

บทที่ 3

ทฤษฎีการระเหย

การเตรียมฟิล์มบางโดยวิธีการระเหย (Evaporation) ในระบบสุญญากาศเป็นอีกรูปแบบหนึ่งของวิธี Physical vapor deposition ที่ง่ายและมีประสิทธิภาพ ในบทนี้จะศึกษาถึงกระบวนการต่างๆ ของวิธีการระเหยที่เรียกว่า การระเหยร่วม (Coevaporation) ศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาของฟิล์มบางที่เตรียมขึ้นมา ตลอดจนทฤษฎีต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการเตรียมฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ด้วยวิธีการระเหยแบบระเหยร่วม ซึ่งรายละเอียดต่างๆ มีดังต่อไปนี้

3.1 บทนำ

เซลล์แสงอาทิตย์ชนิดฟิล์มบาง CIGS เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ที่ให้ประสิทธิภาพสูงที่มีอายุการใช้งานยาวนาน โดยที่ชั้นดูดกลืนแสง CIGS นั้นสามารถเตรียมขึ้นมาได้หลายวิธี ได้แก่ Coevaporation, Sequential deposition, Selenization ($\text{Se}, \text{H}_2\text{Se}$), Sputtering, Annealing of stacked elemental layers, Electrodeposition, Screen Printing, MOCVD (Metalorganic Chemical Vapour Deposition), ALE (Atomic Layer Epitaxy) และ MBE (Molecular Beam Epitaxy)^[12] เป็นต้น แต่ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS นั้นเราจะต้องคำนึงถึงหลักใหญ่ๆ อยู่ 2 หลัก คือ ความไม่ซับซ้อนในการเตรียม (Simplification) และสามารถดัดแปลงนำไปใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Flexibility) ซึ่งวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ที่เป็นไปตามหลัก 2 ข้อดังกล่าวนี้มีอยู่หลายวิธี แต่วิธีที่เราจะศึกษา คือ วิธีระเหยร่วม ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่เหมาะสมให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด

วิธีระเหยร่วม เป็นวิธีการเตรียมฟิล์มบางที่มีอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่สม่ำเสมอและสามารถควบคุมอัตราการเคลือบฟิล์มบางได้เป็นอย่างดี ซึ่งในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS นั้นแต่ละกลุ่มวิจัยที่ใช้วิธีการเตรียมฟิล์มบางแบบวิธีระเหยร่วมก็จะมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางที่แตกต่างกัน แต่ก็สามารถแยกออกเป็น 2 วิธีการหลักที่เมื่อเตรียมแล้วให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ที่สูง คือ วิธี Boeing หรือ Bi-layer process^[13] และวิธี Three-stage process^[14] สำหรับการเตรียมฟิล์มบาง CIGS โดยวิธี Boeing หรือ Bi-layer process มีขั้นตอนการเตรียมเริ่มต้นด้วย ขั้นตอนที่เรียกว่า Cu-rich stage หมายความว่า อัตราการเคลือบฟิล์มบางของ Cu มากกว่าของ In รวมกับ Ga เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนจะได้

$\frac{\text{Cu}}{\text{In}+\text{Ga}} > 1$ เพื่อให้ฟิล์มบาง CIGS มีลักษณะของเกรนที่โตและมีลักษณะเป็นแท่ง ที่เรียกว่า Columnar ซึ่งทำให้สมบัติทางไฟฟ้าของฟิล์มบาง CIGS ที่ได้นั้นมีสมบัติที่ดี ช่วยให้พหุอะตอมมีการเคลื่อนที่จากขั้วสัมผัสล่าง (Mo back contact) ผ่านชั้นต่างๆ ของเซลล์แสงอาทิตย์ได้สะดวกมากขึ้นและมีชนิดการนำไฟฟ้าเป็นแบบพี^[15] ขั้นตอนต่อมาเรียกว่า In,Ga-rich (หรือ Cu-poor) stage หมายความว่า อัตราการเคลือบฟิล์มบาง

ของ Cu น้อยกว่าของ In รวมกับ Ga เมื่อคิดเป็นอัตราส่วนจะได้ $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} < 1$ เพื่อให้ฟิล์มบาง CIGS ที่ได้เมื่อนำไปเตรียมเป็นเซลล์แสงอาทิตย์แล้วสร้างรอยต่อที่ให้ประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์ในระดับที่สูง (High-performance junction) คุณสมบัติของแผ่นวัสดุรองรับ (Substrate, SLG/Mo) ขณะนี้ ประมาณ 550 °C ตลอดกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ทั้งหมดนั้น อัตราการเคลือบฟิล์มบางของ Se จะต้องมากเกินไป (Se excess) สำหรับวิธีการเตรียมฟิล์มบาง CIGS แบบ Three-stage process มีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบางที่ไม่แตกต่างกันกับวิธีแบบ Bi-layer process เพียงแต่มีการเพิ่มขั้นตอนการเตรียมอีกขั้นตอนหนึ่งเข้าไป คือขั้นตอน In-Ga rich stage ซึ่งขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS แบบ Three-stage process เริ่มต้นด้วยการเตรียมแบบ In,Ga-rich stage ก่อน คุณสมบัติของแผ่นวัสดุรองรับ ประมาณ 350 °C ต่อมาเป็น Cu-rich stage เพิ่มคุณสมบัติของแผ่นวัสดุรองรับเป็น 550 °C แล้วตามด้วยขั้นตอน In,Ga-rich stage โดยที่อัตราการเคลือบฟิล์มบางของ Se ต้องมากเกินไป ($\frac{\text{Se}}{\text{Metal}} > 3.0$) ฟิล์มบาง CIGS ที่ได้จากการเตรียมแบบ Three-stage process จะมีลักษณะของผิวหน้าที่เรียกว่าที่เตรียมด้วยวิธี Bi-layer process และให้ประสิทธิภาพในระดับที่สูงกว่าด้วย [3]

สำหรับที่ห้องปฏิบัติการวิจัยฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Physics Research Laboratory, SPRL) ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้เริ่มต้นศึกษาและวิจัยการเตรียมฟิล์มบาง CIS โดยใช้วิธีระเหยผลึก CuInSe_2 และ Se ด้วย Molybdenum boat [7] และต่อมาได้ศึกษาและวิจัยฟิล์มบาง CIGS โดยได้พัฒนากระบวนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS จากการระเหยด้วย Molybdenum boat มาเป็นการระเหยด้วยแหล่งระเหย (Evaporation sources) ซึ่งในการระเหยธาตุ Cu, In, Ga และ Se นั้นจะเป็นอิสระต่อกัน เรียกวิธีนี้ว่า การระเหยร่วม สำหรับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาและวิจัยการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีระเหยร่วม โดยเลือกกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS แบบ Bi-layer process เหตุผลที่ไม่เลือกกระบวนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS แบบ Three-stage process ซึ่งเป็นวิธีการที่ดีกว่า ก็เนื่องมาจากขีดความสามารถในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ของอุปกรณ์ที่ได้สร้างขึ้นมามีขีดจำกัด

3.2 การกระจายตัวของไอ (Vapor distributions)

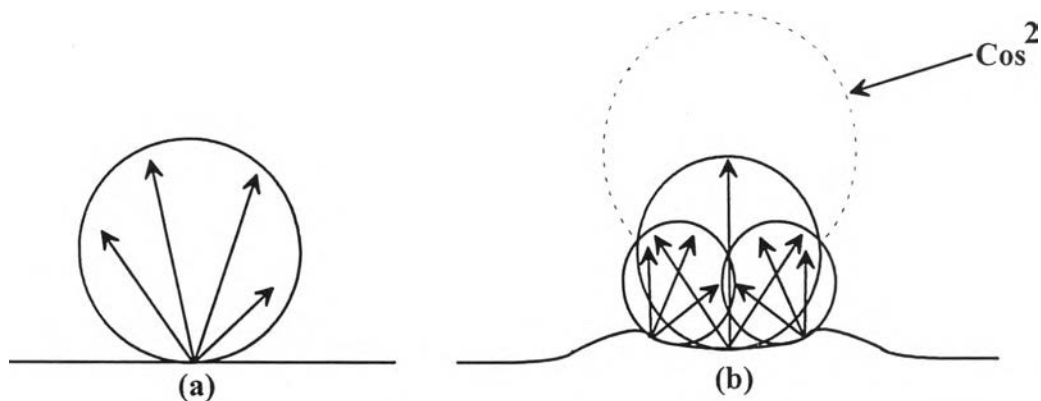
ในการเตรียมฟิล์มบางด้วยวิธีการระเหยภายใต้ระบบสุญญากาศ ความต้องการจากการเตรียมฟิล์มบางทุกประเภท คือ ฟิล์มบางที่เตรียมได้ต้องมีความสม่ำเสมอ แต่สำหรับการระเหยสารด้วยแหล่งกำเนิด (Sources) ที่มีลักษณะเป็นแบบจุด (Point source) หรือเป็นแบบครุชชีเบล (Crucible) ที่เรียกว่า แหล่งระเหย นั้นไอของสารที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดจะไม่สม่ำเสมอ (Non-uniform) เพื่อลดปัญหาของความไม่สม่ำเสมอของฟิล์มบางบนแผ่นวัสดุรองรับนี้ จะต้องเข้าใจกระบวนการทางฟิสิกส์ของการกระจาย

