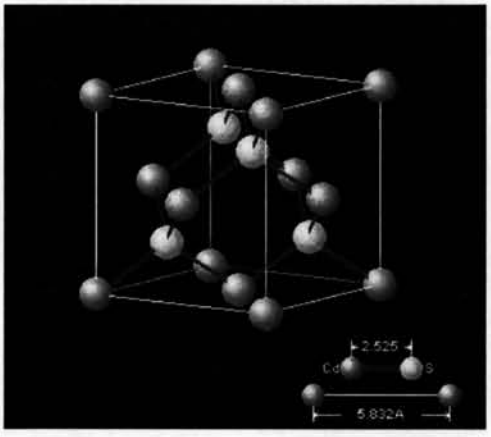
บทที่ 2
ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและเทคนิคในการวิเคราะห์

โครงสร้างผลึกของแคดเมียมซัลไฟด์

สารกึ่งตัวนำที่สำคัญส่วนใหญ่มีโครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond) หรือ zincblende ส่วนแคดเมียมซัลไฟด์มีโครงสร้างสองรูปแบบคือ zincblende หรือ cubic zinc sulfide และ wurtzite ขึ้นกับเงื่อนไขและวิธีการเตรียมสาร

2.1 โครงสร้างผลึกแบบ Zincblende

โครงสร้าง zincblende จัดเป็นพวก tetrahedral phase นั่นคือแต่ละอะตอมจะล้อมรอบด้วยอะตอมใกล้สุดเท่านั้น (nearest neighbors) ระยะเท่ากัน 4 อะตอม อยู่ที่มุมของรูป tetrahedron ดังแสดงในรูปที่ 2.1



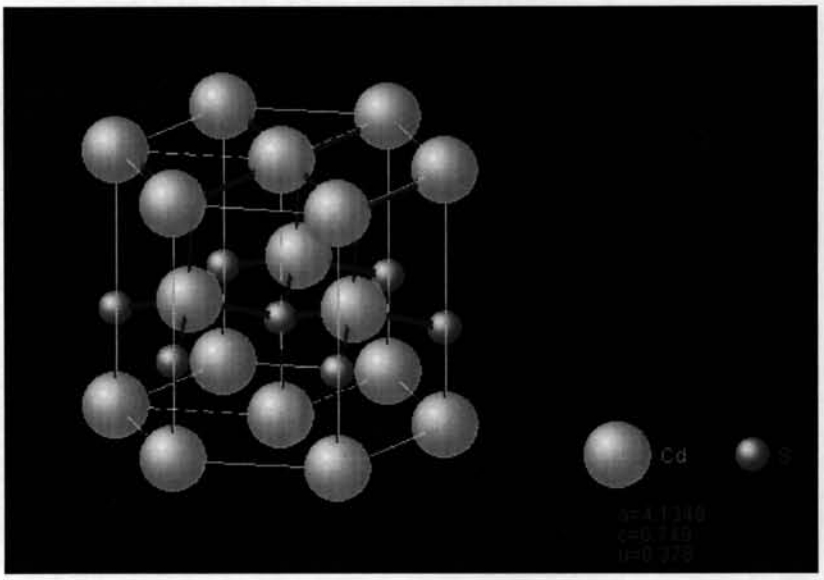
รูป 2.1 โครงสร้างผลึกแบบ zincblende กรณี CdS จะมีตำแหน่ง Cd และ S ดังแสดง

ข้อแตกต่างระหว่างโครงสร้างเพชรและ zincblende คือ โครงสร้างเพชรในหนึ่งหน่วยเซลล์ (unit cell) มีอะตอมอยู่ 8 อะตอมเป็นธาตุเดียวกันแต่ zincblende เป็นธาตุต่างชนิดกันอย่างละ 4 อะตอม โดยพิจารณาได้เป็น 2 face-centered cubic lattices ที่ซ้อนอยู่ด้วยกันโดยแต่ละแลตทิช

