

บทที่ 4

วิธีการวิเคราะห์สารกึ่งตัวนำ

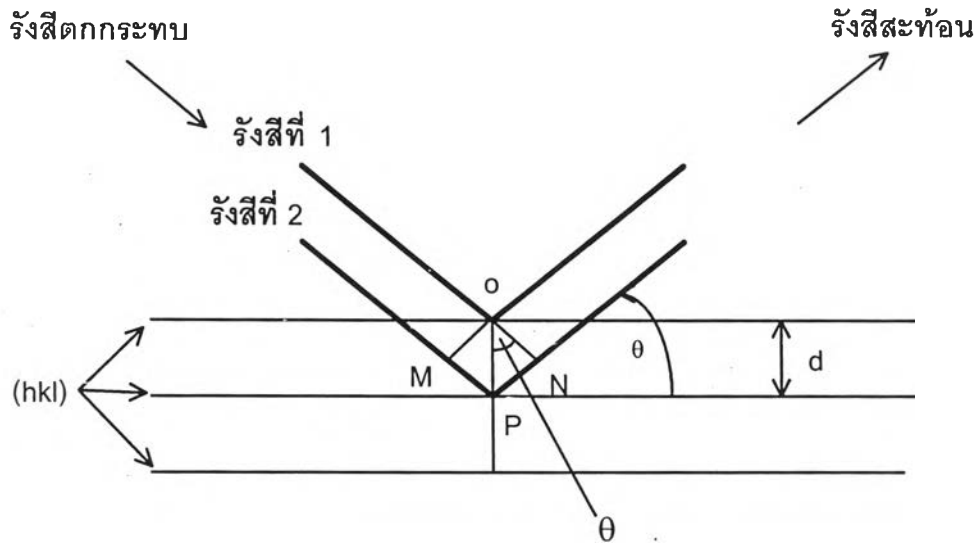
เมื่อเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ (CIGS) บนแผ่นวัสดุรองรับด้วยวิธี Bi-layer process ดังที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้แล้ว ขั้นตอนต่อไปจะศึกษาสมบัติต่างๆของฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาด้วยวิธีต่างๆ ได้แก่ การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เพื่อศึกษาโครงสร้างผลึก การใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนเพื่อศึกษาลักษณะผิวหน้าของฟิล์มบางและใช้หาสัดส่วนอะตอมของธาตุ Cu, In, Ga และ Se ด้วยวิธี EDS (Energy-Dispersive X-Ray Spectrometer), การตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบางด้วยวิธีขั้วความร้อน และนำฟิล์มบาง CIGS ไปเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีโครงสร้าง SLG/Mo/CIGS/CdS/i-ZnO/ZnO/Au (หรือ Ni/Al) เพื่อวัดสมบัติการนำไฟฟ้า รายละเอียดต่างๆ มีดังนี้

4.1 การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (X-ray diffraction)

การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์เป็นวิธีที่ใช้ศึกษาโครงสร้างผลึกของฟิล์มบาง CIGS ทำให้เราทราบว่าฟิล์มบางที่เตรียมได้นั้นมีค่าคงที่แลตติซ (Lattice constant : $a, c, c/a$) เท่าไหร่ และมีระนาบ (hkl) อะไรบ้างที่อยู่ในฟิล์มบางซึ่งข้อมูลทั้งหมดนี้จะแสดงอยู่ในลวดลายการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ที่ได้จากการทดลองด้วยเครื่องมือ Diffractometer

รังสีเอกซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีพลังงานสูงและมีความยาวคลื่นระหว่าง $0.5-2.5 \text{ \AA}$ รังสีเอกซ์เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งในสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูงมากวิ่งชนเป้าซึ่งทำด้วยโลหะหนัก เช่น ทองแดง ผลของการชนก่อให้เกิดรังสีเอกซ์ 2 ชนิด คือ รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray) กับรังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray) รังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงคลื่น คือ เกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) เมื่อผ่านช่องว่างระหว่างอะตอมในผลึกและหลังจากคลื่นผ่านโครงสร้างผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอด (Interference) ทั้งแบบเสริมและแบบหักล้างกัน ถ้าหากพิจารณาเฉพาะบริเวณที่รังสีเอกซ์ตกกระทบอะตอม รังสีเอกซ์จะแสดงสมบัติเชิงอนุภาค คือ กระเจิงออกทุกทิศทาง

แบรกก์ (Bragg) ซึ่งเป็นนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษได้ตั้งกฎการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ไว้ว่า รังสีเอกซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความยาวคลื่นที่แตกต่างกันเป็นจำนวนเท่าของความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ เรียกกฎนี้ว่า กฎของแบรกก์ (Bragg's Law)



รูปที่ 4.1 แสดงการเลี้ยวเบนและทางเดินของรังสีเอกซ์ตามเงื่อนไขของแบรกก์ ^[21]

พิจารณารูปที่ 4.1 รังสีเอกซ์ที่ 1 ร่วมเฟส (in phase) กันกับรังสีเอกซ์ที่ 2 แต่รังสีที่ 2 มีทางเดินรังสียาวกว่าทางเดินของรังสีที่ 1 เป็นระยะทาง $MP+PN$ จากกฎของแบรกก์ผลต่างทางเดินนี้ต้องมีค่าเท่ากับ $n\lambda$ โดยที่ n หมายถึง จำนวนเท่า และ λ คือความยาวคลื่น นอกจากนั้นจะเห็นว่าระยะ MP และ PN ต่างมีค่าเท่ากับ $d \cdot \sin \theta$ ดังนั้น จะได้

$$n\lambda = 2d \cdot \sin \theta \quad (4.1)$$

เมื่อ d คือ ระยะระหว่างระนาบ

θ คือ มุมสะท้อนจากระนาบแบรกก์ของรังสีเอกซ์ซึ่งจะเท่ากับมุมตกกระทบ

n คือ อันดับการเลี้ยวเบน มีค่าตั้งแต่ 1,2,3,.....

เครื่องมือที่ใช้สำหรับการทดลองการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ เรียกว่า Diffractometer ซึ่งใช้รังสีเอกซ์ความยาวคลื่นเดียวเท่ากับ 1.5405 \AA ที่ได้จากทองแดง ($\text{Cu} - K\alpha$) ตกกระทบลงบนตัวอย่างซึ่งเป็นฟิล์มบาง ทำให้ผลึกต่างๆ ของฟิล์มบางมีการวางตัวแบบสุ่ม (Random) ระนาบต่างๆ ในผลึกไม่ได้ออกให้เกิดการเลี้ยวเบนเสมอไป ระนาบใดที่รังสีเอกซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาอย่างสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ เรียกว่า ระนาบแบรกก์ (Bragg plane) และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบน (Diffraction angle) ซึ่งมีค่าเป็น 2 เท่า ของมุมสะท้อน จากนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์ (Intensity) ที่เลี้ยวเบนและมุมเลี้ยวเบนต่างๆ จะถูกตรวจหาด้วย Diffractometer และนำค่าทั้งสองที่บันทึกไว้ไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกของฟิล์มบางต่อไป กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มและมุม

เลี้ยวเบนที่ได้ เรียกว่า ลวดลายการเลี้ยวเบน (Diffraction pattern) ซึ่งจะไม่มีการซ้ำกันเลยสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน

จากการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ที่ระนาบต่างๆ ในผลึก เมื่อใดที่รังสีเอกซ์เลี้ยวเบนแล้วแทรกสอดกันแบบเสริม ความเข้มรังสีเอกซ์ก็จะมีค่ามากซึ่งจะสังเกตได้จากยอด (Peak) ในลวดลายการเลี้ยวเบน และยอดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมเสมอสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน

จากสมการ (4.1) เมื่อ $n=1$ จะได้ว่า $\lambda = 2d \cdot \sin \theta$ ในกรณีอย่างง่าย เมื่อพิจารณาผลึกที่มีโครงสร้างแบบ *Cubic* เราจะได้ความสัมพันธ์ของแบรกก์ดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2 + l^2}{a^2} \quad (4.2)$$

สำหรับฟิล์มบาง CIGS นั้นเป็นสารประกอบเชิงสาม (Ternary compounds) ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม I – III – VI₂ มีโครงสร้างแบบซาลโคไพไรต์ (Chalcopyrite structure) ซึ่งจัดอยู่ในระบบ *Tetragonal* ($a = b \neq c, \alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$) จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2} = \frac{h^2 + k^2}{a^2} + \frac{l^2}{c^2} \quad (4.3)$$

เมื่อเรานำฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นมาไปวัดด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์จะได้ข้อมูลของ มุมต่างๆ ของระนาบในผลึกที่เกิดการเลี้ยวเบนซึ่งจะแสดงออกมาในรูปของยอด จากนั้นนำค่ามุมของระนาบที่ได้มาคำนวณหาค่าคงที่แลตติซ (a และ c) ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด (Least square fit method) ดังนี้ จากสมการ (4.3) เราให้ $D = \frac{1}{d^2}; A = \frac{1}{a^2}; C = \frac{1}{c^2}$ จะได้ว่า

$$\sum_i D_i = \left(\sum_i h_i^2 + \sum_i k_i^2 \right) A + \sum_i l_i^2 C \quad (4.4)$$

i คือ จำนวนยอดในลวดลายการเลี้ยวเบน

สามารถเขียนในรูปของเมตริกซ์ได้ ดังนี้

$$\begin{bmatrix} (h_1^2 + k_1^2) l_1^2 \\ (h_2^2 + k_2^2) l_2^2 \\ \bullet \\ \bullet \\ (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ \bullet \\ \bullet \\ D_i \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

