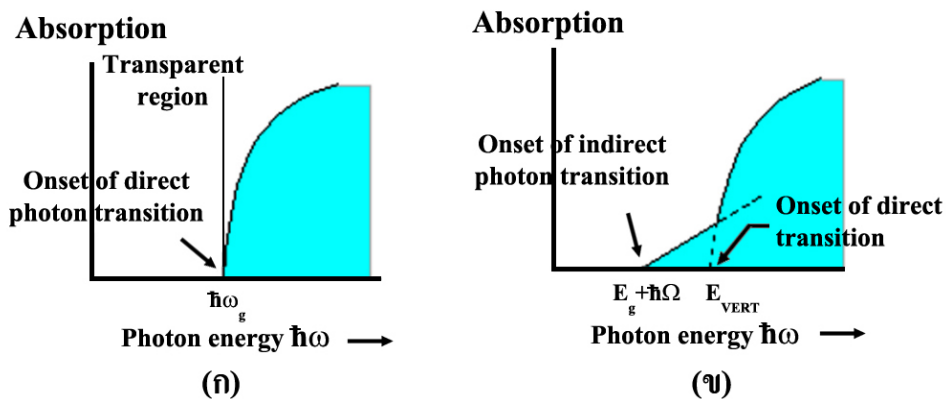
กราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้กราฟดังแสดงใน ภาพที่ 2.11 (ก) และลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ในกรณีนี้มีกระบวนการสร้างโฟนอนเกิดขึ้น ($\hbar\omega = E_g + \hbar\Omega$) เมื่อ Ω คือค่าความถี่เชิงมุมของพลังงานโฟนอน ซึ่งมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน หรือในกรณีที่มีการทำลายล้างโฟนอน ($\hbar\omega = E_g - \hbar\Omega$) นั่นคือเมื่ออิเล็กตรอนที่อยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น ย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำจะมีการปล่อยโฟนอน (emitted phonon) ที่มีความถี่เชิงมุม Ω มีเวกเตอร์คลื่น $K \cong k_c$ ออกมา จึงเกิดการสร้างโฟนอน ($E_g = \hbar\Omega$) และการสร้างอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ (E_{VERT}) ขึ้นมาในกระบวนการนี้ ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (ข) และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนจะได้ดังแสดงในภาพที่ 2.11 (ข)



ภาพที่ 2.10 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเฉียง



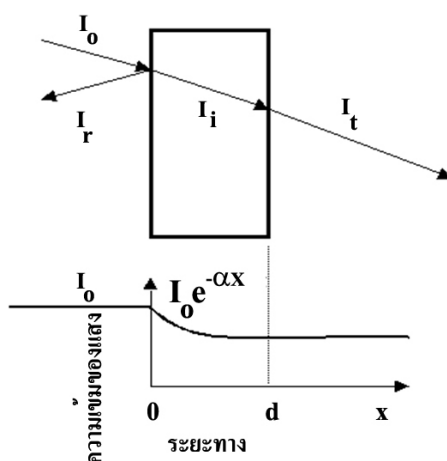
ภาพที่ 2.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนโฟตอนกับพลังงานโฟตอนของสารกึ่งตัวนำที่อุณหภูมิศูนย์สัมบูรณ์ ($T = 0$ เคลวิน)

ก. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบตรง

ข. ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบเอียงในกรณีที่เกิดกระบวนการสร้างโฟนอน

2.4.2 การส่งผ่านแสง [21-24, 33-36]

การศึกษาวิธีวัดสเปกตรัมการสะท้อนและการส่งผ่านแสงนี้ จะกล่าวถึงสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงและองค์ประกอบของการวัดสเปกตรัมการส่งผ่านแสง เมื่อแสงเดินทางไปกระทบฟิล์มบาง แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของฟิล์มบาง บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในแผ่นฟิล์มบางและถูกดูดกลืน ดังแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบลงบนแผ่นฟิล์มบาง

สัมประสิทธิ์การสะท้อนของแสงมีค่าเป็น

$$R = \frac{I_r}{I_0} \quad (2.11)$$

หรือ
$$I_r = RI_0 \quad (2.12)$$

เมื่อ I_0 คือ ความเข้มแสงตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบาง
 I_r คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากฟิล์มบาง
 I_t คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากฟิล์มบาง
 I_i คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบาง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflectivity)
 T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (transmittance)
 α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (absorption coefficient)
 d คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในแผ่นฟิล์มบาง

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.13)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่แผ่นฟิล์มบางจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในแผ่นฟิล์มบางลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านฟิล์มบางมีค่าเป็น

$$I_t = I_i \cdot e^{-\alpha d} = (1 - R)I_0 \cdot e^{-\alpha d} \quad (2.14)$$

ถ้าไม่มีการสะท้อนแสงที่ผิวด้านหลัง สัมประสิทธิ์การส่งผ่านของแสงจะมีค่าเท่ากับ

$$T = \frac{I_t}{I_0} = (1 - R)e^{-\alpha d} \quad (2.15)$$

2.4.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ [21-24, 33-36]

เมื่อแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ ด้วยความเข้ม I_0 แสงบางส่วนจะส่งผ่านออกไป บางส่วนถูกดูดกลืน และส่วนที่เหลือจะสะท้อนกลับมา ดังแสดงในภาพที่ 2.12 โดย

$$T + A + R = 1 \quad (2.16)$$

เมื่อ T คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง
 A คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง

โดยที่
$$R = \frac{(n-1)^2 + K^2}{(n+1)^2 + K^2} \quad (2.17)$$

และค่าดัชนีหักเหของผลึก
$$n_c = n - iK \quad (2.18)$$

เมื่อ n คือ จำนวนจริง
 K คือ จำนวนเชิงซ้อน เรียกว่า สัมประสิทธิ์การสูญเสีย (extinction coefficient)
 โดยทั้ง n และ K เป็นฟังก์ชันของ λ