(lattice) ห่างกันเป็นระยะ ¼ ของเส้นทแยงมุมของหน่วยเซลล์ลูกบาศก์กรณี CdS มี Cd และ S โดยให้ Cd อยู่ที่ตำแหน่ง $000, 0\frac{1}{2}\frac{1}{2}, \frac{1}{2}0\frac{1}{2}, \frac{1}{2}\frac{1}{2}0$ จะมี S อยู่ที่ $\frac{1}{4}\frac{1}{4}\frac{1}{4}, \frac{1}{4}\frac{3}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{1}{4}\frac{3}{4}, \frac{3}{4}\frac{3}{4}\frac{1}{4}$ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.1 สารประกอบที่มีโครงสร้างเดียวกันนี้คือ ZnS, AlSb, GaSb, GaP เป็นต้น

2.2 โครงสร้างผลึกแบบ Wurtzite

โครงสร้าง CdS แบบ wurtzite หรือ hexagonal structure แตกต่างกันที่การเรียงตัวของระนาบพันธะเตตระโกนอล (tetrahedral bond) ของอะตอมในชั้นที่สองขึ้นไปโดยโครงสร้างแบบนี้เกิดจากการนำโครงสร้างย่อยแบบ hexagonal close-pack ที่มีอะตอมต่างชนิดกันวางซ้อนเหลื่อมกันเป็นระยะ 5/8 ตามแนว C (ดูในรูป 2.2) โดยในหนึ่งหน่วยเซลล์ จะมี 8 อะตอม ซึ่งประกอบด้วยธาตุ 2 ชนิด แต่ละชนิดมี 4 อะตอม ดังแสดงดังรูปที่ 2.2 [2]



รูปที่ 2.2 โครงสร้างผลึกแบบ wurtzite กรณี CdS จะมีตำแหน่ง Cd และ S ดังแสดง

2.3 ทฤษฎีและกระบวนการโซล-เจล

ความพยายามส่วนใหญ่ในการเตรียมอนุภาคนาโน (nanoparticle) แบ่งออกเป็น 2 วิธีการหลักคือ

1. เตรียมในสถานะแก๊ส
2. เตรียมโดยกระบวนการโซล-เจล

อนุภาคนาโนที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 10 นาโนเมตร มีโครงสร้างผลึกสม่ำเสมอกัน มีผิวหน้าสม่ำเสมอกัน มีผิวหน้าไม่ขรุขระ มีการกระจายของขนาดอนุภาคไม่มากจะใช้วิธีการเตรียมทั้ง 2 วิธีที่กล่าวข้างต้น กระบวนการโซล-เจล โดยความหมายของชื่อเรียกขานเกี่ยวข้องกับวิวัฒนาการโครงข่ายสารอินทรีย์เชื่อมโยงถึงการแขวนลอยคอลลอยด์ (colloidal suspension) และการเป็นเจล (gelation) ของโซลเกิดเป็นโครงร่างตาข่ายในสภาวะเหลว (liquid phase) คอลลอยด์เป็นสารที่มีส่วนประกอบหนึ่งหรือสองสถานะ สารผสมคอลลอยด์เป็นสารผสมที่ไม่เป็นเนื้อเดียวกันซึ่งมีอนุภาคเล็กๆ ของสารหนึ่งกระจายทั่วไปในสารอีกตัว อนุภาคส่วนผสมของคอลลอยด์มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1 ถึง 1000 นาโนเมตร โดยขั้นตอนโซลคือการละลายสารที่ต้องการลงในตัวทำละลาย อาจจะเป็นสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์เพื่อให้ได้โซลที่ต้องการ เพื่อทำเป็นฟิล์มแล้วปรับเปลี่ยนให้ได้สารที่ต้องการตามวิธีการต่างๆ ต่อไป