คูณทั้งสองข้างของสมการ (4.5) ด้วยเมตริกซ์ $\begin{bmatrix} (h_1^2 + k_1^2) & (h_2^2 + k_2^2) & \bullet & \bullet & (h_i^2 + k_i^2) \\ l_1^2 & l_2^2 & \bullet & \bullet & l_i^2 \end{bmatrix}$

และทำการแก้สมการเมตริกซ์ สุดท้ายแล้วจะได้

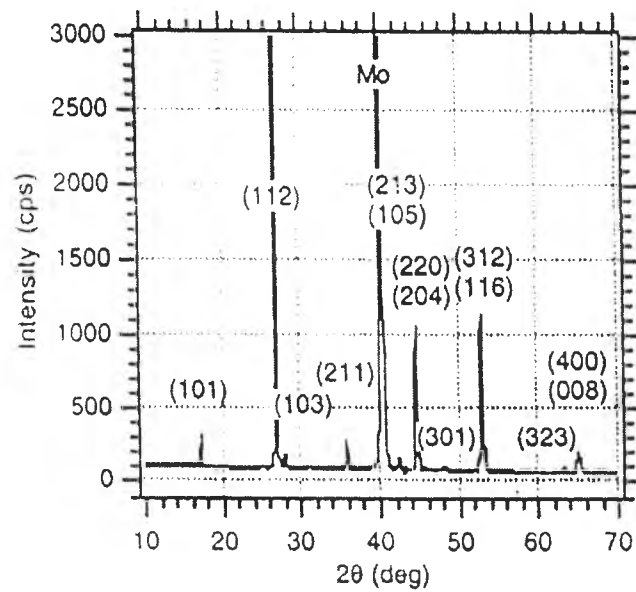
$$\begin{bmatrix} \sum_i (h_i^2 + k_i^2)^2 & \sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \\ \sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 & \sum_i (l_i^2)^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_i (h_i^2 + k_i^2) D_i \\ \sum_i l_i^2 D_i \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

จาก $A = \frac{1}{a^2}$; $C = \frac{1}{c^2}$; $D = \frac{1}{d^2} = \frac{4 \sin^2 \theta}{\lambda^2}$ และเมื่อแก้สมการ (4.6) แล้ว จะได้

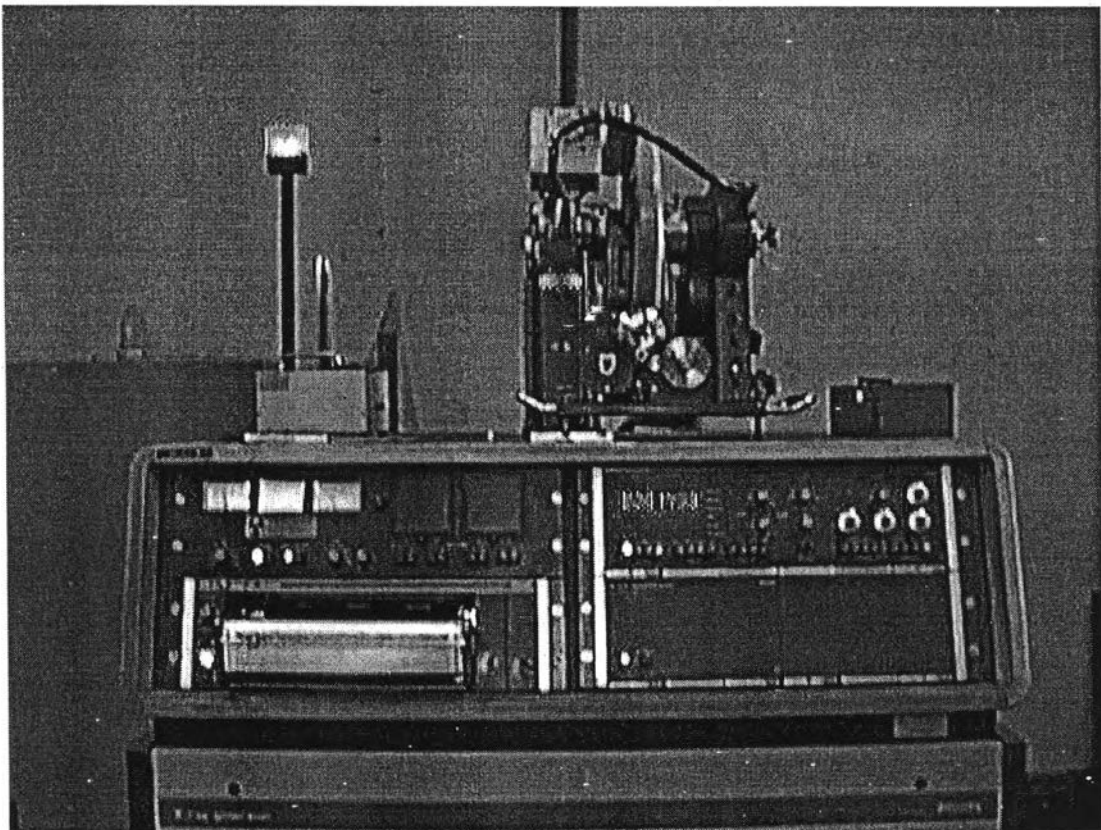
$$\frac{1}{c^2} = \frac{\left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \right] \cdot \left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2) \frac{1}{d_i^2} \right] - \left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2)^2 \right] \cdot \left[\sum_i l_i^2 \frac{1}{d_i^2} \right]}{\left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \right]^2 - \left[\sum_i (l_i^2)^2 \right] \cdot \left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2)^2 \right]} \quad (4.7)$$

$$\frac{1}{a^2} = \frac{\left[\sum_i (l_i^2)^2 \right] \cdot \left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2) \frac{1}{d_i^2} \right] - \left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \right] \cdot \left[\sum_i l_i^2 \frac{1}{d_i^2} \right]}{\left[\sum_i (l_i^2)^2 \right] \cdot \left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2)^2 \right] - \left[\sum_i (h_i^2 + k_i^2) l_i^2 \right]^2} \quad (4.8)$$

แสดงตัวอย่าง ลวดลายการเลี้ยวเบนของฟิล์มบาง CIGS



รูปที่ 4.2 แสดงลวดลายการเลี้ยวเบนของฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ [1]



รูปที่ 4.3 แสดงเครื่อง Diffractometer ที่ใช้ในการวัดรังสีเอกซ์ของฟิล์มบาง CIGS

(จากภาควิชา ธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย)

4.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (Scanning Electron Microscopy ,SEM)

เราจะใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนในการศึกษาลักษณะผิวหน้า (Surface morphology) ของฟิล์มบาง CIGS และหาสัดส่วนอะตอมของ Cu,In,Ga และ Se ในฟิล์มบาง CIGS ซึ่งเรียกว่าวิธี Energy-Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS) จะทำให้เราทราบค่าอัตราส่วน Cu/(In+Ga) และ Ga/(In+Ga) ของฟิล์มบาง CIGS ที่เราเตรียมขึ้นมา

4.2.1 หลักการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (SEM) ^[22,23]

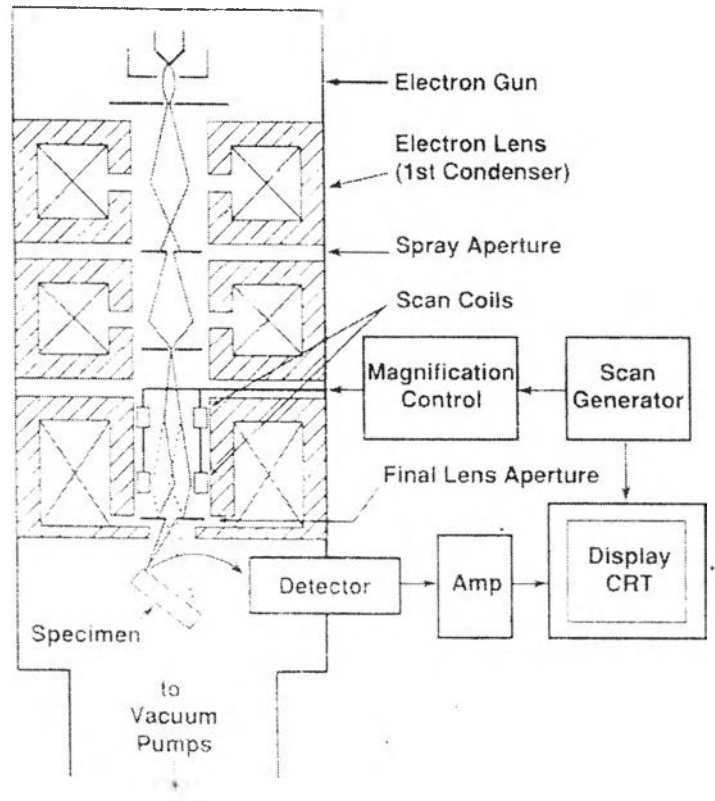
พิจารณา รูปที่ 4.4 สามารถอธิบายการทำงานของกล้อง SEM ได้อย่างง่าย ๆ ดังนี้ แหล่งกำเนิดของอิเล็กตรอน (Electron gun) ซึ่งเป็นขั้วแคโทด มีอยู่ 3 ชนิด คือ ทั้งสแตน Lanthanum Hexaboride (LaB_6) และ Field emission จะทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนจาก Filament ดังกล่าว และเร่งกลุ่มอิเล็กตรอนด้วยสนามไฟฟ้าในช่วง 1-40 kV (ใช้งานจริง 20 kV) และกลุ่มอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะถูกบีบให้เป็นลำอิเล็กตรอนโดย Condenser lens และปรับโฟกัสโดย Objective lens และถ้าต้องการให้ลำอิเล็กตรอนกวาดไปทั่วผิวของตัวอย่างก็สามารถควบคุมได้โดยใช้ Scanning coils ซึ่งจะกวาดบนระนาบ x-y ทำให้เกิดสัญญาณ (Signal) ขึ้นมา แล้วหัววัด (Detector) จะวัดสัญญาณที่เกิดขึ้นและถูกแปลงเป็นข้อมูลที่เราต้องการโดยชุดระบบทางอิเล็กทรอนิกส์