ตัวของไอในระบบสุญญากาศก่อน เพื่อที่จะได้ออกแบบอุปกรณ์สำหรับเตรียมฟิล์มบางบนแผ่นวัสดุรองรับ ที่ให้ความสม่ำเสมอมากที่สุด

การผันแปรการกระจายตัวของไอ (Evaporant distribution variations) สามารถแบ่งได้ 2 ลักษณะ อันเนื่องมาจากการผันแปรที่อยู่ในช่วงระยะจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับ และจากฟลักซ์ไอ (Evaporant flux) ในระดับจุลภาค (Microscopic) นั้น ฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดทั้งหลายจะเป็นผลรวมของแหล่งกำเนิดจุดแบบโคไซน์ (Cosine point sources) ดังรูปที่ 3.1(a) จากเทอร์โมไดนามิกส์ทางสถิติ สามารถอธิบายฟลักซ์แบบโคไซน์ได้ คือฟลักซ์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดขนาดเล็กเท่ารูเข็มแล้วขึ้นไปเคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับ ฟลักซ์จากแหล่งกำเนิดแบบจุดซึ่งเป็นฟังก์ชันการกระจาย (Distribution function) ในเชิงอุดมคตินี้ เป็นไปตามสมการ

$$f(\theta) = \cos(\theta) \quad (3.1)$$

และจะเคลือบติดสม่ำเสมอบนภายในทรงกลมแทนเจนต์ของแหล่งกำเนิดแต่จะเคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับที่มีผิวเรียบไม่สม่ำเสมอ โดยบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางของแผ่นวัสดุรองรับจะถูกเคลือบติดหนาที่สุด



รูปที่ 3.1 แสดงการกระจายตัวของฟลักซ์ไอที่มีทิศทางของแหล่งกำเนิดตั้งฉากกับผิวของแผ่นวัสดุรองรับ^[16]

(a) แบบโคไซน์เดี่ยว (Single cosine) จากแหล่งกำเนิดที่เป็นแบบจุด (Point source)

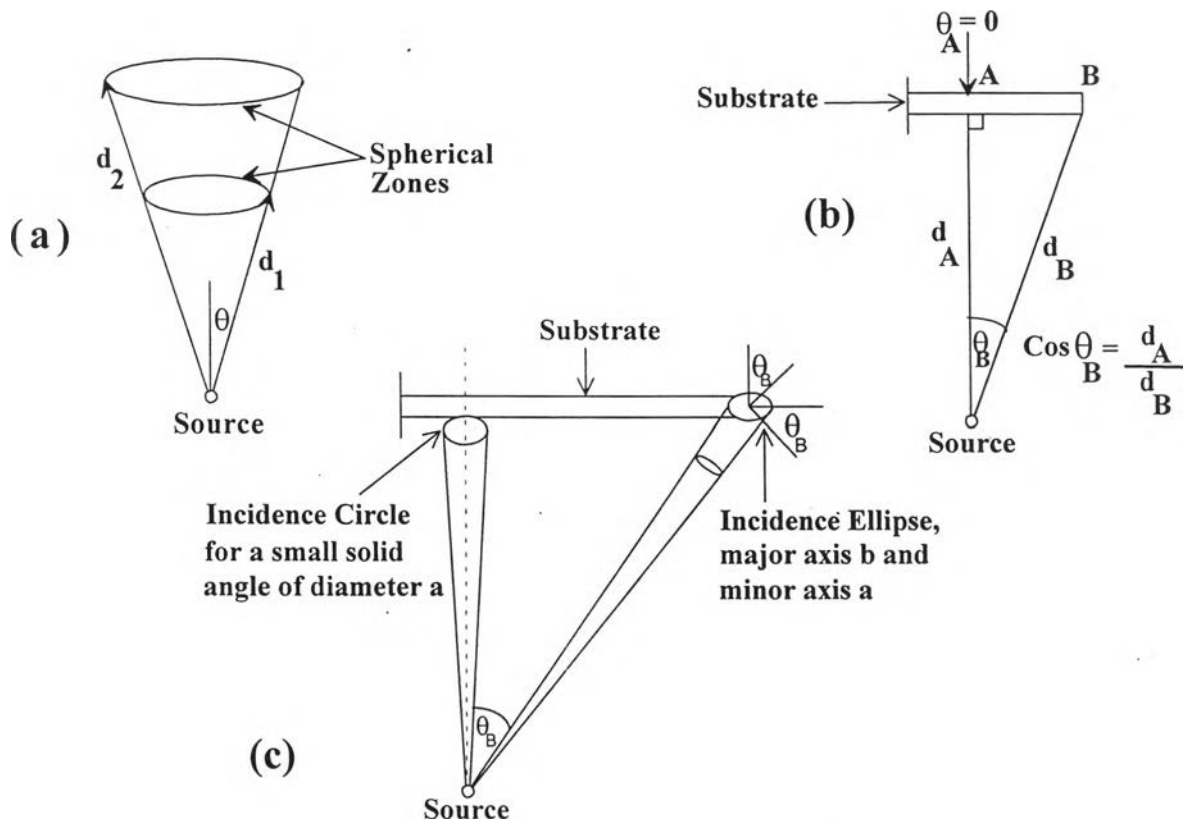
(b) ผลรวมของหลายๆ โคไซน์ที่อยู่เหนือแหล่งกำเนิด

ในกรณีแบบไอโซทรอปิก (Isotropic) คือ เป็นผลรวมฟลักซ์ไอของหลายๆ โคไซน์ที่เท่ากันทั่วบริเวณเหนือแหล่งกำเนิดแบบจุดในสุญญากาศ และผลรวมฟลักซ์ไอของโคไซน์นี้เมื่อขึ้นไปเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับจะให้ความสม่ำเสมอในทุกทิศทาง

ฟังก์ชันการกระจายตัวของฟลักซ์ไอ (Distribution function) ใช้อธิบายปริมาณความหนาแน่นและทิศทางของฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดได้ โดยฟลักซ์ไอนี้เป็นฟังก์ชันที่ขึ้นอยู่กับลักษณะของแหล่งกำเนิด อัตราการระเหย ปริมาณของสาร ชนิดของสาร และความดันภายในภาชนะสุญญากาศ

สิ่งที่มีอิทธิพลต่อความหนาของฟิล์มบางที่เคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ ได้แก่ ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับ การกระจายตัวของฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดและมุมตกกระทบของฟลักซ์ไอบนแผ่นวัสดุรองรับ เพื่อให้ได้ฟิล์มบางที่มีความสม่ำเสมอมากที่สุด แผ่นวัสดุรองรับจะต้องมีลักษณะโครงสร้างที่เหมาะสมที่ทำให้ผลรวมฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเคลื่อนที่ขึ้นไปเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับมีการเคลือบที่สมบูรณ์ที่สุด

ระยะจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับจะมีผลต่อความหนาของฟิล์มบางซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยกฎของ Square law ฟลักซ์ไอที่เคลื่อนที่ผ่านมุมตัน (Solid angle) จะให้ผลในลักษณะเดียวกันกับ ฟลักซ์ไอที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ขนาดเล็กที่อยู่ใกล้แหล่งกำเนิดหรือไม่ก็เหมือนกับฟลักซ์ไอที่เคลื่อนที่ผ่านพื้นที่ขนาดใหญ่กว่าที่อยู่ไกลออกไปจากแหล่งกำเนิด ความสัมพันธ์ที่ถูกต้องสามารถหาได้จากอัตราส่วนของพื้นที่ดังกล่าวโดยที่มุมตันของฟลักซ์ไอต้องเป็นค่าคงที่ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.2 ความสัมพันธ์เชิงเรขาคณิตของ ^[16]

- แหล่งกำเนิดที่แผ่ฟลักซ์ไอ
- แหล่งกำเนิดที่แผ่ฟลักซ์ไอจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับที่เรียบ
- ฟลักซ์ไอที่ตกลงบนแผ่นวัสดุรองรับที่เรียบ ซึ่งมีลักษณะเป็นวงกลมที่

จุด A และมีลักษณะเป็นวงรีที่จุด B

พื้นที่ตรงกลางบริเวณโซนทรงกลม (Spherical zone) ที่อยู่เหนือแหล่งกำเนิด ดังรูปที่ 3.2

(a) สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ

$$A = 2\pi d^2(1 - \cos \theta) \quad (3.2)$$

จากเรขาคณิตพื้นฐาน สามารถหาอัตราส่วนของพื้นที่ที่วัดระยะจากแหล่งกำเนิดได้ d_1 กับพื้นที่ที่วัดระยะจากแหล่งกำเนิด ได้ d_2 ดังนี้

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{2\pi d_1^2(1 - \cos \theta)}{2\pi d_2^2(1 - \cos \theta)} = \frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (3.3)$$

จากสมการ (3.2) เราทราบว่า พื้นที่จะแปรผันตรงกับระยะทางที่วัดจากแหล่งกำเนิดยกกำลังสอง นั่นคือ ถ้าพื้นที่ดังกล่าวมีระยะจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า แล้ว พื้นที่จะมีขนาดเพิ่มขึ้นเป็น 4 เท่า ความหนาของฟิล์มที่เคลือบโดยฟลักซ์ไอซึ่งขึ้นมาจากแหล่งกำเนิดจะเป็นส่วนกลับกับพื้นที่ที่ถูกเคลือบ

$$T = \frac{1}{A} \quad (3.4)$$

นั่นคือ เมื่อรวมสมการ (3.3) กับ (3.4) จะได้

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{d_2^2}{d_1^2} \quad (3.5)$$