วิธีโซล-เจลเป็นวิธีทางเคมี สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคคอลลอยด์ และสารประกอบผสมระหว่างสารผสมอินทรีย์-อนินทรีย์ ที่ซึ่งเป็นความรู้เฉพาะทางที่มีประโยชน์ในการเตรียมสารโลหะออกไซด์เชิงซ้อน และอื่น ๆ กระบวนการโซล-เจลมีประโยชน์อยู่หลายประการที่สามารถเตรียมที่อุณหภูมิห้อง นอกจากนี้กระบวนการโซล-เจลที่สามารถจะเตรียมเป็นฟิล์มบางเซรามิกส์ เซมิคอนดักเตอร์ ซุปเปอร์คอนดักเตอร์ จากสารละลายกระบวนการโซล-เจลจะประกอบด้วย กลุ่มของโลหะอัลคอกไซด์ M (OR) $_2$ โดยที่ R เป็นกลุ่มอัลคิล, OR กลุ่มอัลคอกซี กระบวนการที่สำคัญของโซล-เจลประกอบด้วยไฮโดรไลซีสและคอนเดนเซชั่น [3]

$$MOR + H_2O \longrightarrow MOH + ROH \qquad \text{ไฮโดรไลซีส}$$

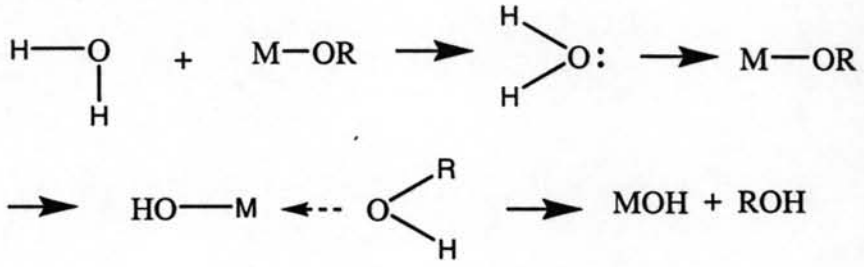
$$MOH + ROM \longrightarrow MOM + ROH \qquad \text{คอนเดนเซชั่น}$$

ไฮโดรไลซีส และ คอนเดนเซชั่น เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นพร้อมๆ กัน โดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซีสเป็นปฏิกิริยาการกำจัดน้ำ จากสมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีกลุ่มอัลคิลจะมีการแลกเปลี่ยนตำแหน่งกับตำแหน่งของไฮโดรเจนของโมเลกุลน้ำ ทำให้โมเลกุลน้ำเปลี่ยนไปเป็นกลุ่ม

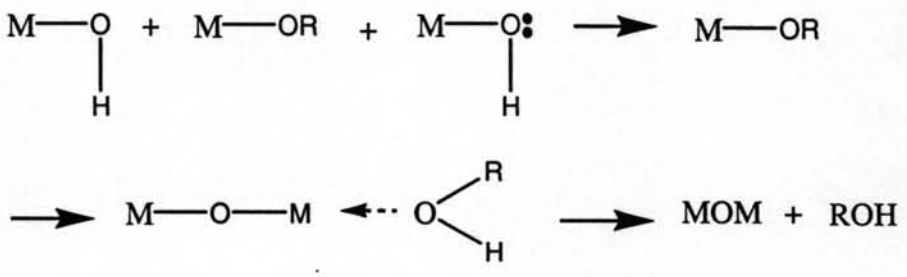
ของแอลกอฮอล์ และกลุ่มเมตัลอัลคอกไซด์ เปลี่ยนเป็นเมเตัลไฮดรอกไซด์ ส่วนกระบวนการคอนเดนเซชั่น หรือปฏิกิริยาควบแน่น เป็นปฏิกิริยาที่กลุ่มของเมตัลไฮดรอกไซด์ รวมตัวกับเมตัลอัลคอกไซด์ และให้กลุ่มของโมเลกุลแอลกอฮอล์ออกมา โดยปฏิกิริยาการควบแน่นนี้จะทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายขึ้น