เมื่อลำอิเล็กตรอนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนโฟกัสลงบนผิวของตัวอย่าง จะทำให้เกิดอันตรกิริยากันระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมาและอะตอมของตัวอย่าง ผลของอันตรกิริยาดังกล่าวเราสามารถนำมาใช้ศึกษา ลักษณะผิวหน้าและหาสัดส่วนอะตอมของตัวอย่างซึ่งเป็นฟิล์มบาง CIGS ได้

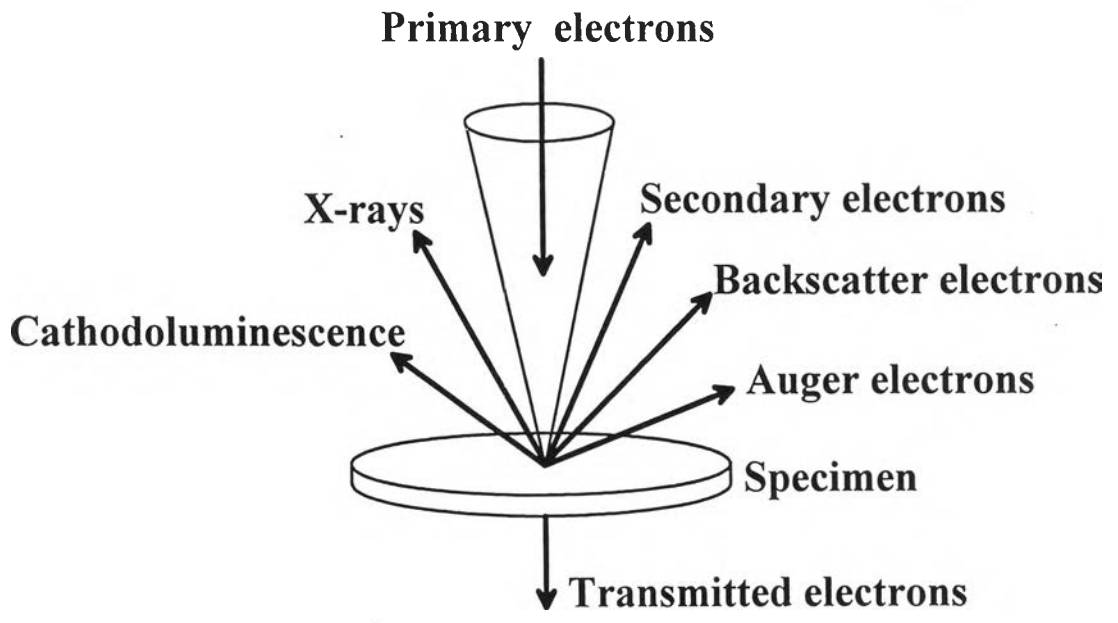
อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนที่ถูกยิงลงมากับอะตอมของตัวอย่าง สามารถแบ่งได้ 2 แบบ ตามลักษณะการชน คือ แบบยืดหยุ่น (Elastic) และแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic) ซึ่งทั้งสองลักษณะจะให้สัญญาณ (Signal) ที่จะนำมาใช้งานนั้นแตกต่างกัน

1) การชนแบบยืดหยุ่น (Elastic scattering)

เมื่อกลุ่มอิเล็กตรอนจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งเป็นอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) ตกกระทบลงบนตัวอย่างทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิกระเจิงออกมาและมีการสูญเสียพลังงานบางส่วนซึ่งน้อยมากให้กับอะตอมของตัวอย่าง อิเล็กตรอนที่กระเจิงออกมาเราเรียกว่า Backscatter electron ซึ่งสามารถนำสัญญาณดังกล่าวมาสร้างเป็นสัญญาณภาพบนจอ CRT ได้



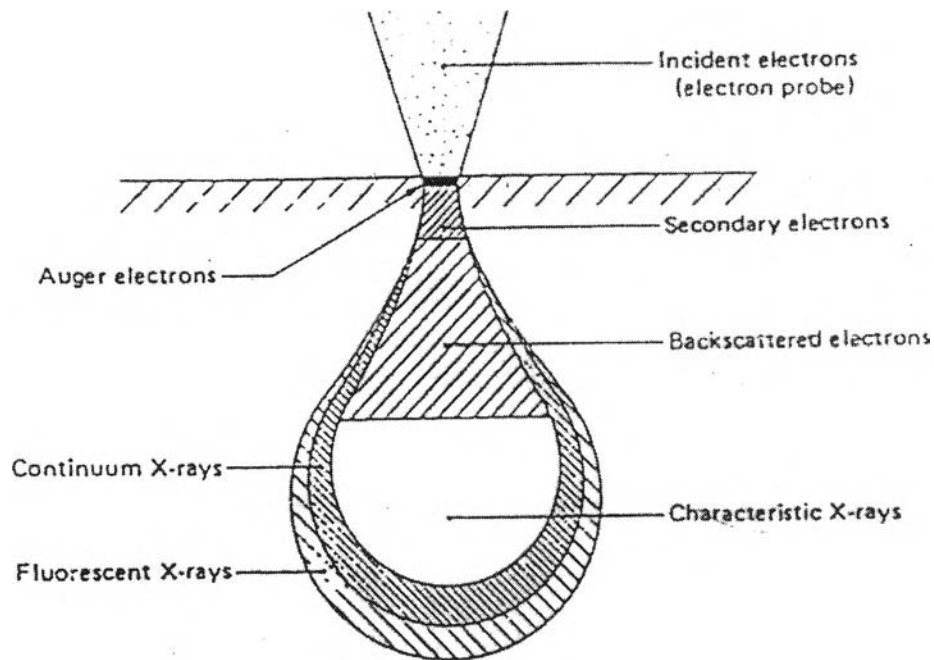
รูปที่ 4.4 แสดงโครงสร้างของกล้อง SEM (Scanning Electron Microscope) ^[23]



รูปที่ 4.5 แสดงผลที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมของตัวอย่าง ^[23]

2) การชนแบบไม่ยืดหยุ่น (Inelastic scattering)

กลุ่มของอิเล็กตรอนปฐมภูมิเมื่อชนกับอะตอมของตัวอย่างแล้ว จะเกิดการถ่ายเทพลังงาน จลน์และเกิดอันตรกิริยากันกับอะตอมของตัวอย่างทำให้เกิดสัญญาณต่างๆ ซึ่งเป็นสัญญาณที่ Detector สามารถวัดได้ ได้แก่ อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electrons) , Auger electrons, Characteristics X-ray, Continuum X-ray และ Fluorescence X-ray เป็นต้น



รูปที่ 4.6 แสดงปรากฏการณ์ต่างๆ จากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนปฐมภูมิกับอะตอมตัวอย่าง^[23]

อิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นโคจร (Shell) ต่างๆของอะตอมตัวอย่าง ถ้าพลังงานที่ให้มากกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร กับนิวเคลียสของอะตอมตัวอย่าง จะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรหลุดออกมา เราเรียกอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาว่า **อิเล็กตรอนทุติยภูมิ** ซึ่งสามารถนำไปใช้ศึกษาคุณลักษณะผิวหน้าของตัวอย่างได้

รังสีเอกซ์ (X-ray) สามารถแบ่งตามลักษณะการเกิดได้เป็น 2 ลักษณะ คือ

-**รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous X-ray)** เกิดจากอิเล็กตรอนปฐมภูมิเกิดอันตรกิริยากับอะตอมของตัวอย่างที่บริเวณสนามคูลอมบ์ใกล้กับนิวเคลียส ทำให้อิเล็กตรอนปฐมภูมิเปลี่ยนทิศทางและเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ดังรูปที่ 4.7 ซึ่งก็คือ รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง นั่นเอง มีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$E_B - E_A = \Delta E = h\nu \quad (4.9)$$

โดยที่ E_B คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิก่อนเกิดอันตรกิริยา (eV)

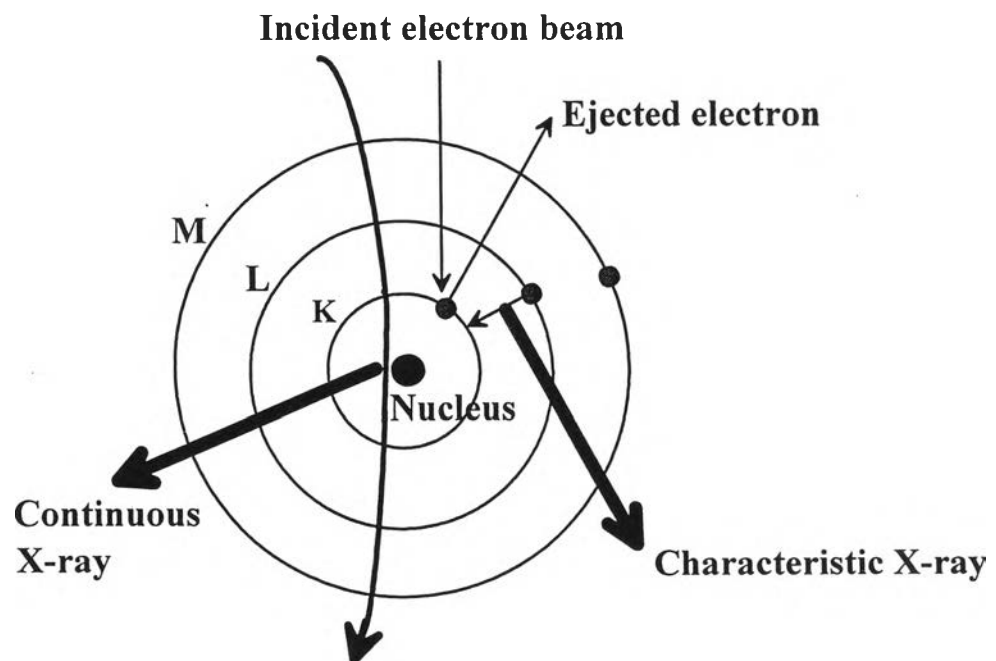
E_A คือ พลังงานของอิเล็กตรอนปฐมภูมิหลังเกิดอันตรกิริยา (eV)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ เท่ากับ 4.14×10^{-15} (eV · s)