ฟิล์มจริงที่ได้จะเป็นไปตามกฎของ Square law ยกเว้นในกรณีที่มีความดันในภาชนะสุญญากาศสูงเกินไปจนทำให้เกิดการกระเจิง (Scattering) ดังนั้นระยะที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จะให้ความหนาของฟิล์มบางลดลงเป็น 1/4 เท่า

เราสามารถอธิบายอัตราส่วนของฟลักซ์ที่ตำแหน่งศูนย์กลาง (จุด A) และที่บริเวณขอบ (จุด B) ของแผ่นวัสดุรองรับที่เรียบได้ (ดูรูป 3.2 (b)) สมมติว่าฟลักซ์ไอที่เคลื่อนที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดมีความสม่ำเสมอ (เป็นแบบไอโซทรอปิก) โดยใช้ส่วนกลับของ Square law จากสมการ (3.4) ทำให้เราทราบว่า ฟลักซ์ไอเป็นฟังก์ชันส่วนกลับของระยะจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับยกกำลังสอง นั่นคือ ฟลักซ์ (หรืออัตราการเคลือบ, R) ที่จุด A และ จุด B คือ

$$R_A = f(\theta_A) \frac{1}{d_A^2} \quad ; \quad R_B = f(\theta_B) \frac{1}{d_B^2} \quad (3.6)$$

สมมติว่า เป็นการกระจายแบบไอโซทรอปิก ฟังก์ชัน $f(\theta)$ ไม่ขึ้นกับมุม θ และจุด A กับจุด B มีอัตราการเคลือบเท่ากัน ดังนั้น ความสัมพันธ์ของฟลักซ์ที่บริเวณขอบของแผ่นวัสดุรองรับที่เรียบสามารถเขียนอยู่ในรูปของสมการ

$$\frac{R_B}{R_A} = \frac{d_A^2}{d_B^2} = \cos^2 \theta_B \quad (3.7)$$

จาก $f(\theta) = \cos \theta$ สามารถใช้อธิบายฟลักซ์ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดจุดแบบโคไซน์ได้และสามารถหาอัตราส่วนของอัตราการเคลือบ (R) ที่จุด A และ จุด B ได้ดังนี้

$$\frac{R_B}{R_A} = \frac{\cos \theta_B}{d_B^2} \cdot \frac{d_A^2}{\cos \theta_A} \quad (3.8)$$

ฟังก์ชัน $f(\theta) = \cos \theta$ ที่จุด A ($\theta_A = 0$) คือ 1 ดังนั้น

$$\frac{R_B}{R_A} = \frac{d_A^2 \cos \theta_B}{d_B^2} \quad (3.9)$$

จากกรณีของไอโซทรอปิก (สมการที่ 3.7) แทน $d_A^2/d_B^2 = \cos^2 \theta_B$ จะได้

$$\frac{R_B}{R_A} = \cos^3 \theta_B \quad (3.10)$$

ความสัมพันธ์ของฟลักซ์ (อัตราการเคลือบ) ที่บริเวณขอบกับที่ตำแหน่งศูนย์กลางของแผ่นวัสดุรองรับที่เรียบ มีข้อจำกัดที่น่าสนใจคือ จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้น อัตราการเคลือบจะเท่ากันตลอดที่จุด A และ จุด B นั่นคือ ฟิล์มบางที่ได้มีการเกาะติดแน่นบนแผ่นวัสดุรองรับในทิศทางตั้งฉากกับผิวของแผ่นวัสดุรองรับแน่นอนว่าไม่เป็นจริงที่จุด B เราสามารถแสดงตัวอย่างง่ายๆ ได้ดังนี้ ความหนาของฟิล์มบางต้องคำนึงถึงผลของมุมตกกระทบของฟลักซ์ไอที่จุด A และจุด B ถ้าเราตรวจสอบพื้นที่วงกลมเล็กๆ (มุมตัน) ที่จุด A ซึ่งอยู่เหนือแหล่งกำเนิดและด้วยมุมตันเดียวกันของฟลักซ์ที่บริเวณขอบของแผ่นวัสดุรองรับ คือ จุด B เราพบว่าที่บริเวณขอบบนผิวแผ่นวัสดุรองรับ จะมีลักษณะเป็นวงรี (ดูรูปที่ 3.2 (c))

$$\text{พื้นที่วงรี} \quad A_B = \frac{\pi}{4} ab \quad (3.11)$$

$$\text{ให้ } b \text{ เป็นแกน major จะได้} \quad b = \frac{a}{\cos \theta_B} \quad (3.12)$$

จากสมการ (3.11) และ (3.12) จะได้ พื้นที่วงรีเป็น

$$A_B = \frac{\pi}{4} \cdot \frac{a^2}{\cos \theta_B} \quad (3.13)$$

อัตราส่วนของพื้นที่ที่ถูกเคลือบที่จุด A (วงกลม มีเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ a) กับจุด B (วงรี) เป็น

$$\frac{A_A}{A_B} = \frac{(\pi/4)a^2}{(\pi/4)(a^2/\cos \theta_B)} = \cos \theta_B \quad (3.14)$$

รวมสมการ (3.7), (3.10) และ (3.14) โดยใช้ $T = \frac{\text{Rate}}{\text{Area}} = \frac{R}{A}$ เราจะได้ การผันแปรความหนาในทิศตั้งฉากกับแผ่นวัสดุรองรับ ของฟิล์มบางจากแหล่งกำเนิดแบบไอโซทรอปิก อยู่ในรูป

แบบ ไอโซทรอปิก
$$\frac{T_B}{T_A} = \cos^3 \theta_B \quad (3.15)$$

แบบ โคไซน์
$$\frac{T_B}{T_A} = \cos^4 \theta_B \quad (3.16)$$

ในกรณีทั่วไป สำหรับฟังก์ชันการกระจายตัวของฟลักซ์ไอ $f(\theta_B)$ บนแผ่นวัสดุรองรับ การกระจายตัวของความหนาจะอยู่ในรูปสมการทั่วไป ดังนี้

$$\frac{T_B}{T_A} = \frac{d_A^2}{d_B^2} \cdot \cos \theta_B \cdot f(\theta_B) \quad (3.17)$$

โดยที่ θ_B คือ มุมตกกระทบของฟลักซ์ไอ ที่จุด B ใดๆ บนแผ่นวัสดุรองรับ

ฟังก์ชันการกระจายตัวของฟลักซ์ไอจากแหล่งกำเนิดแบบไอโซทรอปิกหรือแบบโคไซน์ สามารถแทนได้ด้วยแหล่งกำเนิดเชิงอุดมคติ (Ideal sources) แต่ในความเป็นจริงแล้วแหล่งกำเนิดจริง (Real source) นั้นมีความซับซ้อนกว่ามาก ในแต่ละลวดความต้านทานที่ให้ความร้อนแก่แหล่งกำเนิด จะมีการกระจายตัวได้แบบเดียว (Unique distribution) จากรูปที่ 3.3 สำหรับแหล่งกำเนิดแบบ Real electron beam heated sources นั้น ฟังก์ชันการกระจายที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดจะอยู่ในรูปของสมการ (3.18)

$$f(\theta) = (1 - a)\cos^n \theta + a \quad (3.18)$$

โดยที่ a คือ ส่วนประกอบไอโซทรอปิก (Isotropic component)

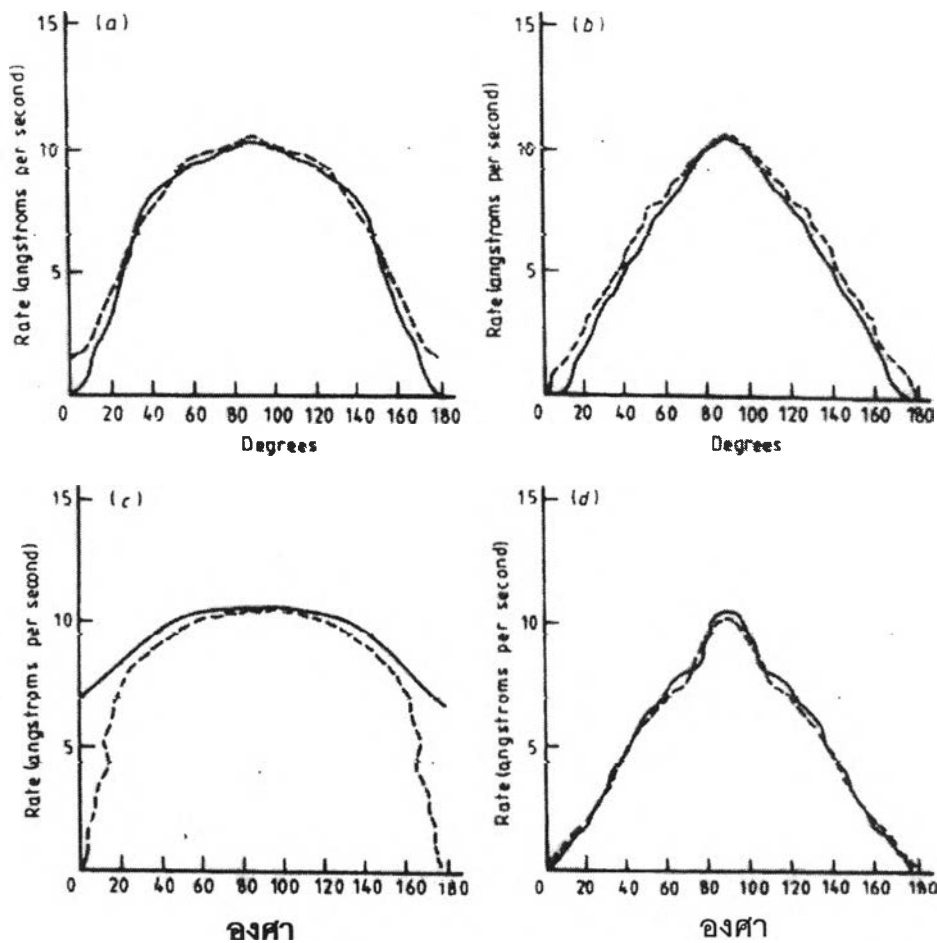
n คือ เลขกำลังของลำฟลักซ์ไอ (Beaming exponent)