2.3.1 ไฮโดรไลซีสและคอนเดนเซชั่น

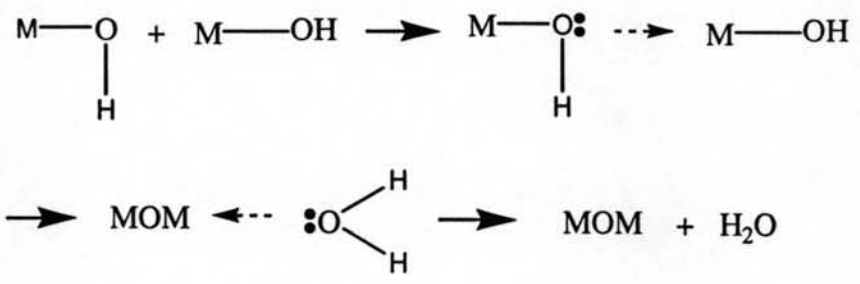
ไฮโดรไลซีส และคอนเดนเซชั่น ทั้ง 2 ปฏิกิริยานี้จะประกอบไปด้วยกลไกย่อยขึ้นมาอีก อันเนื่องมาจาก การถ่ายโอนโปรตอนของโมเลกุลน้ำ กับกลุ่มอัลคอกซี่ กระบวนการการควบแน่นแบบอัลโซเลชั่น ออโซเลชั่น [3]



Hydrolysis



Alcoxolation



Oxolation

2.3.2 อลูมิเนท

อลูมิเนท คือ กระบวนการการเตรียมกลุ่มโลหะอลูมิเนียมออกไซด์ โดยที่อลูมิเนียมมีเวเลนซ์อิเล็กตรอนอยู่สาม และเป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในแร่ โดยกลุ่มของอลุมิเนียมอัลคอกไซด์ ($Al(OR)_3$) มีการประยุกต์ใช้ในการเตรียมอลูมิเนท หรือ สารกลุ่มเซรามิกส์ โดยอลูมิเนทสามารถที่จะเตรียมโดยกระบวนการทางโซล-เจล [3]

2.4 ทฤษฎีและเทคนิคการเลี้ยวเบน

2.4.1 การเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์ (X-ray diffraction)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์ ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของของแข็ง โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของเอ็กซ์เรย์สามารถวิเคราะห์หาค่าคงที่แลตทิช เรขาคณิตของระบบผลึก บอกถึงส่วนประกอบของธาตุที่มีอยู่ในผลึก ความบกพร่องของผลึก โดยที่เทคนิคการเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์เป็นการฉายเอกซ์เรย์ไปยังวัสดุตัวอย่างและผลการเลี้ยวเบนอันเนื่องมาจากระนาบของผลึก ดังอธิบายตามสมการของแบรกก์ [2]

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

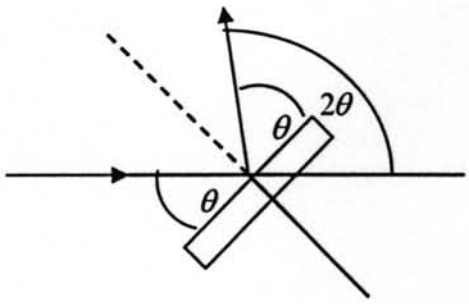
d_{hkl} คือระยะห่างระหว่างระนาบผลึกที่ขนานกัน

θ คือมุมตกกระทบของเอกซ์เรย์กระทำกับเส้นปกติของระนาบผลึก

λ ความยาวคลื่นเอกซ์เรย์

n เลขจำนวนเต็มสัมพันธ์กับอันดับการเลี้ยวเบน
มีค่า 1, 2, 3 ...

การแทรกสอดของรังสีที่เลี้ยวเบนของผลึกแบบเสริมเป็นไปตามเงื่อนไขของสมการ 2.1 เมื่อทราบค่า λ และ n โดยมุม 2θ วัดจากเส้นรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อนดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แสดง 2θ ที่เกิดจากแนวรังสีตกกระทบทำกับรังสีสะท้อน

อย่างไรก็ดี ถึงแม้ว่าในวิทยานิพนธ์จะไม่มีการวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์ แต่หัวข้อนี้จะเป็นใช้เป็นส่วนเสริมในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