ν คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์ (Hz)

-**รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ (Characteristic X-ray)** อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นโคจรใดๆ ถ้าอิเล็กตรอนในชั้นโคจรใดๆ ได้รับพลังงานซึ่งมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอิเล็กตรอนกับนิวเคลียสจะทำให้อิเล็กตรอนในชั้นโคจรนั้นหลุดออกไปและเกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ในชั้นถัดไปซึ่งมีพลังงานสูงกว่าจะเกิดการคายพลังงานและเข้ามาแทนที่ในตำแหน่งที่ว่างนั้น พลังงานที่คายออกมานั้น ก็คือรังสีเอกซ์นั่นเอง เราเรียกว่า รังสีเอกซ์เฉพาะธาตุ ดูรูปที่ 4.7

เนื่องจากระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรของแต่ละธาตุมีค่าไม่เท่ากัน ทำให้สามารถนำความแตกต่างของระดับพลังงานเป็นตัวจำแนกชนิดของธาตุที่มีอยู่ในอะตอมของตัวอย่างได้ เราเรียกว่า การวิเคราะห์เชิงคุณภาพ (Qualitative analysis) ส่วนความเข้มของรังสีเอกซ์สามารถนำมาใช้วิเคราะห์หาปริมาณของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างได้ เรียกว่า การวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Quantitative analysis)



รูปที่ 4.7 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์

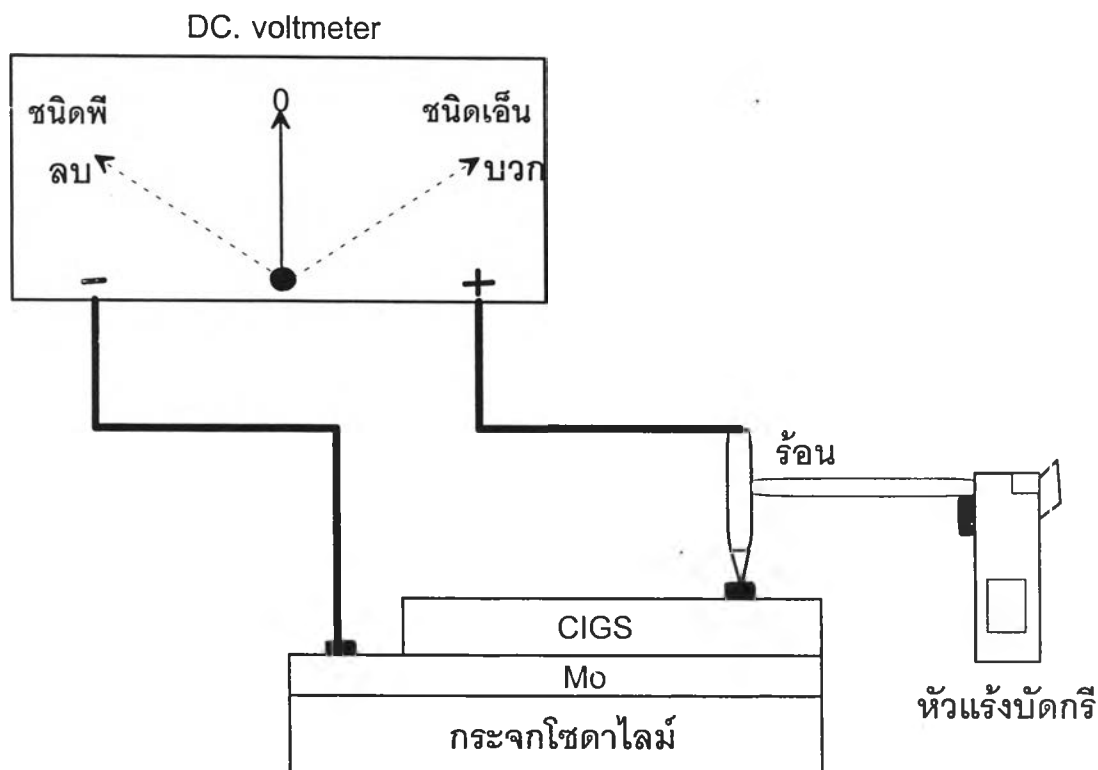
4.2.2 Energy-Dispersive X-Ray Spectrometer (EDS)

EDS เป็นวิธีการที่ใช้วิเคราะห์หาปริมาณของธาตุที่อยู่ในตัวอย่าง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์เชิงปริมาณ โดยนำข้อมูลโฟตอนรังสีเอกซ์ของตัวอย่างซึ่งถูกวัดโดยหัววัด ในหน่วยของจำนวนนับต่อวินาที (Count per second) ที่ระดับพลังงานต่างๆ (ซึ่งข้อมูลที่วัดได้จะอยู่ในรูปของยอด (Peak)) มาทำการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของยอดที่เราสนใจ โดยที่แต่ละยอดที่ทำการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟนั้นก็คือปริมาณของธาตุที่อยู่ในตัวอย่างนั่นเอง ตัวอย่างของเราก็คือ Cu(In,Ga)Se_2 (CIGS) เราสามารถหาปริมาณของ Cu, In, Ga และ Se ในสารกึ่งตัวนำชนิดฟิล์มบาง CIGS ได้ด้วยวิธี EDS ซึ่งมีวิธีการดังต่อไปนี้

ทำการปลูกผลึก $\text{Cu(In}_{0.8}\text{Ga}_{0.2}\text{)Se}_2$ ที่มีสัดส่วนสม่ำเสมอเพื่อใช้เป็นสารมาตรฐานสำหรับการวิเคราะห์เปรียบเทียบหาสัดส่วนของฟิล์มบาง CIGS ซึ่งผลึกที่เตรียมขึ้นมาได้ มีอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอม Cu : In : Ga : Se เป็น 25 : 20 : 5 : 50 ได้อัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} = 1.0$ และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}} = 0.2$ ^[4] จากนั้นนำผลึกที่เตรียมขึ้นมาได้ไปวัดโฟตอนรังสีเอกซ์และทำการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของยอดต่างๆ ที่เราสนใจ คือ Cu-K line, In-L line, Ga-K line และ Se-K line ซึ่งเป็นแบบมาตรฐานสากล เราจะใช้พื้นที่ใต้กราฟของยอดที่คำนวณได้นี้เทียบกับอัตราส่วนเปอร์เซ็นต์อะตอมของ Cu, In, Ga และ Se (25 : 20 : 5 : 50) เพื่อคำนวณหาปริมาณของ Cu, In, Ga และ Se ในฟิล์มบาง CIGS สำหรับวิธีการคำนวณหาพื้นที่ใต้กราฟของยอดจากการวัดโฟตอนรังสีเอกซ์และรายละเอียดเกี่ยวกับการคำนวณหาปริมาณของธาตุในฟิล์มบาง CIGS จะได้กล่าวถึงในบทต่อไป

4.3 การวัดด้วยวิธีชั่วคราวร้อน (Hot probe measurement)

การวัดด้วยวิธีชั่วคราวร้อนเป็นการวัดเพื่อที่จะตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ว่ามีการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี (p-type) หรือเป็นแบบเอ็น (n-type) ซึ่งมีขั้นตอนง่ายๆ ดังนี้ คือ นำฟิล์มบาง CIGS ที่ได้เตรียมลงบนกระจกเคลือบด้วยโมลิบดีนัม (Soda Lime Glass/Mo/CIGS) มาต่อเข้ากับ DC. voltmeter โดยที่ ชั้นของฟิล์มบาง CIGS ต่อเข้ากับขั้วบวกของ DC. voltmeter และชั้นของโมลิบดีนัมต่อเข้ากับขั้วลบของ DC. voltmeter จากนั้นใช้หัวแร้งบัดกรีจี้ไปที่ขั้วบวกโดยไม่ให้สัมผัสกับฟิล์มบางเพื่อเป็นการให้ความร้อนกับฟิล์มบาง CIGS ถ้าฟิล์มบาง CIGS เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีค่าของ DC. voltmeter จะมีค่าเป็นลบ เนื่องจากโฮลซึ่งเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายจากบริเวณที่ร้อนซึ่งเป็นขั้วบวกไปออกันอยู่ในบริเวณที่เย็นกว่าซึ่งเป็นขั้วลบ ที่ขั้วลบก็จะมีแต่โฮล ดังนั้นค่าของ DC. voltmeter จึงแสดงค่าเป็นลบ แต่ถ้าฟิล์มบาง CIGS เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ค่าของ DC. voltmeter จะมีค่าเป็นบวก เนื่องจากอิเล็กตรอนซึ่งเป็นพาหะข้างมากจะแพร่กระจายจากบริเวณที่ร้อนซึ่งเป็นขั้วบวกไปออกันอยู่ในบริเวณที่เย็นกว่าซึ่งเป็นขั้วลบ ที่ขั้วบวกก็จะมีแต่โฮล ดังนั้นค่าของ DC. voltmeter จึงแสดงค่าเป็นบวก