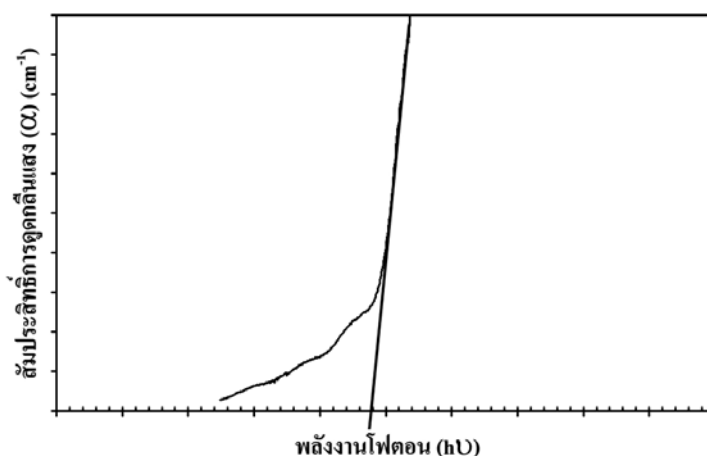
2.5 การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากสเปกตรัมการส่งผ่านแสง [21-24, 33-36]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเกิดจากการที่อิเล็กตรอนได้รับพลังงานจากแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าช่องว่างแถบพลังงานจากนั้นจึงย้ายสถานะพลังงานจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบนำ สเปกตรัมการดูดกลืนแสงบริเวณที่พลังงานโฟตอนมีค่าน้อยจะมีลักษณะเป็นขอบแสดงถึงการลดลงของการดูดกลืนแสงอย่างฉับพลัน ขอบลักษณะนี้เรียกว่าขอบการดูดกลืนแสง (absorption edge) หรือขอบการดูดกลืนพื้นฐาน (fundamental edge) พลังงานโฟตอนที่ขอบการดูดกลืนแสงมีค่าเท่ากับผลต่างของค่าพลังงานที่วัดจากจุดต่ำสุดของแถบนำกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จุดที่เส้นตรงตัดกับแกนในแนวนอน จะให้ค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) วิธีการนี้เป็น การกำหนดค่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่นิยมมากที่สุด

การหาค่าของช่องว่างแถบพลังงาน สามารถพิจารณาได้จากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ของสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง (T) จากภาพที่ 2.12 แสดงภาพจำลองเมื่อแสงตกกระทบจากด้านซ้ายของฟิล์มบาง (I_0) ความเข้มแสงภายในฟิล์มบางจะลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีค่าสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสงโดยทั่วไปการสะท้อน (R) มีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ ดังนั้น

$$T = e^{-\alpha d} \quad (2.19)$$

จะได้ว่า
$$\alpha = \frac{1}{d} \ln\left(\frac{1}{T}\right) \quad (2.20)$$



ภาพที่ 2.13 แสดงการหาค่าช่องว่างแถบพลังงานจากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับพลังงานโฟตอน

ที่กล่าวมาเป็นการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงจากสัมประสิทธิ์การส่งผ่านแสง โดยไม่คิดถึงการสะท้อนของแสง สำหรับกรณีการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเนื่องจากการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน ในกรณีที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำที่เวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกัน เรียกการย้ายสถานะพลังงานแบบนี้ว่า การย้ายสถานะพลังงานแบบตรง และการย้ายสถานะพลังงานแบบตรงนี้ยังแบ่งได้อีกสองชนิด คือ การย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม และชนิดต้องห้าม โดยทั้งสองชนิดนี้ขึ้นกับค่าสมาชิกเมทริกซ์เชิงแสง (optical matrix element) ในการประมาณครั้งที่หนึ่งว่าเป็นศูนย์หรือไม่ คือ ถ้าเป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม และถ้าไม่เป็นศูนย์จะเป็นการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอม เมื่อพิจารณาการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนในบริเวณตำแหน่งจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำ แสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับค่าช่องว่างแถบพลังงานซึ่งมีลักษณะเป็นพาราโบลา ช่องว่างแถบพลังงานของแผ่นฟิล์มบางประมาณได้โดยการคำนวณหาสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง ซึ่งจะถูกลดลงเมื่อแสงที่ตกกระทบบนแผ่นฟิล์มบางมีค่าพลังงานโฟตอนสูงกว่าค่าของแถบพลังงานต้องห้าม ที่ขอบการดูดกลืนค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าเป็น

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดยินยอมแบบตรง

$$(\alpha h\nu) = A(h\nu - E_g)^{\frac{1}{2}} \quad (2.21)$$

สำหรับสารกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดอินยอมแบบเฉียง

$$(\alpha h\nu) = B(h\nu - E_g)^2 \quad (2.22)$$

และสำหรับกึ่งตัวนำที่มีการย้ายสถานะพลังงานชนิดต้องห้าม

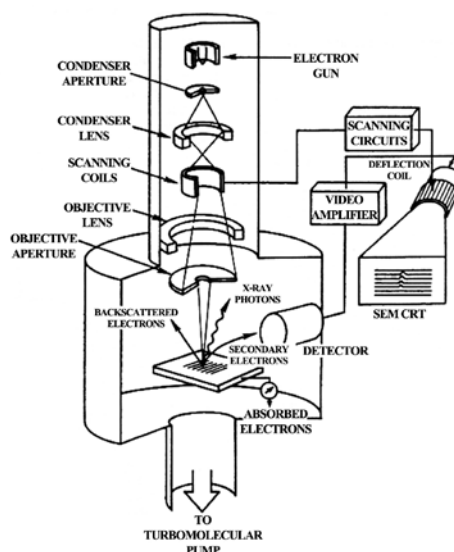
$$(\alpha h\nu) = C(h\nu - E_g)^{\frac{3}{2}} \quad (2.23)$$

เมื่อ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
 $h\nu$ คือ พลังงานโฟตอน
 A, B และ C คือ ค่าคงที่

2.6 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [18-24, 34-37]

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ถูกใช้ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงมหภาคมีหลักการทำงาน คือ ใช้ลำแสงอิเล็กตรอนฉายหรือส่องกราดไปบนผิวหน้าของสารตัวอย่างที่ต้องการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวทางกายภาพปรากฏเป็นภาพขยายที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ภาพที่เกิดจาก SEM มีลักษณะเป็นภาพสามมิติ SEM ถูกประดิษฐ์ขึ้นในช่วงปี พ.ศ. 2472-2474 แต่ไม่ได้รับความนิยมเนื่องจากอุปกรณ์ที่รวบรวมสัญญาณที่เกิดจากลำแสงอิเล็กตรอนกระทบผิวของตัวอย่างยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ มีการแจกแจงรายละเอียดต่ำ (low resolution) ภาพที่ปรากฏที่จอภาพจึงมีลักษณะพร่ามัวขาดรายละเอียด ในปี พ.ศ. 2508 SEM ได้รับการปรับปรุงระบบเลนส์สนามแม่เหล็กและระบบภาพให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้นทำให้นักวิทยาศาสตร์เริ่มสนใจและได้รับความนิยมตั้งแต่นั้นเป็นต้นมา