2.4.2 การวิเคราะห์โครงสร้างผลึก

จากริ้วการเลี้ยวเบนของเอกซ์เรย์โดยโครงสร้างผลึก นำข้อมูลที่วัดได้ไปคำนวณหาค่า d_{hkl} การมีโครงสร้างผลึกซิงเบลนด์ เป็นผลึกลูกบาศก์ นั้นคือค่าคงที่แลตทิช $a=b=c$ $\alpha=\beta=\gamma=90°$ ค่าดัชนีมิลเลอร์ hkl สัมพันธ์กับระยะห่างระหว่างระนาบ d_{hkl} คือ [4]

$$\frac{1}{d^2{}_{hkl}}=\frac{h^2+k^2+l^2}{a^2} \tag{2.2}$$

นำค่า d_{hkl} แทนลงในสมการ (2.1) จะได้และ $n=1$

$$\lambda=\frac{2a\sin\theta}{\sqrt{h^2+k^2+l^2}} \tag{2.3}$$

ส่วนกรณีที่เป็นโครงสร้างผลึก wurtzite $a\neq b\neq c$ แต่มุม $\alpha=\beta=90°$ และ $\gamma=120°$ และความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีมิลเลอร์และระยะระหว่างระนาบ คือ

$$\frac{1}{d^2{}_{hkl}}=\frac{h^2+k^2}{a^2}+\frac{l^2}{c^2} \tag{2.4}$$

แทนค่า d_{hkl} ลงในสมการ (2.1) จะได้ [4]

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

2.5 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscopy: SEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลจากภาพถ่ายของสารตัวอย่าง โดยที่ข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์พื้นผิวสามารถวิเคราะห์สัดส่วนธาตุบริเวณพื้นผิว โดยหลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนทำงานภายใต้ระบบสุญญากาศและมีปืนอิเล็กตรอนที่เป็นแหล่งจ่ายอิเล็กตรอน พลังงานที่ใช้ในการเร่งอิเล็กตรอนอยู่ในช่วงประมาณ 100 อิเล็กตรอนโวลต์ถึง 50 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ โดยลำอิเล็กตรอนที่ยิงจะถูกควบคุมขนาดด้วยเลนส์แม่เหล็กที่อยู่ภายในระบบของเครื่องที่ใช้ยิงลงไปในพื้นผิววัสดุผลที่เกิดจากการยิงลำอิเล็กตรอนไปที่สารตัวอย่างสามารถวิเคราะห์ผลของ SEM โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังต่อไปนี้ [5]

2.5.1 การกระเจิงกลับของอิเล็กตรอน (Back scattering electron)

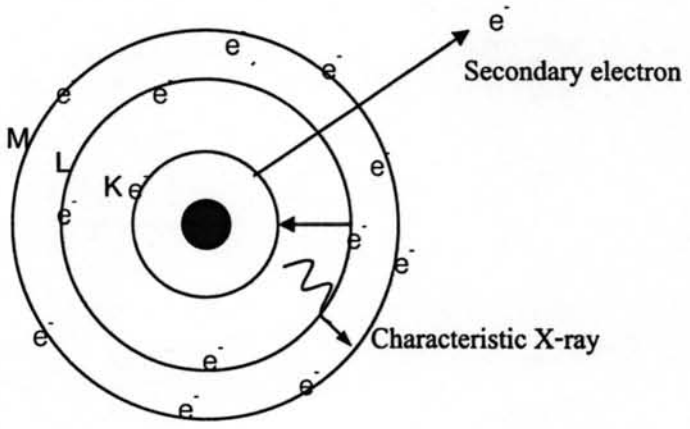
เมื่อลำอิเล็กตรอนถูกยิงจากปืนอิเล็กตรอนเรียกว่าอิเล็กตรอนปฐมภูมิ อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะถูกระดมยิงลงไปบริเวณพื้นผิววัสดุ จะมีอิเล็กตรอนปฐมภูมิบางส่วนที่ชนกับอะตอมบริเวณพื้นผิววัสดุและสะท้อนกลับมาโดยไม่มีการถ่ายโอนพลังงานให้กับอิเล็กตรอนบริเวณพื้นผิวเป็นการชนแบบยืดหยุ่น [6]