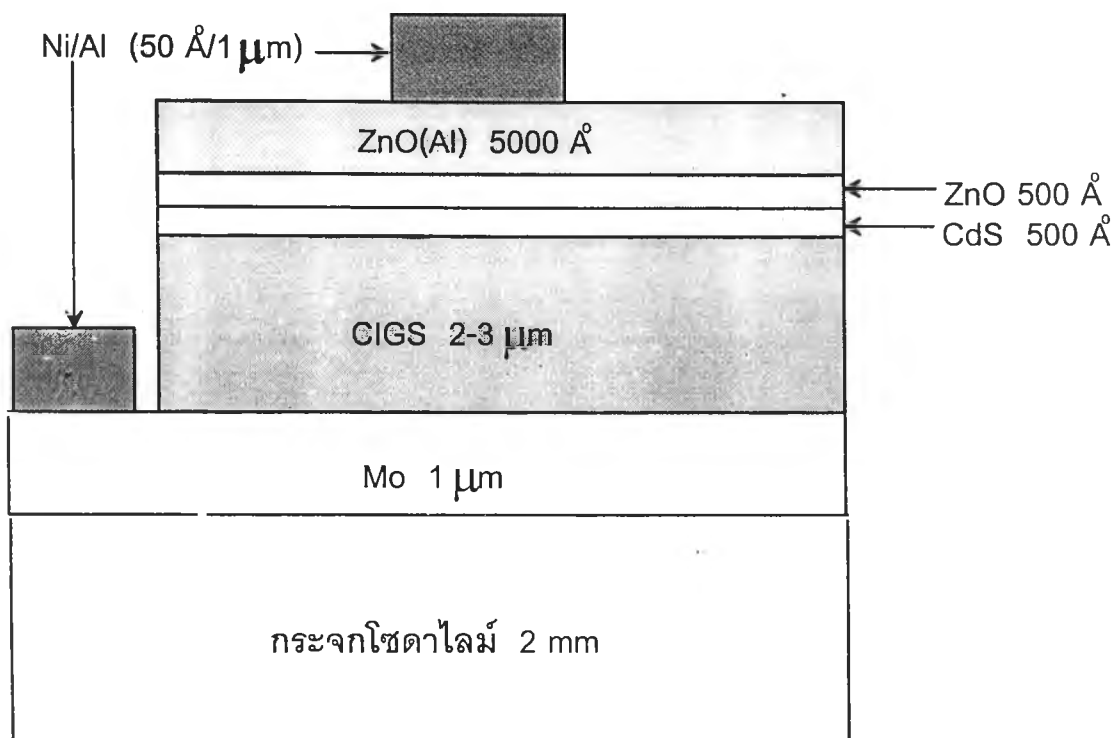
รูปที่ 4.8 แสดงการตรวจสอบชนิดการนำไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีชั่วคราว

4.4 การเตรียมเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$

การตรวจสอบสมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS สามารถตรวจสอบได้โดยนำฟิล์มบาง CIGS มาเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์และวัดลักษณะเฉพาะของกระแสไฟฟ้าและความต่างศักย์ (I-V Characteristics) จะทำให้เราทราบค่าต่างๆ ดังนี้ ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า แรงดันไฟฟ้าวงจรเปิด (Open circuit voltage) กระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short circuit current) และ ฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor)

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ (CIGS) รายงานโดย NREL มีโครงสร้างแบบ Mo/CIGS/CdS/ZnO มีข้อมูลล่าสุด ดังนี้ $\eta = 18.8\%$, $V_{oc} = 0.678 \text{ V}$, $J_{sc} = 35.22 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}$, $\text{FF} = 78.7\%$ และ $E_g = 1.12 \text{ eV}$ (พื้นที่ทั้งหมดของหนึ่งเซลล์ = 0.4387 cm^2) [4]

สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ที่ได้เตรียมขึ้นในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้มีโครงสร้าง ดังรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 แสดงโครงสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมขึ้นเอง

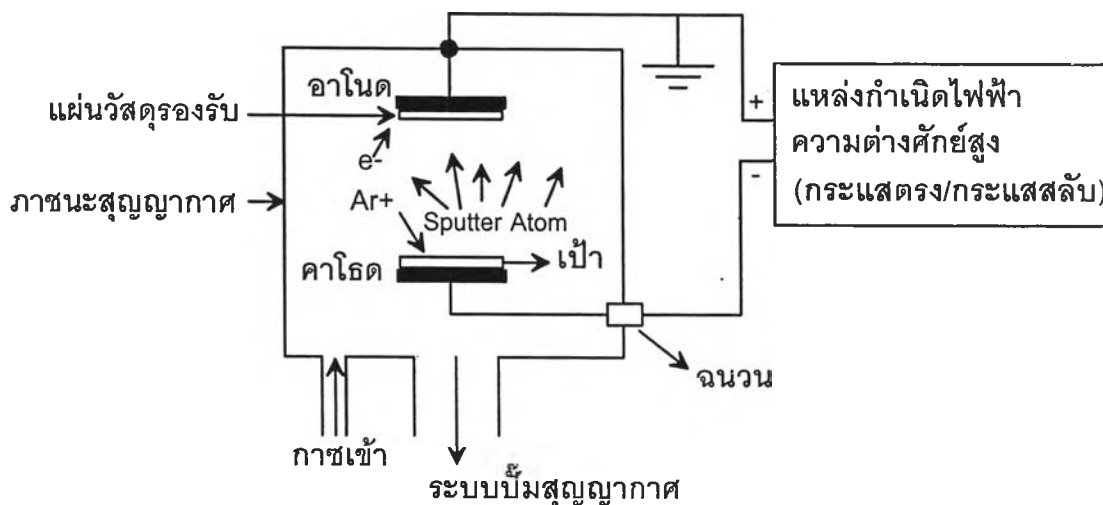
ตารางที่ 4.1 แสดงวิธีต่างๆ ในการเตรียมฟิล์มบางแต่ละชั้นของเซลล์แสงอาทิตย์

ชั้นของฟิล์มบางในเซลล์แสงอาทิตย์	วิธีการเตรียมฟิล์มบาง
โมลิบดีนัม (Mo)	ดีซีแมกนีตรอนสปัตเตอริง
คอปเปอร์อินเดียมแกลเลียมไดซัลไฟด์ (CIGS)	ระเหยร่วม
แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS)	เคลือบแบบออบสาคเคมี
ซิงค์ออกไซด์ (ZnO)	อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง
ซิงค์ออกไซด์(อะลูมิเนียม) (ZnO(AI))	อาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง
นิกเกิล/อะลูมิเนียม (Ni/Al)	ระเหย

4.4.1 สปัตเตอริง (Sputtering)

สปัตเตอริงเป็นวิธีการเคลือบฟิล์มบางวิธีหนึ่งที่ทำให้สมบัติของฟิล์มบางมีลักษณะพิเศษ คือ มีการเกาะยึดกับวัสดุรองรับดี มีการจัดโครงสร้างผลึกเฉพาะอย่างและฟิล์มบางที่ได้มีความสม่ำเสมอ การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีสปัตเตอริงมีด้วยกันอยู่ 2 วิธี โดยแยกตามลักษณะการป้อนไฟฟ้าความต่างศักย์สูง คือ แบบดีซีสปัตเตอริง เป็นการป้อนไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเข้าขั้วไฟฟ้าโดยใช้ไฟกระแสตรง และแบบ

อาร์เอฟสปีดเตอริง เป็นการป้อนไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเข้าขั้วไฟฟ้าโดยใช้ไฟกระแสสลับ แต่ถ้ามีการใส่แม่เหล็กเข้าไปในขั้วไฟฟ้าเพื่อเพิ่มอัตราการเคลือบฟิล์มบาง (สนามแม่เหล็กช่วยเพิ่มปริมาณการไอออไนซ์ของอะตอมก๊าซอาร์กอนและเพิ่มสภาพนำไฟฟ้าของ Glow discharge) เราจะเรียกวิธีการนี้ว่า แบบ ดีซี แมกนีตรอนสปีดเตอริง และแบบอาร์เอฟแมกนีตรอนสปีดเตอริง ตามลำดับ พิจารณารูปที่ 4.10



รูปที่ 4.10 แสดงระบบและกระบวนการสปีดเตอริงอย่างง่าย^[24]

จากรูป ขั้วแอโนดและขั้วคาโธด ซึ่งต่ออยู่กับแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงอยู่ในภาชนะสุญญากาศที่บรรจุก๊าซความดันต่ำ เช่น นีออน(Ne) อาร์กอน(Ar) ออกซิเจน(O_2) ออกซิเจนผสมอาร์กอน เป็นต้น เมื่อป้อนความต่างศักย์จากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูง (ถ้าป้อนความต่างศักย์แบบกระแสตรง เป้า (Target) ที่ติดอยู่บนขั้วคาโธดจะเป็นโลหะ เช่น เป้าโมลิบดีนัม และถ้าป้อนความต่างศักย์แบบกระแสสลับ เป้าที่ติดอยู่บนขั้วคาโธดจะเป็นฉนวน เช่น เป้า $ZnO(Al_2O_3)$) ขณะที่ในภาชนะสุญญากาศเต็มไปด้วยอะตอมของก๊าซอาร์กอน (เราใช้ก๊าซอาร์กอนในการ Sputtering) ที่มีความดันคงที่บริเวณระหว่างขั้วคาโธดและขั้วแอโนดจะมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น และกระแสไฟฟ้าปริมาณเล็กน้อยในวงจรซึ่งเป็นกระแสของอิเล็กตรอนปฐมภูมิ (Primary electron) จำนวนหนึ่งจะหลุดออกมาจากขั้วคาโธดด้วยการกระตุ้นของรังสีที่มีอยู่ในธรรมชาติ เช่น รังสีคอสมิก, รังสีอุลตราไวโอเล็ต เป็นต้น อิเล็กตรอนปฐมภูมินี้จะถูกเร่งโดยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด ถ้าขณะนี้ระบบอยู่ภายใต้เงื่อนไขความต่างศักย์และความดันก๊าซที่เหมาะสมแล้ว อิเล็กตรอนปฐมภูมิจะสามารถสะสมพลังงานจนได้เพียงพอที่จะไอออไนซ์อะตอมก๊าซอาร์กอนในภาชนะสุญญากาศให้แตกตัวเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ได้ ทั้งอิเล็กตรอนทุติยภูมิและอิเล็กตรอนปฐมภูมิจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนด ส่วนไอออนบวกจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วคาโธด ระหว่างเคลื่อนที่ไป ถ้าอิเล็กตรอนเหล่านี้สามารถสะสมพลังงานได้มากพอก็มีโอกาสไอออไนซ์อะตอมของก๊าซอาร์กอนเพิ่มขึ้นอีก ส่วนไอออนบวกถ้าชนกับขั้วคาโธดด้วยพลังงานจนที่