ฟังก์ชันการกระจาย (สมการ 3.18) ประกอบด้วยสัมประสิทธิ์อัตราการเคลือบที่ขึ้นต่อกันคือ n และ a (จากรูปที่ 3.4) ฟังก์ชันนี้ใช้อธิบายลักษณะหรือส่วนประกอบของลำฟลักซ์ไอ ($\cos^n \theta$) ที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดที่เป็นแบบ Real electron beam heated sources และใช้อธิบายส่วนประกอบไอโซ

โทรปิค (a) ซึ่งเกิดจากระบบมีความดันของกลุ่มแก๊สบนผิวหน้าของแหล่งกำเนิดสูงมาก ทำให้ Mean free path ต่ำ และการเคลื่อนที่ของฟลักซ์จะหนืด เมื่อแทนสมการ (3.18) ซึ่งเป็นแบบ Real sources ลงในสมการ (3.6) ซึ่งค่ามุมไม่ขึ้นกับการกระจายแบบไอโซโทรปิค จะได้

$$R_A = \frac{1}{d_A^2} [(1-a)\cos^n\theta_A + a] \quad \text{ที่จุด A } \theta_A = 0^\circ \text{ (แนวตั้ง)} = \frac{1}{d_A^2} \quad (3.19)$$

$$R_B = \frac{1}{d_B^2} [(1-a)\cos^n\theta_B + a] \quad (3.20)$$



รูปที่ 3.3 การกระจายตัวของไอ จากแหล่งกำเนิดที่มีลักษณะแตกต่างกัน ^[16]

(a) dimple boat ขนาด 40x10 มม²

(b) dimple boat ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 10 มม. และลึก 3 มม.

(c) ลวดยาว 40 มม. พันเป็นขดยาว 6,10 มม.

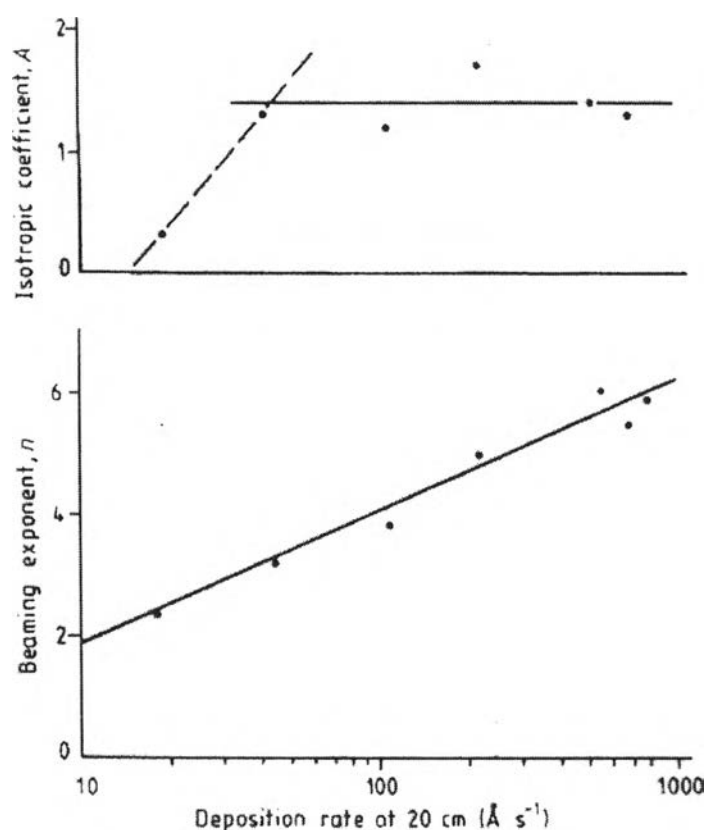
(d) ครุซีเบิลมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายในขนาด 10 มม. และสูง 12 มม.

ความสัมพันธ์ของอัตราการระเหยที่จุด B (สมการ 3.7) สำหรับแหล่งกำเนิดจริง

$$\frac{R_B}{R_A} = \frac{d_A^2 [(1-a)\cos^n \theta_B + a]}{d_B^2} = \cos^2 \theta_B [(1-a)\cos^n \theta_B + a] \quad (3.21)$$

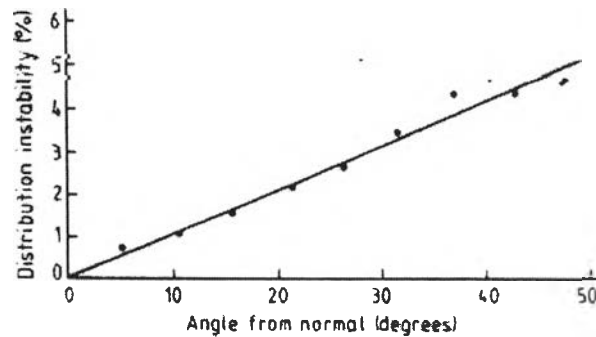
R_A และ R_B แสดงค่าฟลักซ์ที่จุด A และจุด B บนแผ่นวัสดุรองรับ ตามลำดับ (ดูรูปที่ 3.2)

จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมด ตำแหน่งของแผ่นวัสดุรองรับที่ห่างจากแหล่งกำเนิดไกลออกไป (มุม θ น้อยๆ) จะมีอัตราการเคลือบที่สม่ำเสมอมาก แต่ในความเป็นจริงแล้วอัตราการเคลือบฟิล์มบางจะลดลงเป็นกำลังสองของระยะจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับ ระยะห่างมากก็จะให้อัตราการเคลือบที่ต่ำ เนื่องจากระยะการเดินทางของฟลักซ์ไอยาวขึ้น ซึ่งจะส่งผลทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้ช้า ในระดับเชิงเส้นนั้น อัตราการเคลือบฟิล์มบางบนแผ่นวัสดุรองรับ ต้องคงที่ และ Mean free path ของระยะจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับต้องคงที่ด้วย เพื่อที่จะให้มีการเคลือบฟิล์มบางที่เหมือนเดิมทุกครั้งเมื่อมีการเพิ่มระยะทางจากแหล่งกำเนิดถึงแผ่นวัสดุรองรับ



รูปที่ 3.4 สัมประสิทธิ์การกระจาย (Distribution coefficients) ใช้วัดหาค่าฟลักซ์ไอ

สำหรับอะลูมิเนียมที่ได้รับความร้อนจาก Electron beam heated source ^[16]



รูปที่ 3.5 การกระจายตัวที่ไม่เสถียร ให้ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของการวัดความหนา สำหรับไออะลูมิเนียมที่ได้รับความร้อนจาก Electron beam heated source ^[16]

รายละเอียดของทฤษฎีการระเหยที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนั้นเป็นการอธิบายเกี่ยวกับการกระจายตัวของฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดโดยมีลักษณะเป็นแบบจุด แต่ถ้าแหล่งกำเนิดมีลักษณะเป็นแบบครุซิบิล ที่เรียกว่า แหล่งระเหย (Evaporation source) โดยที่เส้นผ่านศูนย์กลางของช่องเปิดของแหล่งกำเนิดมีขนาดเล็กและทิศทางการเคลื่อนที่ของไอที่เคลื่อนตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดมีทิศทางเอียงทำมุมใดๆ กับผิวของแผ่นวัสดุรองรับ เท่ากับ ϕ ดังรูปที่ 3.6 (b) สามารถอธิบายการกระจายตัวของฟลักซ์ไอของสารที่ถูกระเหยโดยแหล่งระเหยนี้ได้ ดังนี้ ^[17]