2.5.2 การวิเคราะห์อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron)

เมื่ออิเล็กตรอนปฐมภูมิถูกระดมยิงลงไปบริเวณพื้นผิววัสดุ และมีอิเล็กตรอนปฐมภูมิบางส่วนที่ชนกับอิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมบริเวณพื้นผิววัสดุและถ่ายโอนพลังงานบางส่วนให้กับอิเล็กตรอนชั้นในของอะตอมที่ถูกชนถ้ามีพลังงานที่ทำให้อิเล็กตรอนชั้นในหลุดออกไป อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากอะตอมบริเวณพื้นผิวของวัสดุเรียกว่าอิเล็กตรอนทุติยภูมิ [6]

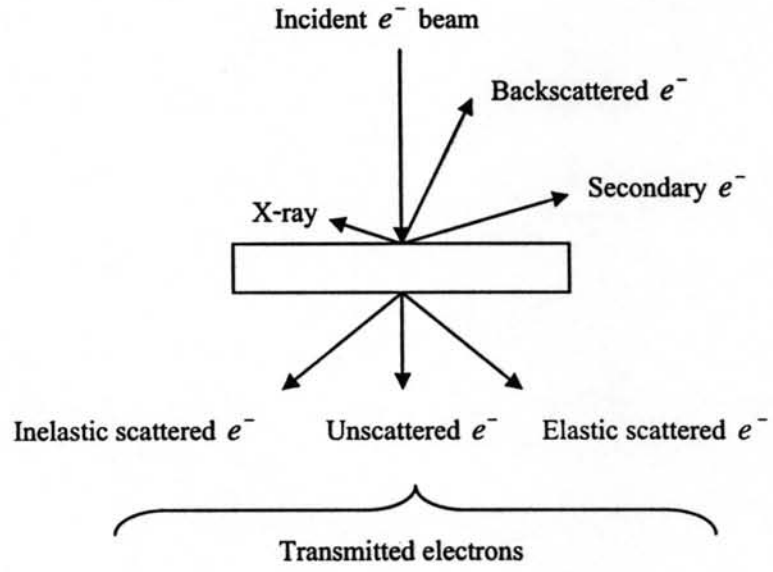
2.5.3 การปลดปล่อยเอกซ์เรย์เฉพาะของธาตุที่มีอยู่บริเวณพื้นผิววัสดุ (Characteristics X-ray in a materials surface)

หลังจากที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิถูกไอออไนซ์ออกไปแล้วบริเวณที่มีอิเล็กตรอนครอบครองอยู่เดิมก็เกิดตำแหน่งว่างขึ้น จะมีอิเล็กตรอนบางชั้นย่อย ที่จะเปลี่ยนสถานะที่สูงกว่าลงมาสู่สถานะที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิเคยครอบครองอยู่ซึ่งจะเป็นไปตามกฎการคัดเลือก (selection rule) โดยการยิงอิเล็กตรอนไปยังสารที่ต้องการหาธาตุต่างๆที่มีอยู่ อิเล็กตรอนที่มีพลังงานมากพอวิ่งชนอิเล็กตรอนวงในของอะตอมที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากวงโคจรนี้ อิเล็กตรอนวงนอกหล่นมาแทน การเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากวงนอกสู่วงในจะเกิดการคายพลังงาน [6]



รูปที่ 2.4 แสดงการชนอิเล็กตรอนที่ยิงเข้าไปกับอิเล็กตรอนในสารที่ต้องการวิเคราะห์

พลังงานที่ปลดปล่อยออกเป็นเอกซ์เรย์ เนื่องด้วยอะตอมของธาตุ แต่ละชนิดมีลักษณะเฉพาะของเอกซ์เรย์ที่ปล่อยออก โดยการตรวจวัดเอกซ์เรย์โดยวิธีการทางอิเล็กทรอนิกส์จะสามารถบอกถึงชนิดและปริมาณของธาตุที่อยู่ในสารตัวอย่างนั้นๆ ดังจะแสดงในผลการทดลองต่อไป [5]