สูงพอที่จะเกิดการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิจากขั้วคาโทดและจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนดซึ่งจะทำให้อะตอมของก๊าซอาร์กอนถูกไอออไนซ์เพิ่มขึ้นอีก กระบวนการที่ต่อเนื่องทั้งหมดนี้ทำให้ประจุไฟฟ้าในระบบเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณทำให้กระแสไฟฟ้าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วโดยที่ความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองยังคงที่ เรียกสภาวะนี้ว่า การพังทลาย (Breakdown) ของก๊าซ ซึ่งจะเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใดและความต่างศักย์ขณะก๊าซพังทลายนี้ เรียกว่า ความต่างศักย์พังทลาย (Breakdown voltage) หลังจากก๊าซพังทลาย ถ้ากำลังไฟฟ้าที่ป้อนจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าความต่างศักย์สูงเพียงพอ กระบวนการไอออไนซ์อะตอมของก๊าซอาร์กอนจะมีต่อไปอย่างต่อเนื่อง จนถึงจุดที่ปริมาณไอออนบวกและอิเล็กตรอนทุติยภูมิสามารถควบคุมซึ่งกันและกันได้ กล่าวคือ ปริมาณอิเล็กตรอนทุติยภูมิที่หลุดจากขั้วคาโทดสามารถเพิ่มปริมาณไอออนบวกให้มากพอสำหรับผลิตอิเล็กตรอนทุติยภูมิจำนวนเท่าเดิม ระบบจะสามารถรักษากระบวนการไอออไนซ์ได้เองโดยไม่ต้องอาศัยอิเล็กตรอนปฐมภูมิที่เกิดจากการกระตุ้นของรังสีธรรมชาติ สภาวะที่อะตอมของก๊าซอาร์กอนอยู่ในสภาพถูกไอออไนซ์อยู่ตลอดเวลา เราเรียกว่า Glow discharge ซึ่งจะเกิดการเรืองแสงขึ้น

ในขณะที่ระบบอยู่ในสภาพ Glow discharge นี้ ถ้าไอออนบวกวิ่งไปชนเป้าจะเกิดการส่งผ่านโมเมนตัมให้กับอะตอมของผิวเป้า ไอออนบวกจะกระทบกับอะตอมของผิวเป้าสองหรือสามอะตอมเกือบพร้อมๆกัน อะตอมซึ่งถูกชนในครั้งแรกนี้ไม่ใช่อะตอมที่จะเคลื่อนที่ไปเคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับ แต่เป็นตัวการที่ทำให้อะตอมที่อยู่ใกล้เคียงหลุดจากผิวเป้าขึ้นไปเคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับ โดยการชนต่อเนื่องที่ตามมา ได้แก่ อะตอมข้างเคียงที่ติดอยู่กับอะตอมของเป้าที่ถูกไอออนบวกชนจะหลุดออกมาในแนวเฉียงด้านข้าง และสามารถกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าซึ่งอยู่รอบๆ ให้หลุดออกจากผิวเป้าได้ อะตอมของเป้าที่ถูกไอออนบวกชนและถูกถ่ายทอดโมเมนตัมในทิศพุ่งเข้าสู่เป้าเป็นส่วนใหญ่ จะเคลื่อนตัวลึกลงไปชนกับอะตอมในชั้นถัดไป ซึ่งตัวมันเองอาจจะสะท้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวเป้าให้หลุดออกมา หรือทำให้เกิดการชนต่อเนื่องไปอีกหลายๆ ชั้น จนกระทั่งทำให้มีอะตอมอื่นได้รับโมเมนตัมในทิศที่เปลี่ยนไปมากกว่า 90 องศา เมื่อเทียบกับโมเมนตัมของไอออนบวกตกกระทบ อะตอมเหล่านี้สามารถเคลื่อนที่ย้อนกลับไปกระแทกอะตอมที่ผิวให้หลุดออกในที่สุด อะตอมที่ผิวของเป่าก็จะหลุดออก ขึ้นไปเคลือบติดอยู่บน Substrate ด้วยกระบวนการที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งกระบวนการนี้เราเรียกว่า **สปัตเตอริง**

4.4.2 การเคลือบแบบอบสารเคมี (Chemical bath deposition) ^[25]

เป็นกระบวนการทางเคมีที่ใช้สารตั้งต้น คือ ไทโอยูเรีย (NH_2CSNH_2) แอมโมเนีย (NH_3) และ แคดเมียมซัลเฟต (CdSO_4) ทำปฏิกิริยากันที่อุณหภูมิที่เหมาะสม ประมาณ 60-75 องศาเซลเซียสแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS) สามารถสรุปการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดังสมการเคมี ดังนี้

$$[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+} + \text{NH}_2\text{CSNH}_2 + 2\text{OH}^- \Rightarrow \text{CdS} + 4\text{NH}_3 + \text{CH}_2\text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \quad (4.10)$$

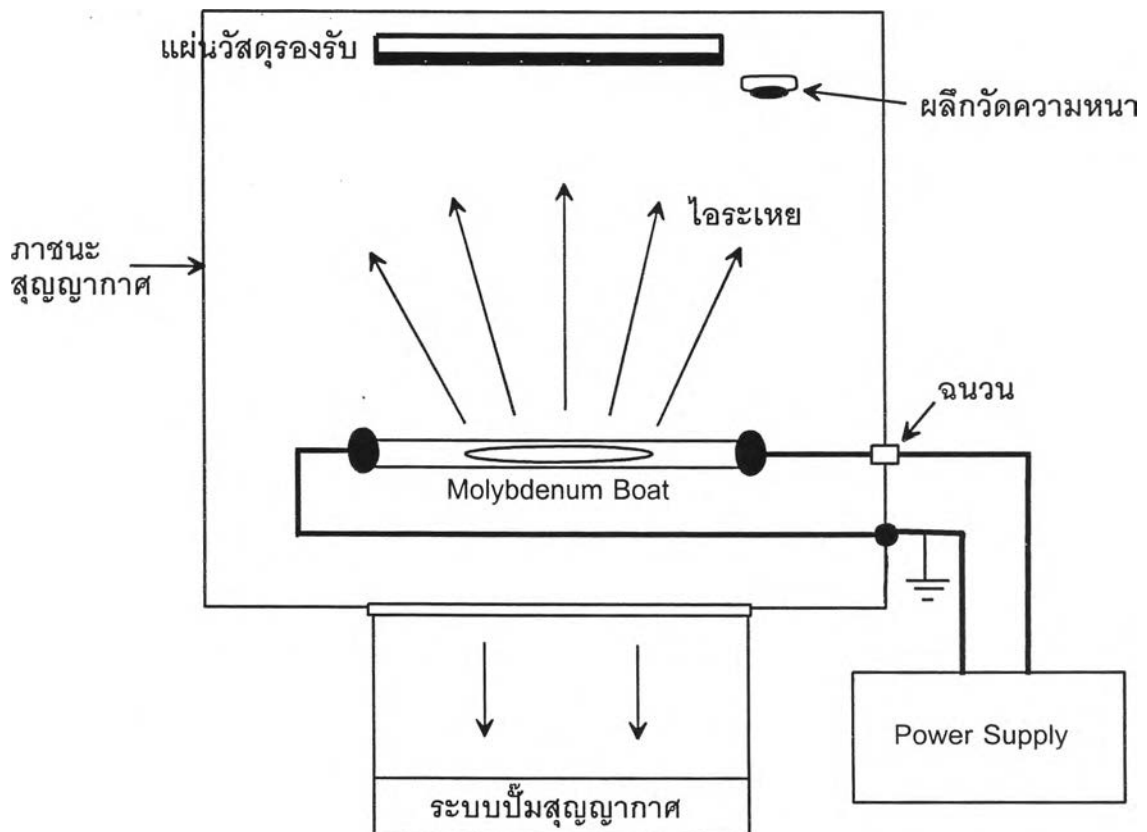
โดย $[\text{Cd}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ คือ Tetra-amminecadmium ion เกิดจากการทำปฏิกิริยากันระหว่าง Cd^{2+} ที่แตกตัวมาจากสารละลาย CdSO_4 กับสารละลาย NH_3 ที่เกินพอ

และ OH^- คือ Hydroxide ion ที่เกิดจากการแตกตัวของสารละลาย NH_3 ดังสมการ



4.4.3 การระเหย (Evaporation)