หลักการทำงานของ SEM เริ่มจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (primary electron) จากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน ซึ่งกลุ่มอิเล็กตรอนถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าช่วง 1-40 กิโลโวลต์ ใช้เลนส์รวมแสง (condenser lens) เป็นตัวกำหนดทิศทางของกลุ่มอิเล็กตรอนและทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเป็นลำ ใช้เลนส์วัตถุ (objective lens) เป็นตัวโฟกัสภาพลำอิเล็กตรอนจะกราดไปยังพื้นผิวของสารตัวอย่าง โดยขดลวดสนามแม่เหล็ก (scanning coils) บนระนาบ x-y เพื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron : SE) อิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกตรวจจับโดยเซนเซอร์ (sensor) และแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าแล้วนำไปขยายสัญญาณเพื่อส่งต่อไปยังระบบสร้างภาพบนจอคาโทด (cathode ray tube : CRT)

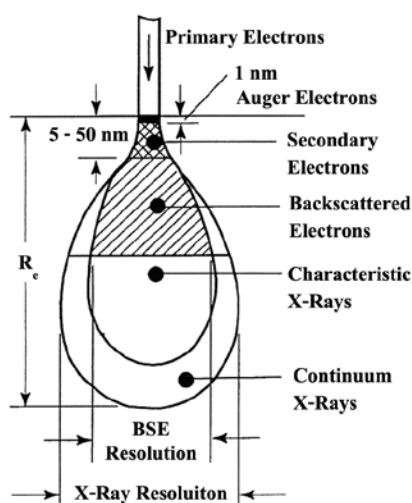


ภาพที่ 2.14 แสดงส่วนประกอบของเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ปัจจัยสำคัญสำหรับการใช้งาน SEM มีดังนี้

1. ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางปลายลำอิเล็กตรอน (electron probe diameter : d_p)
2. กระแสของลำอิเล็กตรอน (electron probe current : i_p)
3. มุมการกระเจิงของลำอิเล็กตรอน (electron probe convergence : α_p)

ปัจจัยทั้ง 3 มีความสำคัญต่อการศึกษาคross section ของฟิล์มบางด้วย SEM ซึ่งปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์กันโดย d_p แปรผันตรงกับ i_p แต่แปรผันแบบผกผันกับ α_p ตัวอย่างเช่น เมื่อ d_p มีขนาดลดลง i_p จะมีค่าน้อยลงแต่ α_p จะมีค่ามากขึ้น



ภาพที่ 2.15 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับผิวของสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารตัวอย่าง

อันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนที่ตกกระทบบนพื้นผิวของสารตัวอย่างจะกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังภาพที่ 2.14 ซึ่งสามารถแบ่งอันตรกิริยาของการชนเป็นสองลักษณะคือการชนแบบยืดหยุ่นและการชนแบบไม่ยืดหยุ่นซึ่งการชนทั้งสองลักษณะนี้จะให้ผลหรือสัญญาณที่แตกต่างกัน

การชนแบบยืดหยุ่น (elastic scattering)

ในกรณีการชนแบบยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสูญเสียพลังงานบางส่วน (น้อยมาก) ให้กับอะตอมของตัวอย่างที่ตกกระทบและมีการเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ มีการกระเจิงกลับจากผิวของสารตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงกลับส่วนนี้เรียกอิเล็กตรอนแบบกระเจิงกลับ (backscatter electron: BE) ภายในห้องใส่ตัวอย่างจะมีหัววัดสัญญาณ (detector) ติดตั้งไว้เพื่อนำสัญญาณ BE นี้ไปสร้างเป็นสัญญาณภาพแสดงผลบนจอ CRT

การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (inelastic scattering)

ในกรณีการชนแบบไม่ยืดหยุ่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถ่ายโอนพลังงานจนให้กับอิเล็กตรอนของสารตัวอย่างและทำให้อะตอมของสารตัวอย่างที่อยู่ในระดับลึกจากผิวตัวอย่างได้รับอันตรกิริยาที่แตกต่างกันซึ่งหลังจากการชนชนิดนี้จะกำเนิดสัญญาณหลายชนิดหลังจากการชนชนิดนี้ เช่น อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electrons) ออเจอร์อิเล็กตรอน (Auger electrons) รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (characteristic X-ray) รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่อง (continuum x-rays , Bremsstrahlung) การเรืองแสงคาโทด (Cathodo luminescence) เป็นต้น จะเห็นว่าการชนในลักษณะนี้จะเกิดสัญญาณหลายชนิด โดยแต่ละชนิดก็จะบ่งบอกองค์ประกอบของตัวอย่างที่แตกต่างออกไปทั้งลักษณะของภาพจากสัญญาณ SE จนถึงการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (qualitative) และปริมาณ (quantitative) ของธาตุในสารตัวอย่างจากสัญญาณของรังสีเอกซ์อื่นจะทำให้ทราบชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างนั้น ๆ

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron)

การถ่ายโอนพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิของสารตัวอย่างไปยังบริเวณชั้นอิเล็กตรอนหรืออิเล็กตรอนของสารตัวอย่างได้รับพลังงานสูงขึ้นกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอะตอม อิเล็กตรอนจึงหลุดออกจากอะตอมกลายเป็นอิเล็กตรอนทุติยภูมิ ซึ่งสัญญาณชนิดนี้มีความสำคัญมาก ในการศึกษาลักษณะพื้นผิวของ สารตัวอย่าง ซึ่งจะใช้ภาพของสัญญาณ SE เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้โอกาส ในการเกิดสัญญาณ SE ยังขึ้นอยู่กับความลึกที่อิเล็กตรอนปฐมภูมิ จะสามารถเคลื่อนผ่านลงไปใ้ในเนื้อของสารตัวอย่าง ซึ่งถ้าความลึกของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ มีค่ามากโอกาสที่จะเกิด SE นั้นก็จะน้อยลง หมายถึง สัญญาณ SE ที่หลุดออกมาจาก สารตัวอย่างส่วนใหญ่จะออกมาจากบริเวณผิวของ สารตัวอย่าง ทั้งนี้สามารถอธิบายได้จากสัญญาณ SE เป็นอิเล็กตรอนที่มีพลังงานต่ำ ดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิลงไปกระตุ้นอะตอมของตัวอย่างในบริเวณลึกจากผิว ของสารตัวอย่าง โอกาสที่