พิจารณารูปที่ 3.6 (a) เป็นการเคลือบฟิล์มบางด้วยแหล่งระเหยที่มีลักษณะการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ไอที่เคลื่อนตัวออกมาจากแหล่งกำเนิดตั้งฉากกับผิวของแผ่นวัสดุรองรับ สมมติให้ ฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดสามารถประมาณได้ว่าการกระจายตัวแบบโคไซน์ ซึ่งมีอัตราการเคลือบฟิล์มบางบริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นวัสดุรองรับมากที่สุด ได้จากการสังเกตของ Knudsen ซึ่งเป็นเงื่อนไขสมดุลความร้อนเชิงอุดมคติ (Ideal thermal equilibrium) ที่ไม่สามารถนำไปใช้งานได้จริง แต่ถ้าสมมติว่าการกระจายตัวของฟลักซ์ไอเป็นแบบแมกซ์เวลล์ จะได้ว่าฟลักซ์หรืออัตราการเคลือบฟิล์มบางบริเวณจุดศูนย์กลางของแผ่นวัสดุรองรับ (Central flux, R_c) ซึ่งเป็นแบบตั้งฉาก สามารถแสดงได้ด้วยสมการ

$$\text{แบบตั้งฉาก : } R_A = \frac{1}{d_A^2} \cdot \frac{P}{\sqrt{2\pi mkt}} = 3.51 \times 10^{22} \cdot \frac{PA}{d_A^2 \sqrt{MT}} \quad (3.22)$$

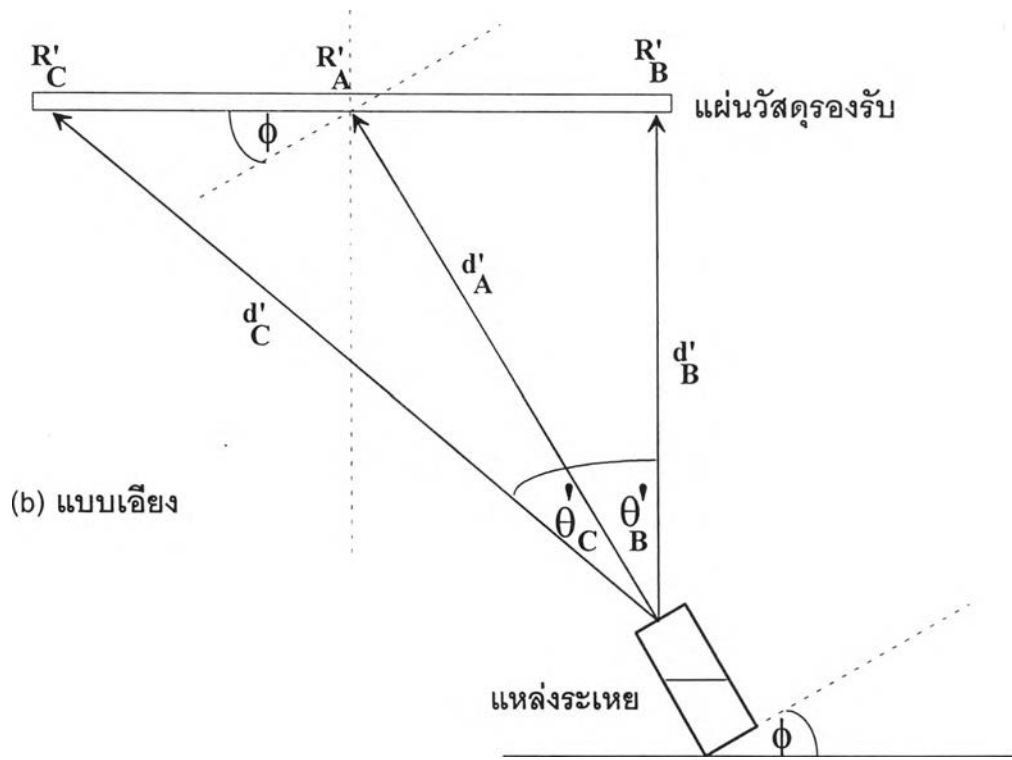
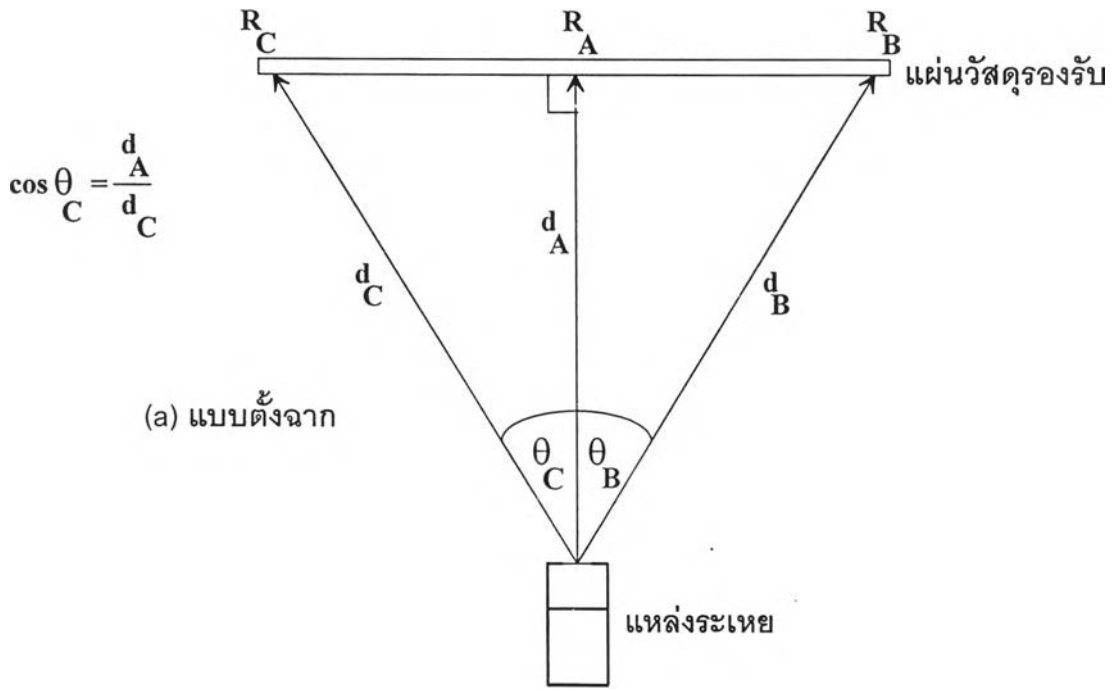
โดยที่ P คือ ความดันภายในแหล่งระเหยที่อุณหภูมิ T (Torr)

T คือ อุณหภูมิของแหล่งระเหย (K)

A คือ พื้นที่ช่องเปิดของแหล่งระเหย (cm^2)

M คือ มวลโมเลกุลของสารที่ใช้ระเหย

d_A คือ ระยะจากช่องเปิดของแหล่งระเหยถึงจุดศูนย์กลางของแผ่นวัสดุรองรับ (cm)



รูปที่ 3.6 แสดงการกระจายตัวของฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งระเหย

อัตราส่วนของอัตราการเคลือบที่ขอบของแผ่นวัสดุรองรับ (R_C) กับที่จุดศูนย์กลางของแผ่นวัสดุรองรับ (R_A) มีความสัมพันธ์ดังสมการ (3.23)

$$\frac{R_C}{R_A} = \left(\frac{d_A^2}{d_C^2} \right) \cdot \cos^2 \theta_C = \cos^4 \theta_C \quad (3.23)$$

สามารถหาฟังก์ชันการกระจาย $f(\theta)$ ที่ออกมาจากแหล่งระเหย ดังรูปที่ 3.6 (a) ได้ จากการแก้สมการ (3.23) ดังนี้

$$\begin{aligned} \frac{R_C}{R_A} &= \frac{(1/d_C^2) \cdot \cos^2 \theta_C}{(1/d_A^2)} \\ \frac{R_C}{R_A} &= \frac{(1/d_C^2) \cdot \cos^2 \theta_C}{(1/d_A^2) \cdot \cos^2(\theta_A=0)} = \frac{(1/d_C^2) \cdot f(\theta_C)}{(1/d_A^2) \cdot f(\theta_A)} \end{aligned}$$

เมื่อเทียบกับสมการ (3.6) จะได้

$$f(\theta_C) = \cos^2 \theta_C \quad \text{และ} \quad f(\theta_A) = \cos^2 \theta_A$$

ดังนั้นฟังก์ชันการกระจาย $f(\theta)$ ตามโครงสร้างดังรูป 3.6 (a) แบบตั้งฉาก คือ

$$f(\theta) = \cos^2 \theta \quad (3.24)$$

สำหรับการเคลือบฟิล์มบางด้วยแหล่งระเหยแบบเอียง ดังรูปที่ 3.6 (b) มีทิศทางการเคลื่อนที่ของฟลักซ์ไอที่ออกมาจากแหล่งกำเนิดเอียงทำมุมใดๆ กับผิวแผ่นวัสดุรองรับ เท่ากับ ϕ สามารถคำนวณหาฟลักซ์หรืออัตราการเคลือบฟิล์มบางบริเวณขอบแผ่นวัสดุรองรับ ได้ด้วยสมการ

$$\text{แบบเอียง :} \quad R'_C = R_A \cdot \cos(\theta'_C) \cdot \cos(\phi + \theta'_C) \cdot \left(\frac{l}{d_C} \right)^2 \quad (3.25)$$

ความสัมพันธ์ของอัตราการเคลือบที่จุดศูนย์กลางของแผ่นวัสดุรองรับ ดังรูปที่ 3.6 a,b เป็นไปตามสมการ

$$R'_A = R_A \cdot \cos(\phi) \quad (3.26)$$

ดังนั้น สมการ (3.25) จะกลายเป็น

$$\frac{R_C}{R_A} = \frac{\cos(\theta'_C) \cdot \cos(\phi + \theta'_C)}{\cos(\phi)} \cdot \left(\frac{d_A}{d_C} \right)^2 \quad (3.27)$$