รูปที่ 2.5 แสดงปรากฏการณ์ต่างๆที่เกิดขึ้นของวิธีการวิเคราะห์แบบ SEM

2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน (TEM)

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบทะลุผ่าน เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาค (microstructure) และผลึกศาสตร์ (crystallography) TEM ประกอบด้วยปืนอิเล็กตรอนเช่นเดียวกับ SEM แต่ปืนอิเล็กตรอนของ TEM นั้นใช้ศักย์ไฟฟ้าในการเร่งอิเล็กตรอนสูงกว่ามาก โดยอิเล็กตรอนจะถูกเร่งด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้า 100 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ถึง 1 เมกะอิเล็กตรอนโวลต์ หลักการทำงานของ TEM จะอาศัยหลักการทะลุผ่านของอิเล็กตรอน เพราะฉะนั้นตัวอย่างชิ้นงานจะต้องมีความบางน้อยกว่า 0.5 ไมโครเมตร แต่ถ้าต้องการกำลังแยกสูง (high resolution) ชิ้นงานจะต้องบางกว่า 0.3 ไมโครเมตร สำหรับเทคนิคการเตรียมชิ้นงานนั้นจะกล่าวต่อไปในหัวข้อการทดลองและวิเคราะห์ในบทที่ 5 โดยที่ลำอิเล็กตรอนที่ยิงลงไปในตัวอย่างจะทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่างหรือเกิดการเลี้ยวเบน (diffraction) โดยคลื่นอิเล็กตรอนที่ทะลุผ่านชิ้นงานตัวอย่างจะเป็นไปตามความสัมพันธ์ของสมการเดอบรอยส์ [6]

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \qquad (2.8)$$

โดยความเร็วของอิเล็กตรอนเกิดจากความต่างศักย์ V ที่ใช้ในระบบสุญญากาศ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนเท่ากับพลังงานศักย์ที่เร่งอิเล็กตรอนจะได้

$$\frac{1}{2}mv^2 = qV \qquad (2.9)$$

ให้ $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ และคูณ m ทางด้านขวามือทั้งบนและล่างจะได้ $E_k = \frac{p^2}{2m}$ ได้ $p = \sqrt{2mE_k}$ แทนค่าลงในสมการ (2.8)

ได้

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mqE_k}} \qquad (2.10)$$

นำสมการ (2.9) ที่เขียนแทนพลังงานจลน์ไปแทนค่าใน (2.10)

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mqV}} \qquad (2.11)$$

โดยค่าต่างๆ ในสมการข้างต้นคือ

h คือค่าคงที่ของพลังค์ (6.62×10^{-34} J s)

q คือประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)

m คือมวลของอิเล็กตรอน (9.1×10^{-31} kg)

V คือศักย์ไฟฟ้าเร่งประจุอิเล็กตรอน

λ คือความยาวคลื่นของอิเล็กตรอน

โดยการแทนค่าคงที่ต่างๆลงในสมการ (2.11) ความยาวคลื่นอิเล็กตรอนแปรตามความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เร่งดังนี้

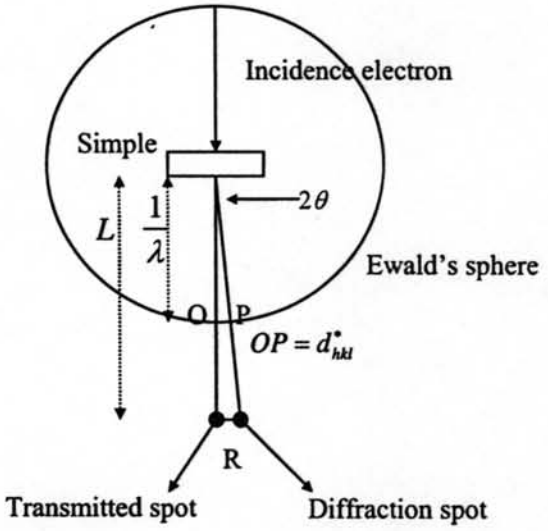
$$\lambda = \sqrt{\frac{150}{V}} \qquad (2.12)$$