SE จะหลุดออกมาจากชั้น ที่อยู่ในระดับลึกนั้นมีน้อยเพราะสัญญาณ SE จะถูกดูดกลืนโดยอะตอมบนผิวก่อนที่จะเล็ดลอดออกมา

รังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์ที่เกิดจากการกระตุ้น โดยอิเล็กตรอนปฐมภูมิแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ได้แก่ รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

รังสีเอกซ์ชนิดต่อเนื่องเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมที่บริเวณสนามคลอุมบีไกส์นิวเคลียสเกิดการเปลี่ยนทิศทางและสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วจึงคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (electromagnetic field) ซึ่งจะมีพลังงานตั้งแต่ค่าสูงสุดของพลังงานอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยาถึงค่าพลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยาสามารถเขียนเป็นความสัมพันธ์ (กรณี $E_0 > E_1$)

$$E_0 - E_1 = \Delta E = h\nu \quad (2.24)$$

เมื่อ E_0 คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนทำอันตรกิริยา
 E_1 คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังทำอันตรกิริยา
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (Planck constant)
 ν คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น

รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับอะตอมบริเวณชั้นโคจรของอิเล็กตรอนของอะตอม ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดได้รับพลังงานสูงกว่าแรงยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นก็หลุดออกจากวงโคจร ทำให้เกิดช่องว่างขึ้นในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนในวงโคจรถัดไปก็จะเข้ามาแทนที่ แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนในวงโคจรนอกจะมีพลังงานมากกว่า จึงต้องลดระดับพลังงานโดยคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำอันตรกิริยากับวงโคจรชั้น K แล้วอิเล็กตรอนในชั้น L ก็เข้ามาแทนที่พร้อมทั้งคายพลังงานออกมา ซึ่งพลังงานของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ ปลดปล่อยมานี้จะเป็นพลังงานเฉพาะระดับชั้นโคจร (electron shell) ของอิเล็กตรอนจากธาตุนั้นจึงเรียกคลื่นแม่เหล็กชนิดนี้ว่ารังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ

เนื่องจากระดับพลังงานในชั้นโคจรของอิเล็กตรอนสำหรับแต่ละธาตุนั้นมีค่าไม่เท่ากันจึงสามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในตัวอย่างซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพ และนอกจากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์บ่งบอกถึงปริมาณของธาตุในตัวอย่างได้อีกด้วย ซึ่งเป็นการวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ

ออเจอิเล็กตรอน (auger electron)

ออเจอิเล็กตรอนเกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิตกกระทบตัวอย่างและเหนี่ยวนำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะธาตุของชั้นโคจรใด ๆ รังสีเอกซ์ที่ปลดปล่อยจากอันตรกิริยานี้มีโอกาสดำรงไอออน พลังงานให้กับอิเล็กตรอนชั้นโคจรถัดออกไปทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจร ซึ่งการวิเคราะห์พลังงานออเจอิเล็กตรอนนี้มีประโยชน์ในการวิเคราะห์พื้นผิวของตัวอย่าง เช่น การวัดปริมาณของธาตุที่จับอยู่บนผิวที่บางมาก

การเรืองแสงคาโทด

เป็นลักษณะเรืองแสงจากตัวอย่างซึ่งแสงที่เรืองนี้เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงที่ตามองไม่เห็นเกิดจากอะตอมของตัวอย่างได้รับพลังงานจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้นนอกถูกกระตุ้นและเมื่อกลับเข้าสู่ภาวะปกติอิเล็กตรอนจะคายพลังงานออกมาในลักษณะของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเนื่องจากสภาวะกระตุ้นสภาวะปกติมีช่วงพลังงานไม่ห่างกันมากเมื่อคายพลังงานออกมาแล้วทำให้ความถี่หรือความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้

การกำเนิดภาพของสัญญาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิ

เมื่ออิเล็กตรอนจากขดลวดฟิลาเมนต์ (filament) ถูกควบคุมให้เป็นลำอิเล็กตรอนและโฟกัสด้วยเลนส์แม่เหล็กลงบนผิวของตัวอย่างและลำอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยชุดขดลวดสนามแม่เหล็กซึ่งเป็นขดลวดที่สร้างสนามแม่เหล็กเพื่อควบคุมการกราดของลำอิเล็กตรอน ไปบนผิวของ สารตัวอย่าง ซึ่งการกราดบนผิวของ สารตัวอย่างนี้จะทำให้ได้สัญญาณต่าง ๆ สัญญาณควบคุมการกราดบนพื้นผิวนี้นี้จะทำงานเข้าจังหวะกับชุดควบคุมการแสดงผลการสแกนของจอภาพ CRT จุดต่อจุดและเส้นต่อเส้นในขณะเดียวกันสัญญาณอิเล็กตรอนจะถูกนำไปควบคุมปริมาณความมืด-สว่างบนจอ CRT เกิดเป็นภาพขึ้นตามระนาบการกราดของอิเล็กตรอนใน SEM เนื่องจากพื้นที่แสดงจอภาพ CRT ใหญ่กว่าพื้นที่สแกนบนผิวของตัวอย่างโดยลำอิเล็กตรอนใน SEM ดังนั้นจึงสามารถหาความสัมพันธ์เพื่อหาลำกล้องขยายของภาพได้ดังนี้

$$\text{กำลังขยาย} = \frac{\text{พื้นที่บน CRT}}{\text{พื้นที่ของการกราดบนสารตัวอย่างของลำอิเล็กตรอน}}$$

ชุดของขดลวดสนามแม่เหล็กเป็นตัวควบคุมพื้นที่ของการกราดบนตัวอย่างของลำอิเล็กตรอนและนอกจากควบคุมพื้นที่ในการกราดแล้วยังควบคุมความเร็วในการกราดอีกด้วย โดยที่ลักษณะของความเร็วในการกราดนี้จะทำให้ภาพออกมามีความละเอียดแตกต่างกัน ถ้าเราใช้ความเร็วในการกราดมีความเร็วสูงเราจะได้ภาพที่มีความละเอียดต่ำกว่าใช้ความเร็วในการกราดต่ำ

2.7 การเตรียมฟิล์มบาง[23-24, 29-31, 37-39]

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางในปัจจุบันมีหลายวิธีที่นิยมใช้กัน โดยเราสามารถแบ่งตามลักษณะการเตรียมได้ดังนี้

1. กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ (vacuum processes)

- การระเหยสารเคมีในสุญญากาศ (Evaporation, PVD, TE)
- เทคนิคผนังร้อน (Hot wall technique, HWT)
- การระเหิดในระยะประชิด (Close spaced sublimation, CSS)
- สเป็คเตอร์ (Sputter deposition, SD)

2. กระบวนการเตรียมฟิล์มที่ได้จากปฏิกิริยาเคมีจากสถานะแก๊ส (Processes with chemical reactions from the gas phase)

- ซีวีดี (Chemical vapour deposition, CVD)
- พลาสมาซีวีดี (Plasma enhanced CVD, PECVD)
- เอ็ม โอซีวีดี (Metal-organic CVD, MOCVD)
- ซีเอสวีที (Close spaced vapour transport, CSVT)

3. เทคนิคการเตรียมอื่น ๆ (Other techniques)

- การพ่นละอองสารเคมี (Spray pyrolysis, SPL)
- การอาบสารละลายเคมี (Chemical bath deposition, CBD)
- การเตรียมโดยวิธีไฟฟ้าเคมี (Electrodeposition, ED)
- เตรียมฟิล์มโดยทำให้เป็นชั้น ๆ ของสาร (Stacked layer reaction, SLR)
- วิธีการพิมพ์สกรีน (Screen printing and sintering, SP)

ในงานวิจัยนี้เราเลือกใช้กระบวนการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ (Thermal Evaporation Method: TE) เนื่องจากฟิล์มที่เตรียมได้ มีคุณภาพดี เหมาะสำหรับนำมาศึกษาสมบัติพื้นฐานของฟิล์มบาง

2.7.1 การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ

เทคนิคการเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหย สารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศนั้น เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางวิธีหนึ่งของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยสาร ซึ่งต้องเตรียมในสุญญากาศที่ระดับความดันประมาณ 10^{-5} - 10^{-7} ทอร์ วัตถุประสงค์ของการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีนี้

คือ การควบคุมการเคลื่อนย้ายอะตอมจากแหล่งกำเนิดความร้อนไปยังฐานรองรับที่ห่างออกไปแล้ว เกิดเป็นฟิล์มบาง

2.7.1.1 อัตราการระเหยสาร [37]

จากการทดลองของ Hertz และ Knudsen พบว่าอัตราการไหลของอะตอมหรือโมเลกุล ในสุญญากาศ จากแหล่งกำเนิดความร้อน (heat source) คือ

$$\Phi_e = \frac{3.513 \cdot 10^{22}}{(MT)^{1/2}} P_e \quad \text{โมเลกุลต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.25)$$

เมื่อ	Φ_e	คือ	ฟลักซ์ของจำนวนอะตอมหรือโมเลกุลของสารที่ระเหยต่อหน่วยพื้นที่ต่อเวลา
	P_e	คือ	ความดันสมดุล (equilibrium pressure) มีหน่วยเป็นทอร์
	M	คือ	มวลโมเลกุล
	T	คือ	อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

อัตราการระเหยมวลสาร (mass evaporation rate : Γ_e) สามารถหาได้จาก

$$\Gamma_e = 5.84 \cdot 10^{-2} (M/T)^{1/2} P_e \quad \text{กรัมต่อตารางเซนติเมตร-วินาที} \quad (2.26)$$

ที่ความดัน 10^{-2} ทอร์ ค่าของ Γ_e ในธาตุจำนวนมากจะมีค่าประมาณ 10^{-4} กรัมต่อตารางเซนติเมตร - วินาที ดังนั้นสิ่งที่มีอิทธิพลต่ออัตราการระเหยสาร คือ อุณหภูมิเพราะมีผลกระทบอย่างมากต่อความดันสมดุล

2.7.1.2 ความดันไอของธาตุ (vapor pressure of the elements)

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิและความดันไอ แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dP}{dT} = \frac{\Delta H(T)}{T \Delta V} \quad (2.27)$$

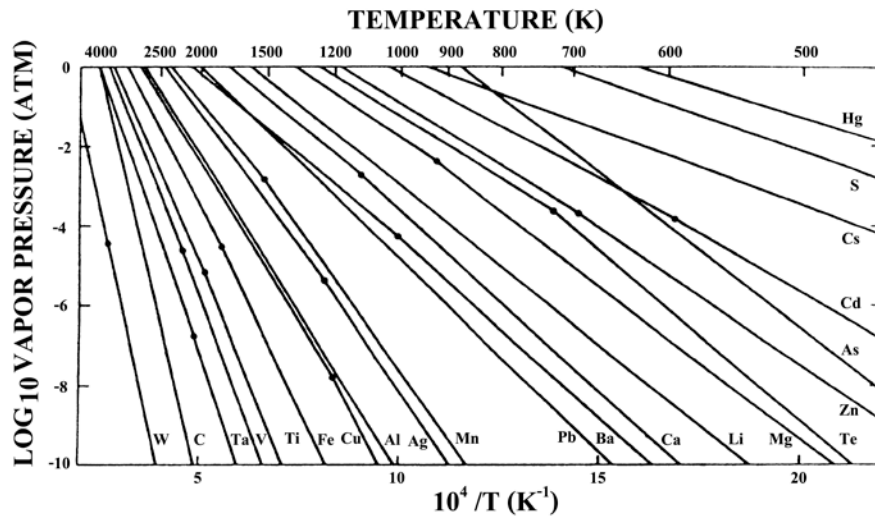
ถ้าให้ ΔV มีค่าเท่ากับปริมาตรของไอ (V_v) และเมื่อแก๊สนี้เป็นแก๊สในอุดมคติแล้ว V_v จะมีค่าเป็น RT/P ดังนั้น เขียนสมการที่ (2.27) ใหม่ได้เป็น

$$\frac{dP}{dT} = \frac{P \Delta H(T)}{RT^2} \quad (2.28)$$

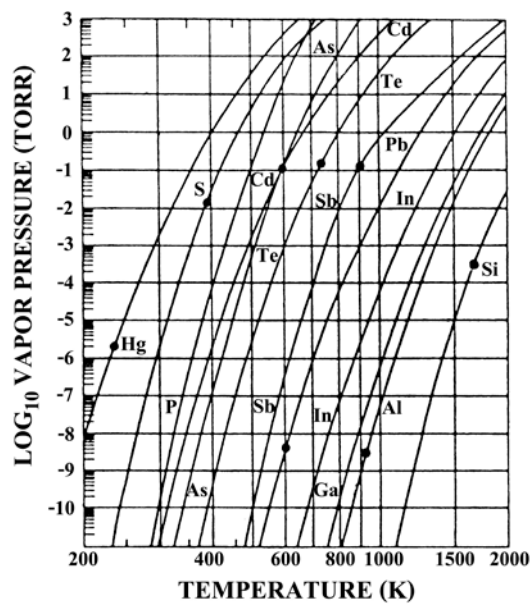
ถ้าประมาณให้ $\Delta H(T)$ มีค่าเท่ากับ ΔH_e (ความร้อนของสารในการระเหย) ในกรณีนี้ จะได้

$$\ln P \cong -\frac{\Delta H_e}{RT} + I \quad \text{หรือ} \quad P = P_0 \exp -\frac{\Delta H_e}{RT} \quad (2.29)$$