สามารถหาฟังก์ชันการกระจาย $f(\theta)$ ที่ออกมาจากแหล่งระเหย ดังรูปที่ 3.6 (b) ได้ จากการแก้สมการ (3.27) ดังนี้

$$\frac{R_C}{R_A} = \frac{(1/d_C^2) \cdot (\cos \theta'_C / \cos \phi) \cdot \cos(\phi + \theta'_C)}{(1/d_A^2) \cdot [\cos(\theta'_A = 0) / \cos \phi] \cdot \cos[\phi + (\theta'_A = 0)]}$$

$$\frac{R_C}{R_A} = \frac{(1/d_C^2) \cdot (\cos \theta'_C / \cos \phi) \cdot \cos(\phi + \theta'_C)}{(1/d_A^2) \cdot (\cos \theta'_A / \cos \phi) \cdot [\cos(\phi + \theta'_A)]} = \frac{(1/d_C^2) \cdot f(\theta'_C)}{(1/d_A^2) \cdot f(\theta'_A)}$$

เมื่อเทียบกับสมการ (3.6) จะได้

$$f(\theta'_C) = \left(\frac{\cos \theta'_C}{\cos \phi} \right) \cdot \cos(\phi + \theta'_C) \quad \text{และ} \quad f(\theta'_A) = \left(\frac{\cos \theta'_A}{\cos \phi} \right) \cdot \cos(\phi + \theta'_A)$$

ดังนั้น ฟังก์ชันการกระจาย $f(\theta)$ ตามโครงสร้างดังรูป 3.6 (b) แบบเอียง คือ

$$f(\theta) = \left(\frac{\cos \theta}{\cos \phi} \right) \cdot \cos(\phi + \theta) \quad (3.28)$$

การระเหยสารภายใต้ระบบสุญญากาศ โดยใช้แหล่งระเหยเป็นอุปกรณ์ให้ความร้อนแก่สารโดยช่องเปิดของแหล่งระเหยที่ให้ฟลักซ์ไอเคลื่อนที่ออกมา มีพื้นที่ประมาณ 2.2 cm^2 ฟลักซ์หรืออัตราการเคลื่อนที่ของฟิล์มบางที่ขึ้นไปเคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับ สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\ln(R) = \frac{S}{T} + b \quad (3.29)$$

โดยที่ R คือ อัตราการเคลื่อนที่ของสารที่ถูกระเหยด้วยแหล่งระเหย (A^0/s)

S คือ ความชันของกราฟที่ได้จากการเฉลี่ยข้อมูลดิบของ R ที่อุณหภูมิต่างๆ $\left(\frac{A^0 \cdot K}{s} \right)$

b คือ จุดตัดบนแกน $\ln(R)$ (A^0/s)

T คือ อุณหภูมิของแหล่งระเหยในหน่วยองศาสัมบูรณ์ (K)

ค่าตัวแปร S และ b ในสมการ (3.29) สามารถคำนวณหาได้โดยต้องระเหยสารที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งอย่างน้อย 4 อุณหภูมิหรือมากกว่า จะได้ค่าอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยต่างๆ จากนั้นนำข้อมูลของอัตราการเคลือบฟิล์มบางที่อุณหภูมิของแหล่งระเหยต่างๆ ในรูปของ Natural logarithm กับสวอนกลับของอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ใช้ระเหยสารมาคำนวณด้วยโปรแกรมตารางคำนวณ จะได้ค่า S และ b

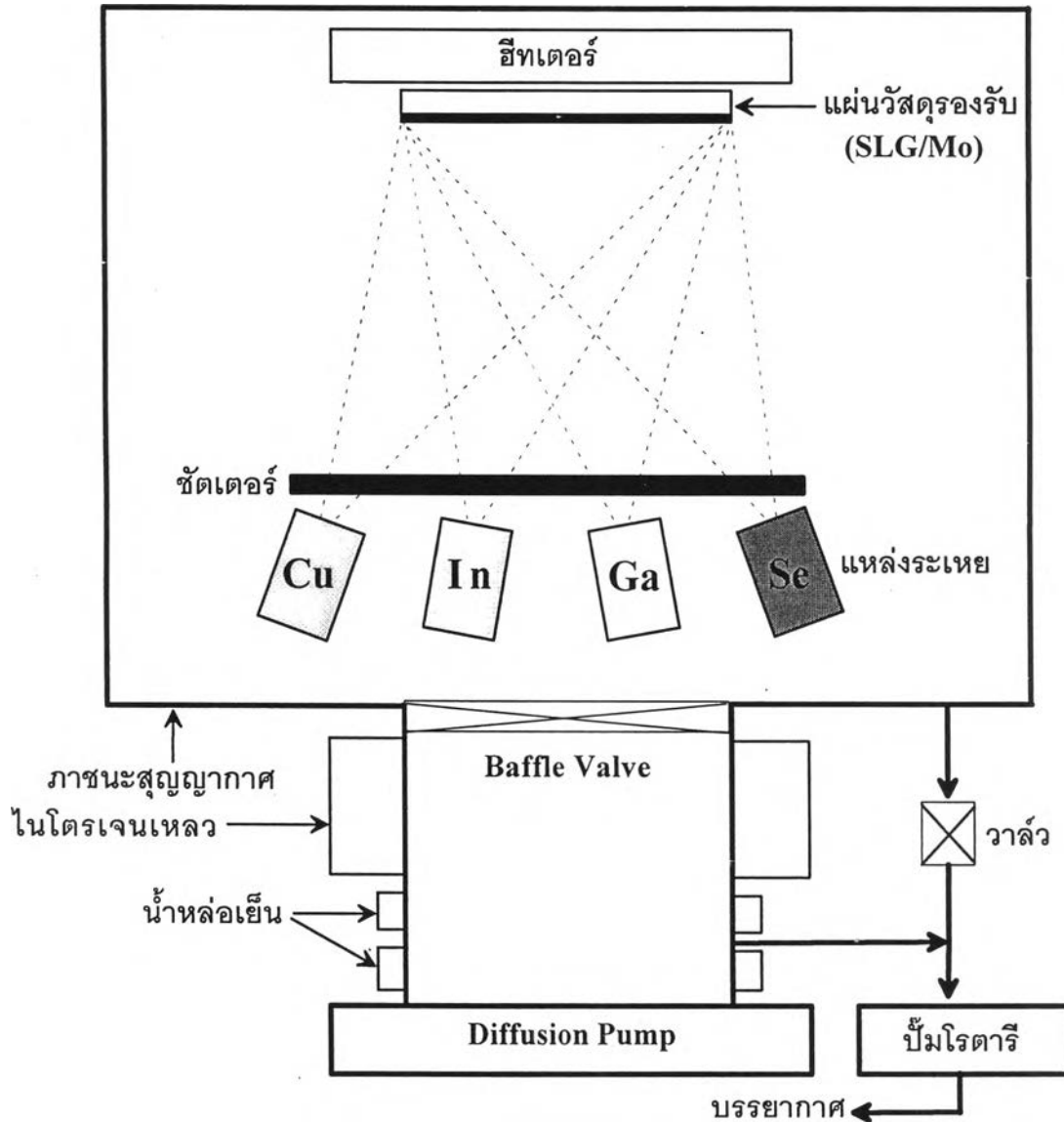
จากสมการ $\ln(R) = \frac{S}{T} + b$ ค่า S และ b จะขึ้นอยู่กับชนิดของสารที่ใช้ระเหยและช่วงของอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ได้ปรับเทียบ (Calibrate) หาอัตราการเคลือบของฟิล์มบางมาแล้ว หมายความว่า ถ้าเราระเหย Cu แล้วใช้ค่า S และ b ของ Ga มาคำนวณหาอัตราการเคลือบฟิล์มบางจะทำให้ได้ค่าอัตราการเคลือบฟิล์มบางของทองแดงที่ไม่ถูกต้อง หรือถ้าเราระเหย Ga ด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ไม่อยู่ในช่วงของอุณหภูมิที่ได้ปรับเทียบหาอัตราการเคลือบฟิล์มบางไว้กรณีปรับเทียบแหล่งระเหยที่ผันขดลวดแทนทาลัมขึ้นมาใหม่ จะทำให้ได้ อัตราการเคลือบฟิล์มบางของ Ga ไม่ถูกต้องตามที่ได้คำนวณจากสมการ (3.29) นั่นก็คือ เราสามารถหาอัตราการเคลือบฟิล์มบางของสารใดๆ ได้อย่างถูกต้องจากสมการ (3.29) ได้ โดยต้องคำนึงถึงชนิดของสารที่ใช้ระเหยว่าเป็นชนิดเดียวกับสารที่ได้ปรับเทียบมาแล้วหรือไม่ และถ้าเป็นสารชนิดเดียวกัน อุณหภูมิของแหล่งระเหยที่ใช้ระเหยสารต้องอยู่ในช่วงที่ได้ปรับเทียบหาอัตราการเคลือบฟิล์มบางไว้แล้วด้วย รายละเอียดดูบทที่ 5 การทดลองและผลการทดลอง

3.3 ทฤษฎีการระเหยร่วม (Coevaporation method)