ในสมการ (2.12) λ มีหน่วยเป็นอังสตรอม (A°) และ V มีหน่วยเป็นอิเล็กตรอนโวลต์

2.7 เทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอน (Electron diffraction)

เทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนเป็นวิธีหนึ่งที่ใช้ในการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุ โดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนจะอาศัยศักย์ไฟฟ้าในการเร่งอิเล็กตรอนในช่วงแรงดัน 100-400 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ ดังนั้นลักษณะทางกายภาพของการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนใน TEM จะมีลักษณะพิเศษ 2 ประการ [4]

1. มุมเลี้ยวเบน 2θ เป็นมุมเล็กๆ ประมาณ 3-4 องศาเท่านั้น
2. บริเวณที่เกิดการเลี้ยวเบน ซึ่งทรงกลมเอวาลด์ (Ewald's sphere) แตะกับจุดแลตทิซส่วนกลับ (reciprocal lattice) นั้น พื้นผิวของทรงกลมจะมีลักษณะเกือบแบนราบ[5]



รูปที่ 2.6 แสดงแบบจำลองการเลี้ยวเบนของอิเล็กตรอนใน TEM

สมการการคำนวณหาระนาบผลึกจากการเลี้ยวเบนอิเล็กตรอน

$$\frac{R}{d^*} = -\frac{L}{(1/\lambda)} \qquad (2.13)$$

$$\left|d^*\right| = \frac{1}{d} \qquad (2.14)$$

$$\lambda L = Rd \qquad (2.15)$$

โดยค่าต่างๆ ข้างต้นคือ

λL คือค่าคงที่ของกล้อง

λ คือความยาวคลื่นอิเล็กตรอนขึ้นกับค่าศักย์ไฟฟ้า

L คือระยะห่างระหว่างชิ้นงานกับจุดที่เกิดการเลี้ยวเบนตกกระทบลงบนฉาก

R คือระยะห่างระหว่าง จุดที่อิเล็กตรอนทะลุผ่านกับจุดที่อิเล็กตรอนเกิดการเลี้ยวเบน

d คือระยะห่างระหว่างระนาบผลึก

โดยแต่ละสัญลักษณ์คือ

CB คือแถบการนำ (conduction band)

VB คือแถบวาเลนซ์ (valance band)

k คือเวกเตอร์คลื่น

คลื่นแสงประกอบด้วยพลังงานสองส่วนคือสนามไฟฟ้าและแม่เหล็ก เขียนแต่ละองค์ประกอบได้ดังนี้ [8]

$$\vec{E} = E_0 \exp\left(i\left(\vec{K}\cdot\vec{r} - \omega t\right)\right) \tag{3.1}$$

$$\vec{H} = H_0 \exp\left(i\left(\vec{K}\cdot\vec{r} - \omega t\right)\right) \tag{3.2}$$

โดย

$\vec{E}$ คือสนามไฟฟ้าที่มีแอมพลิจูด E_0

$\vec{H}$ คือสนามแม่เหล็กที่มีแอมพลิจูด H_0

$\vec{K}$ คือเวกเตอร์คลื่น

ω คือความเร็วเชิงมุม

t คือเวลา

เพื่อความง่ายในการอธิบายผลให้ถือว่าใช้คลื่นแสงเป็นระนาบคลื่นเอกพันธ์และให้สมบัติแม่เหล็กของสาร $\mu = 1$ จะได้ความสัมพันธ์ที่จำเป็นสำหรับสมการ (3.1) คือ [8]

$$-K = -\varepsilon\frac{\omega^2}{c^2} - \frac{i4\pi\sigma\omega}{c^2} \tag{3.3}$$

n คือดัชนีหักเห

c คือความเร็วแสง

ε คือค่าคงที่ไดอิเล็กตริก

σ คือสภาพนำไฟฟ้า