เมื่อ I (หรือ $P_0 = \exp I$) เป็นค่าคงที่ของการอินทิเกรต



ภาพที่ 2.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอของธาตุต่างๆ กับส่วนกลับของอุณหภูมิสัมบูรณ์



ภาพที่ 2.17 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความดันไอของธาตุต่างๆ กับอุณหภูมิองศาสัมบูรณ์

2.7.1.3 การระเหยสารประกอบ (evaporation of compound)

เนื่องจากสารประกอบจะมีไอออนขนาดใหญ่กว่าโลหะ ดังนั้นเมื่อ สารประกอบ ระเหิด กลายเป็นไอแล้ว ส่วนประกอบของไอจะต่างไปจากสารตั้งต้นที่เป็นของแข็งหรือของเหลว ตัวอย่างเช่น การระเหย สารประกอบกึ่งตัวนำหมู่ II-VI ได้แก่ CdS, CdTe และ CdSe เป็นต้น เมื่อระเหยเป็นไอจะเกิดปฏิกิริยาการแตกตัวออก (dissociation) ดังนี้ $MX_{(s)} \rightarrow M_{(g)} + \frac{1}{2}X_{2(g)}$ โดยที่ X คือ S, Te และ Se และเมื่อเกาะลงบนผิวของฐานรองรับแล้วจะทำการจัดรูปแบบใหม่เป็น $MX_{(s)}$ เหมือนเช่นเดียวกับสารตั้งต้นในการระเหย แสดงได้ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงปฏิกิริยาการระเหยสารประกอบ

ชนิดของปฏิกิริยา	ปฏิกิริยาทางเคมี	สารตัวอย่าง
การระเหยโดยไม่มีการแตกตัว	$MX(s \text{ หรือ } l) \rightarrow MX(g)$	SiO, GeO, SnO, AlN, CaF_2 , MgF_2
การแยกส่วนประกอบ	$MX(s) \rightarrow M(s) + \frac{1}{2}X_2(g)$ $MX(s) \rightarrow M(l) + \frac{1}{n}X_n(g)$	Ag_2S , Ag_2Se สารกึ่งตัวนำกลุ่ม III-IV
การระเหยโดยการแตกตัว	$MX(s) \rightarrow M(g) + \frac{1}{2}X_2(g)$	
(ก) ชาล์โคจีไนต์	$X = S, Se, Te$	CdS, CdTe, CdSe
(ข) ออกไซด์	$MO_2(s) \rightarrow MO(s) + \frac{1}{2}O_2(g)$	SiO_2 , GeO_2 , TiO_2 , SnO_2 , ZrO_2

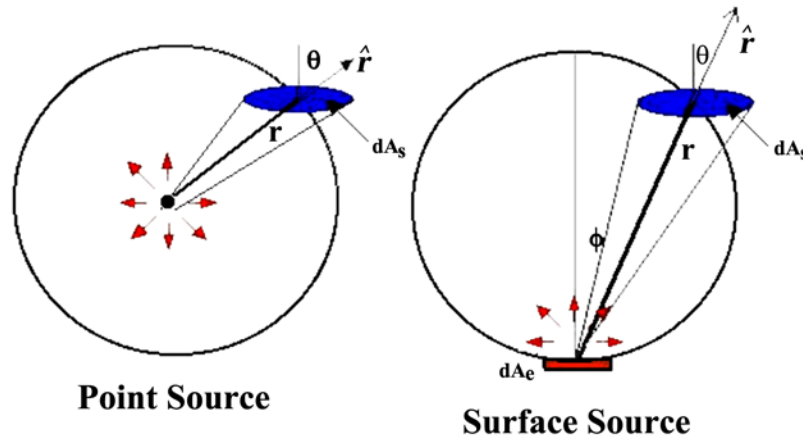
M = โลหะ X = อโลหะ

2.7.1.4 อิทธิพลของโครงสร้างเชิงเรขาคณิตต่อการระเหยสาร (deposition geometry)

การเตรียมฟิล์มบางนั้นจะต้องพิจารณาประเภทของแหล่งกำเนิดสารที่ใช้ในการระเหย รวมถึงฐานรองรับ ที่อะตอมของสารจะมาตกกระทบด้วย สมมติว่าการระเหยสารเกิดขึ้นในระบบการไหลของโมเลกุล พิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดแบบจุด (point source) มวลรวมของสารจากการระเหย (total evaporation mass : $\overline{M}_e$) สามารถวัดได้จากน้ำหนักของสารก่อนและ

หลังระเหยแต่เมื่อพิจารณาแหล่งกำเนิดจากพื้นผิว (surface source) มวลรวมของสารจากการระเหยจะหาได้จาก

$$\overline{M}_e = \int_0^t \int_{A_e} \frac{M}{N_A} \Phi_e dA_e dt = \int_0^t \int_{A_e} \Gamma_e dA_e dt \quad (2.30)$$



ภาพที่ 2.18 แสดงรูปแบบการระเหยของสาร

โดยที่ A_e คือ พื้นที่ผิวของสารที่ใช้ระเหย ปริมาณของมวล $d\overline{M}_s$ ที่ตกลงบนฐานรองเป็นพื้นที่ dA_s จากภาพที่ 2.18 dA_c คือ พื้นที่ผิวของทรงกลม จะได้ว่า $dA_c = dA_s \cos \theta$ ดังนั้น จะมีค่าเป็น

$$d\overline{M}_s = dA_s \left(\frac{\overline{M}_e \cos \theta}{4\pi^2} \right) \quad (2.31)$$