การระเหยสาร(ธาตุ)ด้วยแหล่งระเหยภายใต้ระบบสุญญากาศ โดยถ้าเป็นการระเหยสารตั้งแต่ 2 ธาตุ ขึ้นไปโดยที่แต่ละแหล่งระเหยเป็นอิสระต่อกันในการควบคุมอุณหภูมิ เรียกว่า การระเหยร่วม

พิจารณารูปที่ 3.7 ซึ่งเป็นระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS ภายใต้ความดันในระดับ 10^{-6} มิลลิบาร์ โดยใช้ระบบของปั๊มโรตารี (Rotary pump) ทำงานร่วมกับ Diffusion pump ระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS นี้ ประกอบด้วยแหล่งระเหยซึ่งมีทั้งหมด 4 ตัว ใช้ระเหยสาร(ธาตุ) ได้แก่ Cu, In, Ga และ Se สำหรับเตรียมฟิล์มบาง CIGS มีโครงสร้างดังรูปที่ 3.8 ฮีตเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับให้ความร้อนแก่แผ่นวัสดุรองรับเพื่อให้ฟิล์มบาง CIGS ที่เตรียมบนแผ่นวัสดุรองรับมีการจัดตัวทางโครงสร้างผลึกจะได้ฟิล์มบาง CIGS ที่มีสมบัติที่ดี และ ชัตเตอร์ (Shutter) เป็นอุปกรณ์ส่วนที่ใช้ ปิด-เปิด ไอของสารที่ออกมาจากแหล่งระเหย สำหรับระบบที่ใช้ในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ชัตเตอร์ที่ใช้มีเพียงชัตเตอร์เดียว ดังนั้นในการเตรียมฟิล์มบาง CIGS จึงเลือกกระบวนการเตรียมฟิล์มบางแบบ Bi-layer process ซึ่งมีขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS แบ่งเป็น 2 ขั้นตอนหลักซึ่งได้กล่าวมาแล้ว คือ Cu-rich stage และ In, Ga-rich stage โดยฟิล์มบาง CIGS นั้นต้องเตรียมให้ได้ในอัตราส่วน $\frac{Cu}{In+Ga} = 0.9$ และ

$\frac{Ga}{In+Ga} = 0.2$ ซึ่งสามารถควบคุมอัตราส่วนของฟิล์มบาง CIGS ได้ด้วยอุณหภูมิของแหล่งระเหยของแต่ละแหล่งที่ได้ปรับเทียบมาแล้ว รายละเอียดดูที่บทการทดลอง

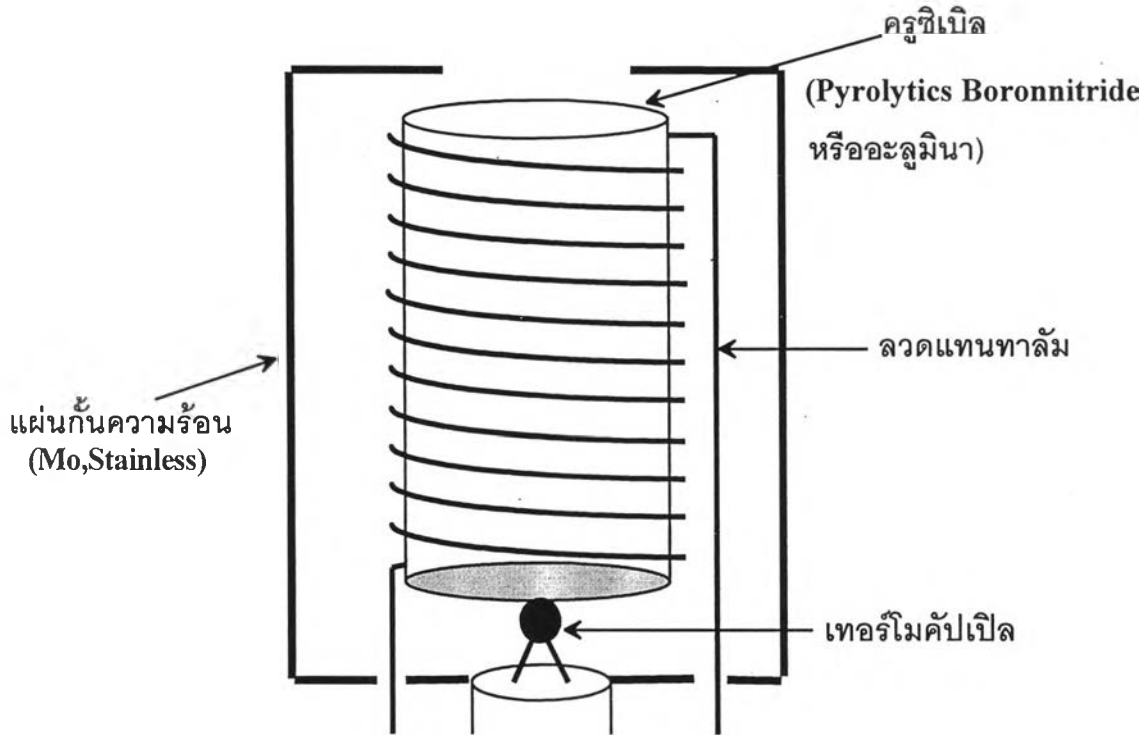


รูปที่ 3.7 แสดงระบบเตรียมฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีระเหยร่วม

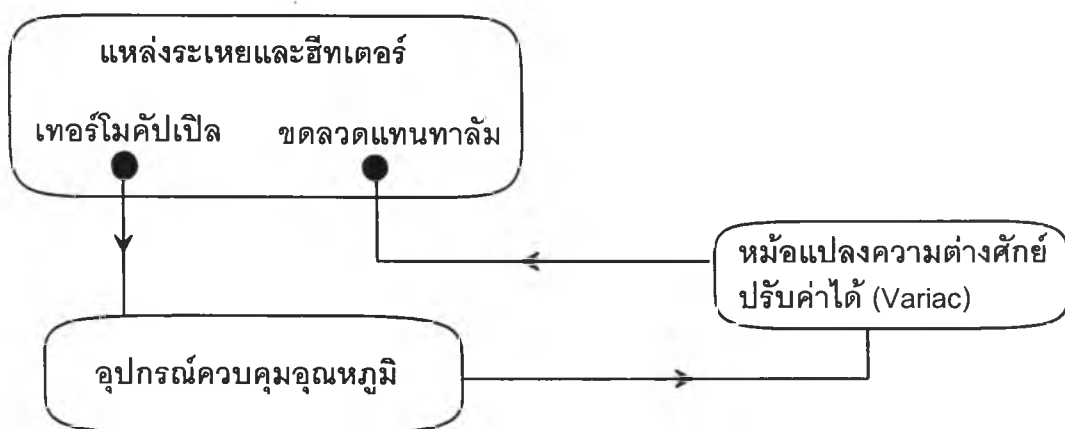
3.3.1 กระบวนการเกิดฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ ^[18,19]

การเตรียมฟิล์มบาง $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ โดยใช้วิธีระเหยร่วมแบบ Bi-layer process ประกอบด้วย ขั้นตอน Cu-rich stage และ In,Ga-rich stage ทั้ง 2 ขั้นตอนต้องอยู่ภายใต้บรรยากาศของ Se ที่มากเกินไป คือ $\frac{Se}{Metal} > 3.0$ เพื่อเป็นการกระตุ้นให้ไอของ Cu, In และ Ga ที่เคลือบติดบนแผ่นวัสดุรองรับ (SLG/Mo) ทำปฏิกิริยากันโดยมี Se เป็นตัวกระตุ้น จนเกิดเป็น $Cu(In_{1-x}Ga_x)Se_2$ ตลอดกระบวนการ

ในการเตรียมฟิล์มบางต้องควบคุมอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}}$ ให้ได้ประมาณ 0.9 และ $\frac{\text{Ga}}{\text{In+Ga}}$ ให้ได้ประมาณ 0.2 โดยในขั้นตอน Cu-rich stage ต้องเตรียมที่อัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} > 1.0$ และในขั้นตอน In,Ga-rich stage ต้องเตรียมที่อัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} < 1.0$ สำหรับการเตรียมฟิล์มบาง CIGS นั้นได้เตรียมลงบนกระจกโซดาไลม์ ขนาด $4.8 \times 5.8 \text{ cm}^2$ ที่เคลือบด้วยโมลิบดีนัมหนา 1 ไมครอน

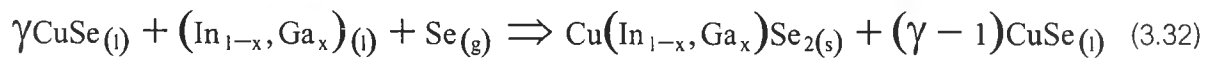
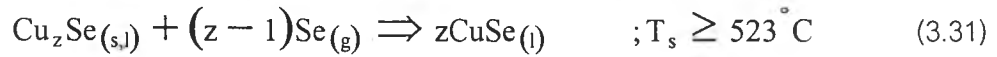
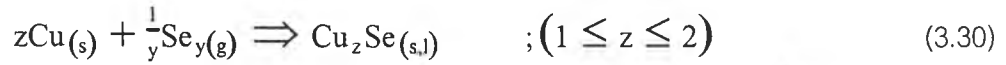