การระเหยเป็นการเตรียมฟิล์มบางในระบบสุญญากาศ โดยใช้วิธีการระเหย กล่าวคือ สารที่จะทำการระเหยจะถูกใส่ไว้ในแหล่งระเหยซึ่งมีลักษณะคล้ายกับเรือ เช่น Molybdenum boat, Boron-Nitride boat เป็นต้น จากนั้นแหล่งระเหยจะได้รับกระแสจนวนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้สารในแหล่งระเหยหลอมจนกลายเป็นของเหลวและกลายเป็นไอในที่สุด ไอที่เกิดขึ้นมาจะเคลื่อนที่ขึ้นไปเคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับ ดังรูป 4.11 วิธีการเตรียมฟิล์มบางแบบการระเหย มีวิธีการคล้ายกันกับวิธีแบบระเหยร่วมจะต่างกันก็เพียงลักษณะและจำนวนของแหล่งระเหย

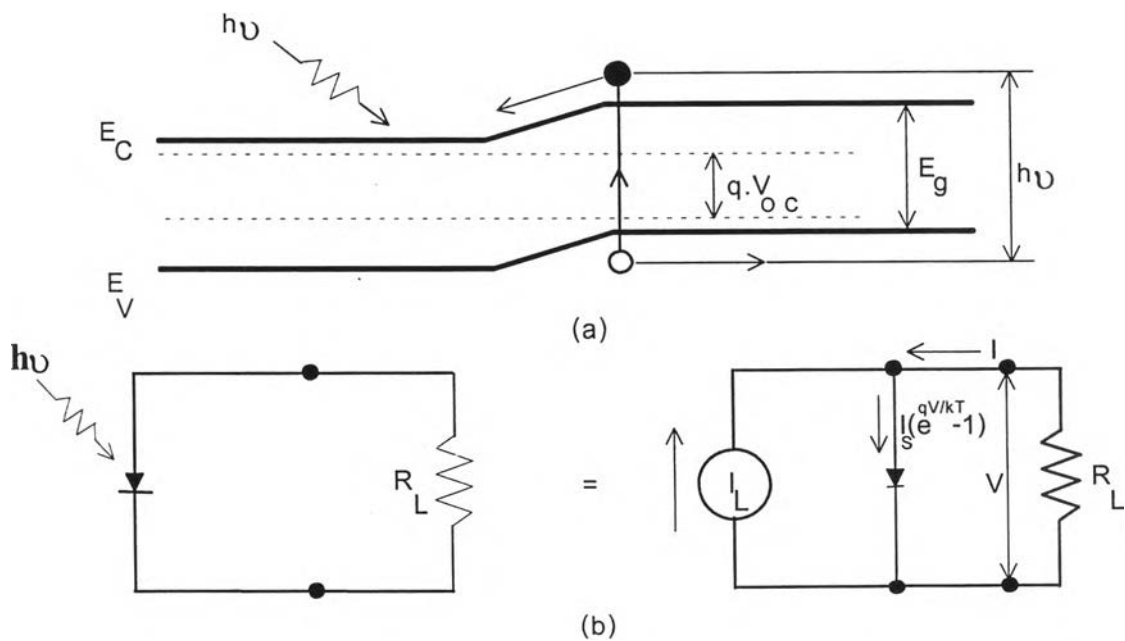


รูปที่ 4.11 แสดงวิธีการเตรียมฟิล์มบางแบบวิธีการระเหย

4.4.4 ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเชิงอุดมคติ (Ideal conversion efficiency)^[26,27]

เซลล์แสงอาทิตย์แบบพื้นฐาน เช่น เซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็น (p-n junction) มีช่องว่างพลังงานแบบเดี่ยว (Single energy gap, E_g) เมื่อเซลล์ได้รับแสงสเปกตรัม ถ้าพลังงานโฟตอนน้อยกว่า E_g จะไม่เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล แต่ถ้าพลังงานโฟตอนมากกว่า E_g จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในที่สุด ส่วนพลังงานที่มากเกินไปเกินความจำเป็นจะสูญเสียไปในรูปของพลังงานความร้อน ในการคำนวณหาประสิทธิภาพการแปลงพลังงานเชิงอุดมคติ (η) เราจะพิจารณาไดอะแกรมแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นภายใต้การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 4.12 (a) เราสมมติว่าเซลล์แสงอาทิตย์มีลักษณะในเชิงอุดมคติของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ แสดงดังรูปที่ 4.12 (b) โดยที่มีลักษณะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสที่ต่อขนานอยู่กับไดโอดแบบอุดมคติซึ่งมีรอยต่อแบบพีเอ็น ให้ I_L เป็นผลที่เกิดจากการกระตุ้นของพาหะที่มากเกินไป (Excess carriers) เมื่อได้รับพลังงานแสงอาทิตย์ I_s เป็นค่ากระแสอิ่มตัวของไดโอด (Diode saturation current) และ R_L เป็นความต้านทานของโหลด (Load resistance) ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์เขียนได้ดังนี้

$$I = I_s \left(e^{\frac{qV}{kT}} - 1 \right) - I_L \quad (4.11)$$



รูปที่ 4.12 (a) ไดอะแกรมแถบพลังงานของเซลล์แสงอาทิตย์แบบรอยต่อพีเอ็นภายใต้การแผ่รังสีจากดวงอาทิตย์^[26]

(b) วงจรสมมูลย์ของเซลล์แสงอาทิตย์แบบอุดมคติ^[26]

จากสมการที่ (4.11) เราสามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและความต่างศักย์ได้ดังรูปที่ 4.13 (a) ซึ่งเป็นกราฟในกรณีที่มีแสงตกกระทบกับตัวเซลล์ โดยที่ $I_L=100\text{mA}$, $I_s=1\text{nA}$, $A=4\text{cm}^2$ และ $T=300\text{K}$ จะได้กราฟที่มีลักษณะค่อนข้างไปทางบริเวณควอดแรนท์ที่ 4 ดังนั้นเราก็สามารถหาค่ากำลัง (Power) ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้ โดยพิจารณาจากช่วงประมาณ 80 % ของผลคูณระหว่าง I_{sc} กับ V_{oc} เมื่อ I_{sc} คือ ค่ากระแสเปิดวงจร และ V_{oc} คือ ค่าความต่างศักย์เปิดวงจรของเซลล์แสงอาทิตย์ จากรูป 4.13 บริเวณที่แรเงาแสดงถึงค่ากำลังสูงสุดแบบสี่เหลี่ยม จากความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ ทำให้สามารถเขียนกราฟได้ดังรูปที่ 4.13 (b) ซึ่งเป็นการกลับด้านแกนความต่างศักย์ เราจะนิยาม I_m และ V_m จากกราฟ ซึ่งผลคูณทั้งสองของตัวแปรก็คือ ค่ากำลังสูงสุด $P_m (=I_m V_m)$

จากสมการ (4.11) เราจะได้ค่าความต่างศักย์เปิดวงจร ($I=0$)

$$V_{oc} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_s} + 1\right) \approx \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_s}\right) \quad (4.12)$$

เมื่อพิจารณาค่า I_L ค่าความต่างศักย์เปิดวงจรจะเพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันลอการิทึม ขณะเดียวกันค่ากระแสอิ่มตัว I_s ก็ลดลง กำลังของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ส่งออกมา คือ

$$P = IV = I_s V(e^{qV/kT} - 1) - I_L V \quad (4.13)$$

ในกรณีสำหรับค่ากำลังสูงสุด สามารถหาค่าได้ เมื่อ $\frac{dP}{dV} = 0$ หรือ

$$I_m = I_s \cdot \beta \cdot V_m \cdot e^{\beta V_m} \approx I_L \left(1 - \frac{1}{\beta V_m}\right) \quad (4.14)$$

$$V_m = \frac{1}{\beta} \cdot \ln\left(\frac{\frac{I_L}{I_s} + 1}{1 + \beta V_m}\right) \approx V_{oc} - \frac{1}{\beta} \cdot \ln(1 + \beta V_m) \quad (4.15)$$

โดยที่ $\beta \equiv \frac{q}{kT}$ จะได้ค่ากำลังสูงสุด P_m

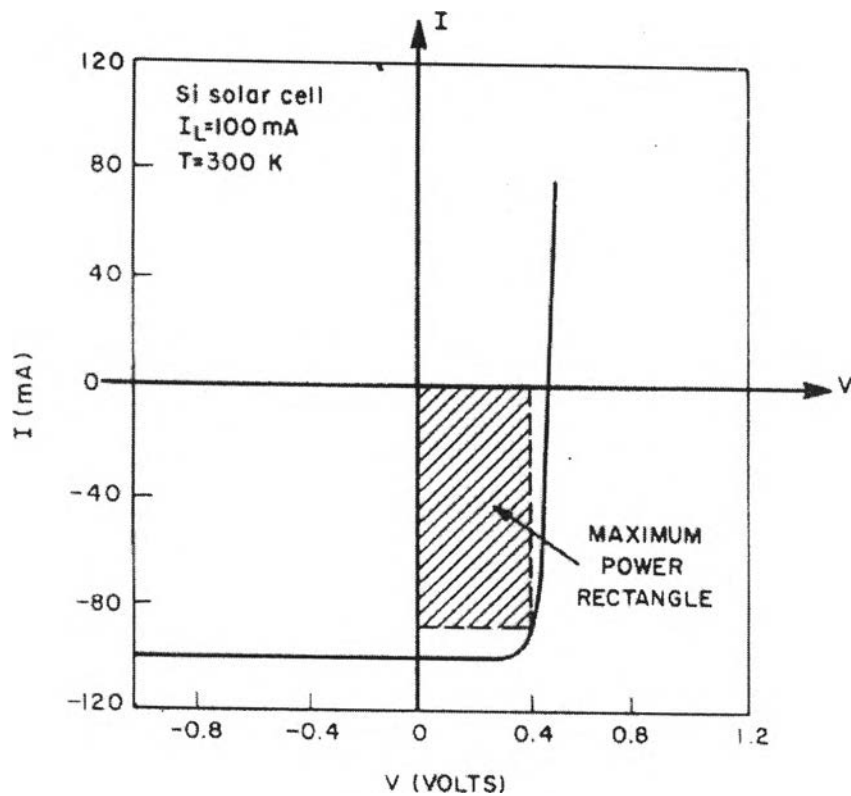
$$P_m = I_m V_m \approx I_L \left[V_{oc} - \frac{1}{\beta} \cdot \ln(1 + \beta V_m) - \frac{1}{\beta} \right] = I_L \left(\frac{E_m}{q}\right) \quad (4.16)$$

$$\text{โดยที่} \quad E_m \equiv q \cdot \left[V_{oc} - \frac{1}{\beta} \cdot \ln(1 + \beta V_m) - \frac{1}{\beta} \right] \quad (4.17)$$