เมื่อ r คือ ระยะระหว่างแหล่งกำเนิดถึงฐานรอง

เมื่อพิจารณาการระเหยสารจากแหล่งกำเนิดที่มีผิวเรียบมวลตกกระทบบนพื้นที่เล็กน้อย dA_c โดยทำมุมกับพื้นผิวแหล่งกำเนิด ϕ และอยู่ห่างเป็นระยะ r จะได้

$$d\overline{M}_s(\phi, r) = (\cos \phi) d\overline{M}_s(0, r) dA_c$$

แฟกเตอร์ $\cos \phi$ เป็นฟังก์ชันของ ϕ เรียกว่า การกระจายของฟลักซ์แบบโคไซน์ (cosine flux distribution) เป็นผลมาจากระบบการไหลของโมเลกุลเพื่อประมาณค่า $\frac{d\overline{M}_s(\phi, r)}{dA_c}$ ทำการอินทิเกรตตลอดครึ่งทรงกลมรัศมี r จะได้

$$\overline{M}_e = \int_0^{\pi/2} \left(\frac{d\overline{M}_s(0,r)}{dA_c} \right) (\cos \phi) 2\pi (\sin \phi) r d\phi$$

จากการประมาณค่าอินทิเกรตข้างต้นจะพบว่า

$$\frac{d\overline{M}_s(0,r)}{dA_c} = \frac{\overline{M}_e}{\pi^2}$$

ดังนั้น

$$\frac{d\overline{M}_s(\phi,r)}{dA_c} = \frac{\overline{M}_e}{\pi^2} \cos \phi$$

จาก

$$dA_c = dA_s \cos \theta$$

จะได้

$$\frac{d\overline{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \frac{\overline{M}_e \cos \phi \cos \theta}{\pi^2} \quad (2.32)$$

และสามารถเขียนเป็นสมการทั่วไปได้ดังนี้ คือ

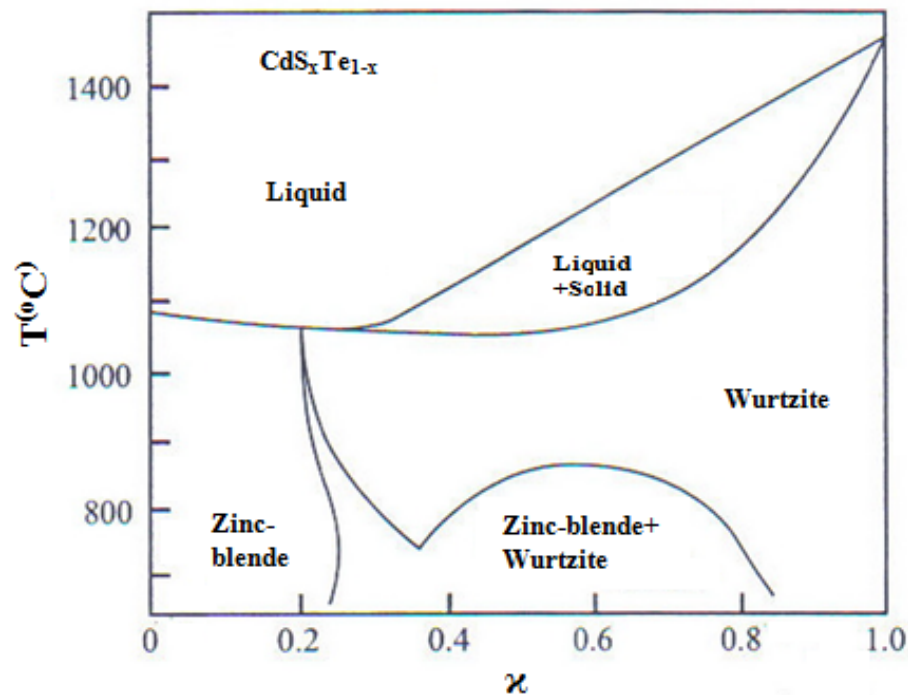
$$\frac{d\overline{M}_s(\phi,\theta,r)}{dA_s} = \overline{M}_e \frac{(n+1) \cos^n \phi \cos \theta}{2\pi^2} \quad (n \geq 0) \quad (2.33)$$

เมื่อ $n=1$ สมการนี้จะเป็นการกระจายของฟลักซ์แบบโคไซน์ ถ้า $n > 1$ อธิบายได้ว่า มีทิศทางของฟลักซ์หลายทิศทาง (more forward directed) หรือถ้า $n < 1$ จะเกิดการกระจายแบบเดียวกัน (more uniform distribution) และสำหรับ $n = 0$ การกระจายของฟลักซ์จะเหมือนแหล่งกำเนิดแบบจุด

2.8 เฟสไดอะแกรมของฟิล์มบางของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} [40–47]

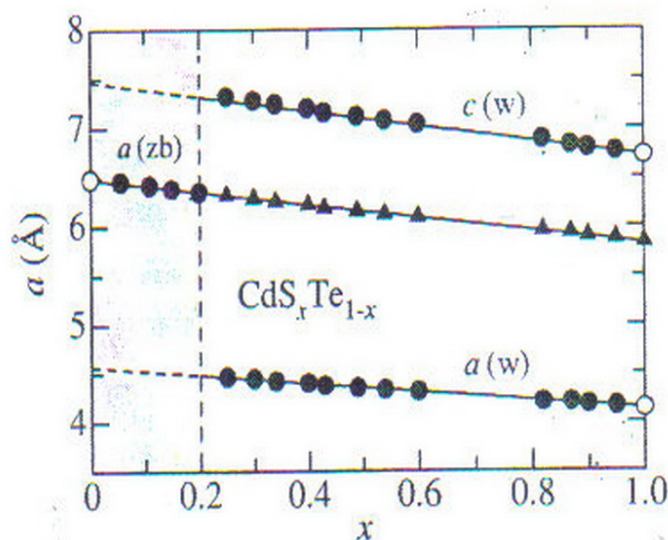
อัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และ CdTe มีโครงสร้างผลึกเป็นได้ทั้งแบบซิงค์เบลนด์และแบบเวิร์ทไซท์ ในยุคแรก การเตรียมผลึกเดี่ยวของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ทุกองค์ประกอบของ x ตั้งแต่ 0 ถึง 1 ไม่ประสบความสำเร็จเนื่องจากช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ CdS ($E_g = 2.42$ อิเล็กตรอนโวลต์) กับ CdTe (1.50 อิเล็กตรอนโวลต์) แตกต่างกันมาก แต่เมื่อไม่นานมานี้ โอฮาตะและเพื่อนร่วมงาน [47] ได้ทำการศึกษาสมบัติของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS_xTe_{1-x} ตลอดทุกองค์ประกอบของ x และพบว่าโครงสร้างเปลี่ยนจากโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์เป็นโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ที่ $x \sim 0.2$ จากนั้นวุดและเพื่อนร่วมงาน [42]