รูปที่ 3.8 แสดงโครงสร้างภายในของแหล่งระเหย



รูปที่ 3.9 แสดงแผนผังการควบคุมอุณหภูมิของแหล่งระเหยและฮีตเตอร์

Cu-rich stage เมื่ออุณหภูมิของแผ่นรองรับวัสดุซึ่งได้รับความร้อนจากฮีทเตอร์มีค่าได้ประมาณ 550°C ไอของ Cu, In, Ga และ Se ที่มากเกินไปที่ออกมาจากแหล่งระเหย ซึ่งมีอัตราการเคลือบฟิล์มบางของ Cu, In และ Ga เป็นไปตามอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} > 1.0$ จะทำปฏิกิริยากันบน แผ่นวัสดุรองรับเกิดเป็นสารประกอบเชิงคู่ (Binary compound) Cu_zSe และ $(\text{In,Ga})_y\text{Se}$ จากรูปที่ 3.10 (a) และเกิดเป็นส่วนผสมระหว่าง $\text{Cu}_z\text{Se} : \text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ตามสมการทางเคมี

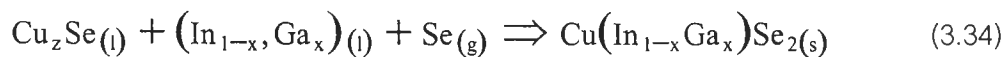
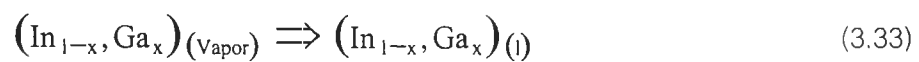


โดยที่ $\gamma =$ อัตราส่วนฟลักซ์ $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}}$

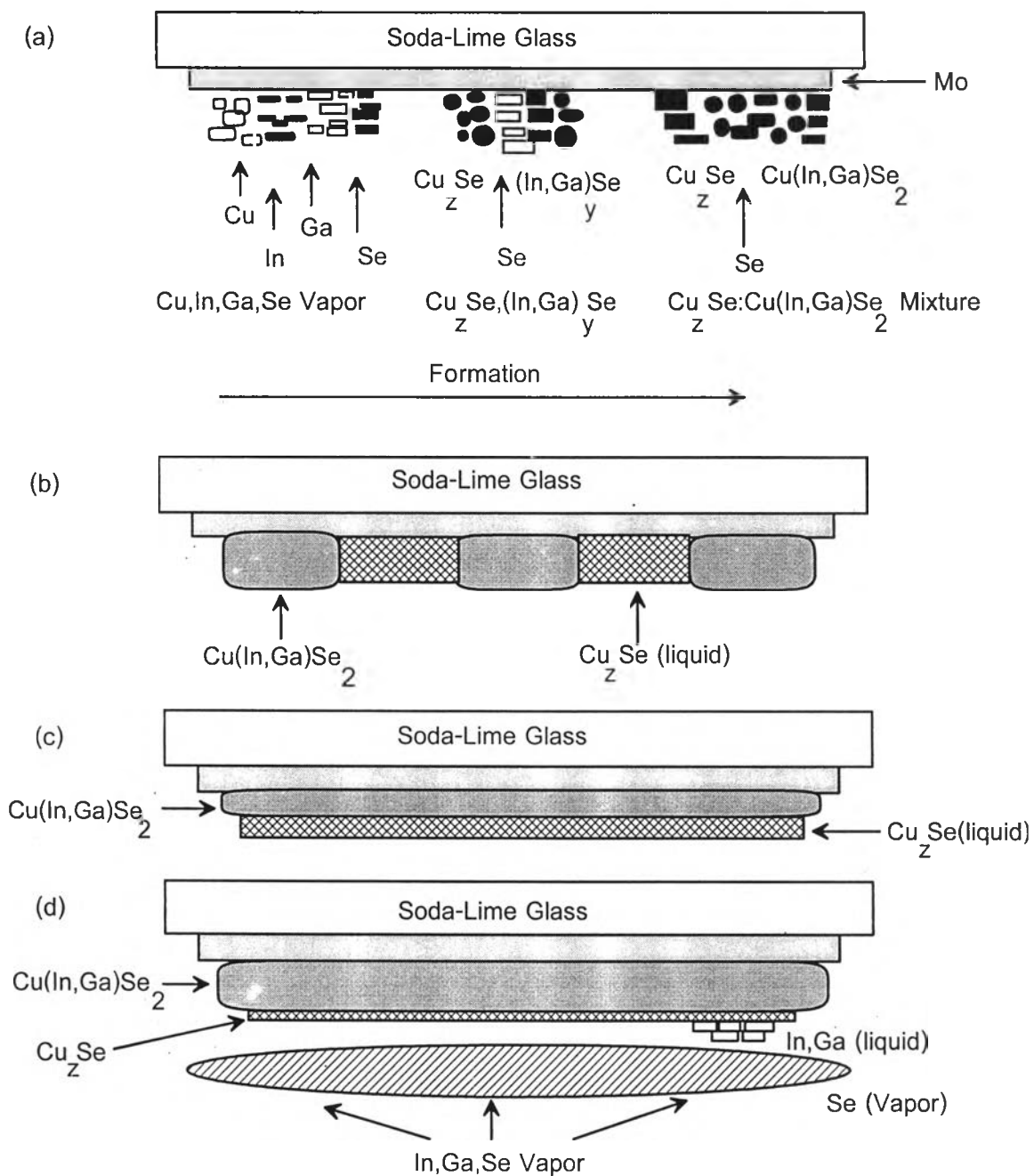
z คือ ตัวแปรค่าสัดส่วนของ Cu-Se binary ในขณะที่กำลังเกิดปฏิกิริยา

เนื่องจากอุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับ มีค่าประมาณ 550°C กระบวนการเกิดปฏิกิริยาจะได้รับอิทธิพลจากเฟสของแข็งและเฟสของเหลวดังรูปที่ 3.10 (b) การจัดตัวของ $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ จะมีทิศทางขนานไปในแนวระนาบ (112) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้จากการตรวจสอบฟิล์มบาง CIGS ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ ในขณะที่มีการเกิด $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ในสถานะที่เป็นของแข็ง พลังงานที่ผิวหน้าระหว่างเฟสของเหลวและเฟสของแข็งจะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดๆ หนึ่งที่ทำให้เกิดการแยกเฟสซึ่งจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางที่ตั้งฉากกับระนาบของแผ่นวัสดุรองรับ จากรูปที่ 3.10 (c)

In,Ga-rich stage เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนของ Cu-rich stage แล้ว จะหยุดระเหย Cu แต่ยังคงระเหย In,Ga และ Se ต่อ ซึ่งต้องควบคุมอัตราการเคลือบฟิล์มบางตลอดขั้นตอนนี้ให้เป็นไปตามอัตราส่วน $\frac{\text{Cu}}{\text{In+Ga}} < 1.0$ ซึ่งต่อมา Cu_zSe จะเปลี่ยนสภาพโดยกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์เปลี่ยนไปเป็น $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ จากรูปที่ 3.10 (d) ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังสมการต่อไปนี้



จากขั้นตอนการเตรียมฟิล์มบาง CIGS ที่ได้กล่าวมาทั้งหมด สามารถสรุปกระบวนการเกิดฟิล์มบางได้ 3 กระบวนการ ดังนี้ ^[20]



รูปที่ 3.10 กระบวนการเกิดของฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ [18]

- การเกิดปฏิกิริยาชั้นเริ่มต้น
- เกิด $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ และ Cu_2Se
- เกิดชั้นของ $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ในทิศตั้งฉากกับระนาบของแผ่นวัสดุรองรับ
- การเปลี่ยนรูปของ Cu_2Se และเกิดเป็นฟิล์มบาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ในแนวระนาบ

กระบวนการแรก เป็นขั้นตอนที่สาร(ธาตุ)แต่ละธาตุเมื่อได้รับความร้อนจากแหล่งระเหยแล้วจะเปลี่ยนสถานะจากของแข็งมาเป็นของเหลวและเริ่มกลายเป็นไอ ซึ่งสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นด้วยทฤษฎีทางเทอร์โมไดนามิกส์ของการแปลงเฟส

กระบวนการที่สอง เป็นขั้นตอนที่ไอของสารที่อยู่ในแหล่งระเหยของแต่ละตัวที่เกิดขึ้นจากกระบวนการแรกเคลื่อนที่ (Transport) จากแหล่งระเหยขึ้นไปเคลือบบนแผ่นวัสดุรองรับ และทำปฏิกิริยากันจนเกิดเป็น $\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$ ที่ยังอยู่ในสถานะของของเหลวโดยแผ่นวัสดุรองรับต้องมีอุณหภูมิประมาณ $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ กระบวนการนี้สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีจลน์ของแก๊ส

กระบวนการที่สาม หลังจากเกิดปฏิกิริยาจนได้ $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ที่อยู่ในสถานะของของเหลวบนแผ่นวัสดุรองรับ เมื่อหยุดการระเหยสาร(ธาตุ)และหยุดให้ความร้อนแก่แผ่นวัสดุรองรับแล้ว อุณหภูมิของแผ่นวัสดุรองรับจะลดลงมาจนถึงอุณหภูมิห้อง ทำให้ $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ที่อยู่ในสถานะของของเหลวกลายสภาพเป็น $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ ที่อยู่ในสถานะของของแข็ง ซึ่งก็คือ ฟิสิกส์บาง $\text{Cu}(\text{In}_{1-x}\text{Ga}_x)\text{Se}_2$ นั้นเอง