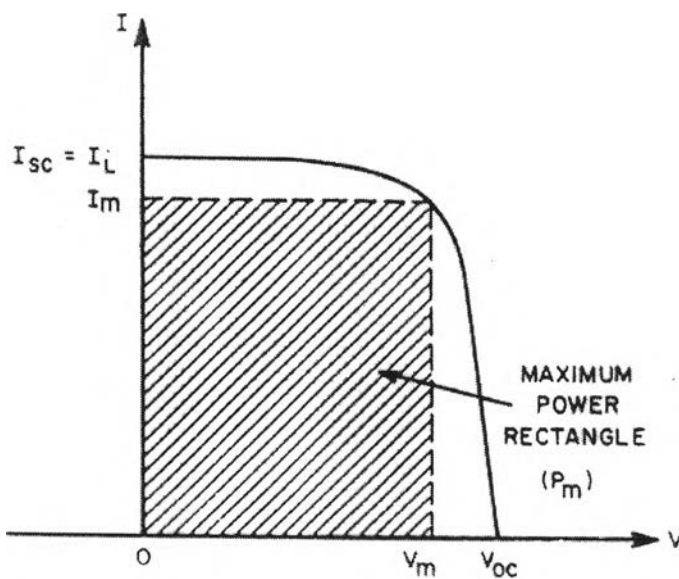
พลังงาน E_m นี้จะสัมพันธ์กับพลังงานต่อโฟตอนที่ส่งออกไปยังโหลดที่ค่ากำลังสูงสุด

จะได้ว่า ประสิทธิภาพการแปลงพลังงานในเชิงอุดมคติ เท่ากับ อัตราส่วนของกำลังสูงสุดที่ส่งออกมากับกำลังที่ได้รับเข้าไป (P_{in})

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{\left(I_L \cdot \frac{E_m}{q} \right)}{P_{in}} = \frac{[V_{in}^2 \cdot I_s \cdot \left(\frac{q}{kT} \right) \cdot e^{(qV_m/kT)}]}{P_{in}} \quad (4.18)$$



(a)



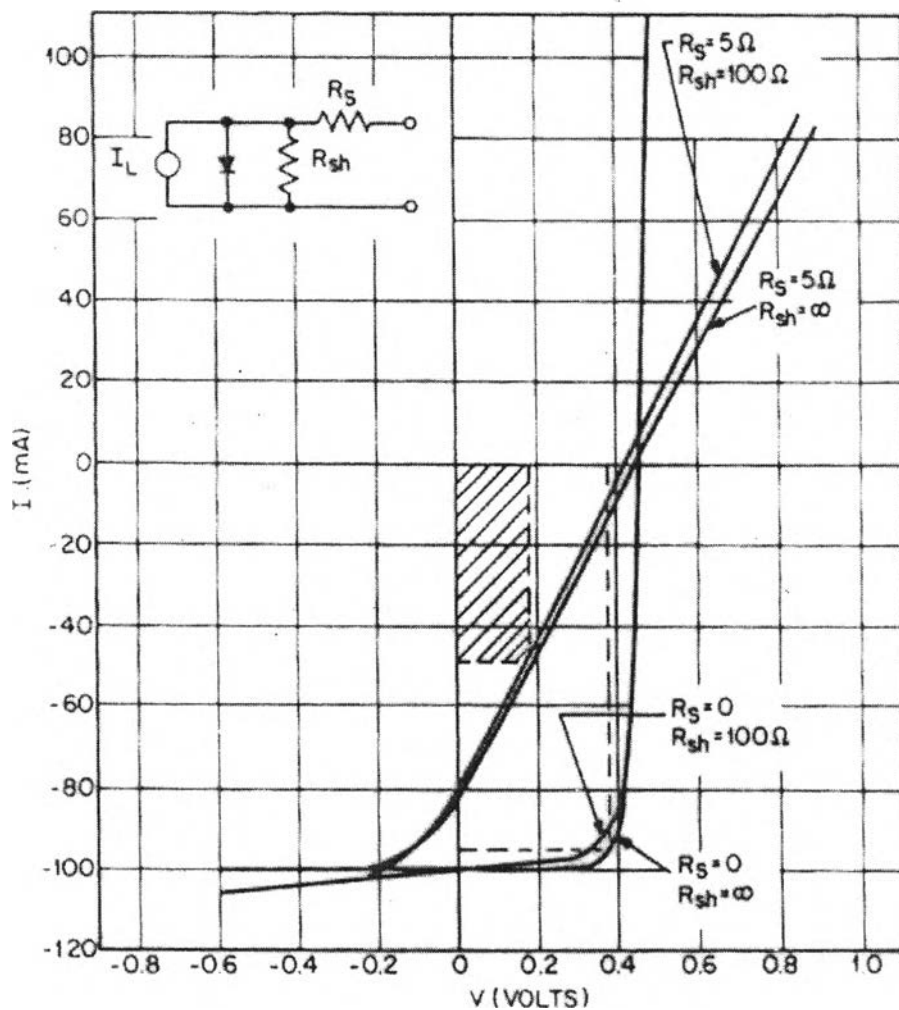
(b)

รูปที่ 4.13 (a) ความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ภายใต้สภาพการฉายแสง

(b) ส่วนกลับ (Inverse) ของกราฟ (a) ^[26]

ในเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้งานจริงนั้น ยังมีการสูญเสียกำลังงานส่วนหนึ่ง เนื่องจากผลของความต้านทานอนุกรม (Series resistance) และความต้านทานขนั้ด (Shunt resistance) ที่เกิดจากตัวเซลล์เอง ความต้านทานอนุกรมในเซลล์เกิดที่บริเวณผิวสัมผัสเนื่องจากสภาพต้านทานในเนื้อสาร ความต้านทานสัมผัส (Contact resistance) และความต้านทานของชั้นแห่งการแพร่ ซึ่งตัวหลังสุดนี้เป็นตัวแปรสำคัญต่อความต้านทานอนุกรม ส่วนความต้านทานขนั้ด เกิดจากการรั่วที่ผิวหน้า ตามขอบของเซลล์และจากผลของโลหะที่ใช้ทำเป็นขั้วที่ผิวหน้าเซลล์ วงจรสมมุติแสดงแทรกไว้ในรูปที่ 4.14 จากกระแสไดโอดที่แสดงไว้ในสมการ (4.11) จะได้ความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ ดังนี้

$$\ln\left(\frac{I+I_L}{I_S} - \frac{V-IR_S}{I_S R_{Sh}} + 1\right) = \frac{q}{kT} \cdot (V - IR_S) \quad (4.19)$$



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสและความต่างศักย์ของเซลล์แสงอาทิตย์ รวมทั้งความต้านทานอนุกรมและความต้านทานขนั้ด ^[26]

ถ้าไม่คำนึงถึงผลของความต้านทานขนาน ค่ากระแสและกำลังไฟฟ้าที่ได้จะสามารถเขียนได้เป็น

$$I = I_S \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V-IR_S)}{kT}\right) - 1 \right] - I_L \quad (4.20)$$

$$P = |IV| = I \cdot \left[\frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I+I_L}{I_S} + 1\right) + IR_S \right] \quad (4.21)$$

ความต้านทานอนุกรมที่เกิดขึ้นนั้นขึ้นอยู่กับความลึกของรอยต่อ (Junction depth) ความเข้มข้นของสิ่งเจือ (Impurity concentrations) ของบริเวณทั้งด้านเอ็นและพี และการจัดเรียงตัวของผิวรอยต่อโอห์มมิกที่ด้านหน้า จากกราฟที่ได้เราสามารถนิยามค่าฟิลแฟคเตอร์ (Fill factor, FF) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) ได้ ดังนี้

$$FF = \frac{I_m \cdot V_m}{I_L \cdot V_{OC}} \quad (4.22)$$

$$\eta = \frac{I_m \cdot V_m}{P_{in}} = \frac{FF \cdot I_L \cdot V_{OC}}{P_{in}} \quad (4.23)$$

จากกราฟรูปที่ 4.14 พบว่า ความต้านทานอนุกรมมีผลกระทบต่อเส้นโค้ง I-V และส่งผลต่อค่า FF เราสามารถแก้ไขได้โดยเพิ่มจำนวนกึ่งก้านหรือ "นิ้วมือ" ของกริดสัมผัส แต่การทำเช่นนี้จะเป็นการลดพื้นที่รับแสงของเซลล์ ปกติมักใส่กริดสัมผัสที่มีพื้นที่ ประมาณ 5-10 % ของผิวน้ำเซลล์ และมีความต้านทานในช่วงระหว่าง 0-1 โอห์ม กับ 0-2 โอห์ม สำหรับกริดสัมผัส 6 กิ่ง ความต้านทานอนุกรมในเซลล์มีผลกระทบโดยจะไปลดประสิทธิภาพของเซลล์ที่มีประสิทธิภาพสูงอยู่แล้วให้มีค่าลดลงมา