ทำการศึกษาการปลดปล่อยรังสีเอกซ์ โดยการเหนี่ยวนำด้วยอนุภาค (particle-induced X-ray emission, PIXE) และการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) ซึ่งยืนยันว่า อัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ มีโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ที่ $x \leq 0.2$ และจะมีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์เมื่อ $x \geq 0.25$ ภาพที่ 2.19 แสดงให้เห็นถึงเฟสไดอะแกรมของระบบผลึกของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS และของสารกึ่งตัวนำ CdTe



ภาพที่ 2.19 แสดงเฟสไดอะแกรมของระบบผลึกของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ CdS-CdTe

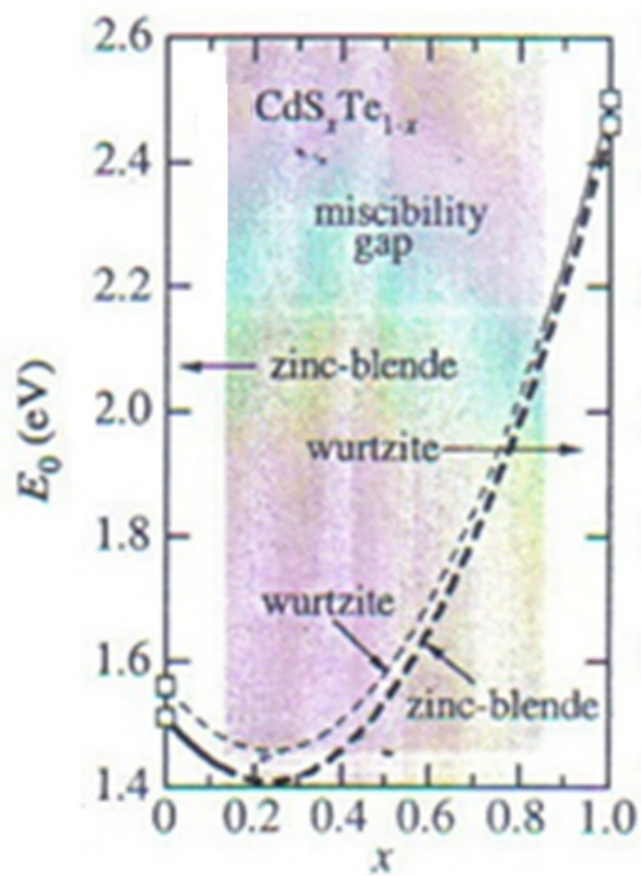
ความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ของโครงผลึก a และ c กับองค์ประกอบ x ของผลึกเดี่ยว อัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ที่ศึกษาโดยวูดและเพื่อนร่วมงาน (Wood, 1999) จากวิธีการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์จะแสดงดังรูปที่ 2.42 การเปลี่ยนเฟสจะเกิดขึ้นเมื่อ $x \sim 0.2$ สัญลักษณ์รูปสามเหลี่ยมทึบ จะแสดงค่าคงที่โครงผลึกยังผล $a_{\text{eff}} = (\sqrt{3}a^2c)^{1/3}$ ซึ่งนิยามโดยอะดาชิ [40-41] จากภาพที่ 2.20 สามารถสรุปได้ว่า ค่าคงที่โครงผลึกทั้งโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์สอดคล้องกับกฎของวีการ์ด (Vegard's law) ได้เป็นอย่างดี ถ้าเราใช้ค่าคงที่โครงผลึกยังผล a_{eff} แทนค่า a และ c ของเฟสที่มีโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซด์ ($0.2 \leq x \leq 1.0$) แล้วอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ จะได้ a_{eff} กับ x มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นตลอดช่วง ($0 \leq x \leq 1.0$)



ภาพที่ 2.20 แสดงค่าคงที่ของโครงผลึก a และ c ที่สัมพันธ์กับ x ของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ทั้งโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ที่อุณหภูมิ 300 เคลวิน

จากเฟสไดอะแกรมใน ภาพที่ 2.19 ในช่วงอุณหภูมิต่ำ เมื่อความเข้มข้นของอะตอม S มีค่าต่ำ อัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ จะมีโครงสร้างผลึกเป็นแบบซิงค์เบลนด์ แต่เมื่อความเข้มข้นของ S มีค่าสูงแล้วโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ บริเวณโครงสร้างผลึกซิงค์เบลนด์กับบริเวณโครงสร้างผลึกเวิร์ทไซท์จะถูกคั่นด้วยเฟสผสมที่เป็นทั้งโครงสร้างผลึกซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกเวิร์ทไซท์ดังนั้นในทางปฏิบัติมักจะวัดขอบการดูดกลืนแสงได้สองค่าเสมอ ซึ่งขอบการดูดกลืนแสงค่าพลังงานต่ำจะสอดคล้องกับเฟสของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์ ส่วนขอบการดูดกลืนแสงค่าพลังงานสูงจะสอดคล้องกับเฟสของโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์ ซึ่งความเข้มข้นของขอบการดูดกลืนแสงจะสัมพันธ์กับความเข้มข้นของเนื้อสารในแต่ละเฟส

โอฮาตะและเพื่อนร่วมงาน [47] ได้ทำการศึกษาหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน (E_g) ของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$ ขององค์ประกอบ $0 \leq x \leq 1$ ภาพที่ 2.21 แสดงค่า $E_g(x)$ ของโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์จะเป็น $1.5+0.085x+1.80x^2$ และ $1.560+0.859x+1.80x^2$ ตามลำดับ โดยที่พารามิเตอร์โบว์ริง (bowing parameter) มีค่าประมาณ 1.80 อิเล็กตรอน โวลต์ ทั้งโครงสร้างผลึกแบบซิงค์เบลนด์และโครงสร้างผลึกแบบเวิร์ทไซท์



ภาพที่ 2.21 แสดงค่าช่องว่างแถบพลังงานของฟิล์มบางของอัลลอยด์ของสารกึ่งตัวนำ $\text{CdS}_x\text{Te}_{1-x}$