

บทที่ 2

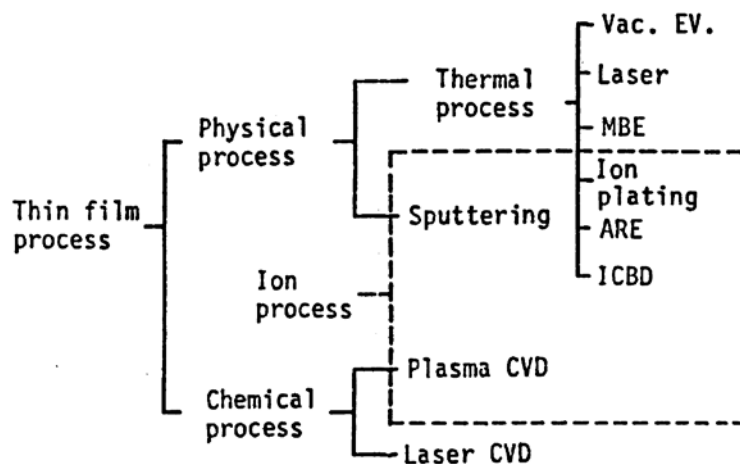
เวกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ

การเคลือบในสุญญากาศ (Vacuum Deposition) คือ การเรียงตัว (Fabricated) โดยการตกเคลือบ (Deposition) ของสารเคลือบในลักษณะอะตอมเดี่ยวบนวัสดุรองรับ (Substrate) จนเกิดเป็นชั้นฟิล์มที่บางในระดับนาโนเมตรถึงไมโครเมตร จึงอาจกล่าวได้ว่า “ฟิล์มบาง (Thin Film)” คือ ชั้นของอะตอมหรือกลุ่มของอะตอมที่จับรวมกันเป็นชั้นบาง ๆ” การระบุว่าฟิล์มใดเป็น “ฟิล์มบาง” นั้นอาจพิจารณาได้จากลักษณะการใช้งานว่าใช้สมบัติด้านใดของฟิล์ม กล่าวคือ ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงผิว (Surface Properties) เรียกว่า “ฟิล์มบาง” แต่ถ้าเป็นการใช้สมบัติเชิงปริมาตร (Bulk Properties) จะเรียกว่า “ฟิล์มหนา” จะเห็นว่า ฟิล์มเดียวกันนั้นอาจเป็นทั้ง “ฟิล์มบาง” หรือ “ฟิล์มหนา” ก็ได้ ขึ้นกับลักษณะการใช้งานเป็นสำคัญ (Bunshah, 1994)

การเคลือบฟิล์มบางเป็นกระบวนการที่ทำให้สารเคลือบตกเคลือบลงบนผิววัสดุรองรับที่ต้องการ ซึ่งสามารถทำได้ทั้งกระบวนการทางเคมีหรือกระบวนการทางฟิสิกส์ โดยพื้นฐานแล้วกระบวนการเคลือบฟิล์มบางมีขั้นตอนสำคัญ 3 ขั้นตอน (Smith, 1995) ดังนี้คือ

1. การสร้างสารเคลือบ (Source) โดยทั่วไปแล้วสารเคลือบอาจอยู่ในรูปของ ของแข็ง ของเหลว ไอ หรือแก๊สก็ได้ แต่สารเคลือบขณะทำการเคลือบนั้นจำเป็นต้องอยู่ในรูปของไอระเหยเท่านั้น ซึ่งวิธีการที่ทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอระเหยสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การให้ความร้อนหรือการระเหยด้วยอุณหภูมิสูง เป็นต้น
2. การเคลื่อนย้ายสารเคลือบมายังวัสดุรองรับ (Transport) ในภาวะสุญญากาศไอระเหยของสารเคลือบอาจจะมีการเคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ไปยังวัสดุรองรับ หรืออาจจะเคลื่อนที่ไปในลักษณะของไหล ซึ่งจะทำให้ไอระเหยของสารเคลือบมีการชนกับอนุภาคอื่นภายในภาชนะสุญญากาศ นอกจากนี้ไอระเหยอาจจะเคลื่อนที่ไปยังวัสดุรองรับในลักษณะของพลาสมาก็ได้
3. การสะสมพอกพูน (Deposition) เป็นขั้นตอนการพอกพูนของสารเคลือบและโตขึ้นจนกลายเป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ขั้นตอนนี้จะขึ้นกับเงื่อนไขของวัสดุรองรับหรือการทำปฏิกิริยาของสารเคลือบกับวัสดุรองรับ ความสะอาดของผิววัสดุรองรับ ตลอดจนพลังงานที่ใช้ในการเคลือบ



ภาพที่ 2-1 ประเภทของกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ (Wasa & Hayakawa, 1992)

การเคลือบฟิล์มในสุญญากาศแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มได้ (Wasa & Hayakawa, 1992) (ภาพที่ 2-1) ได้แก่

1. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางเคมี (Chemical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสภาพของแก๊สแล้วเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ (New Species) ตกเคลือบบนวัสดุรองรับ เช่น วิธี Plasma CVD และ วิธี Laser CVD เป็นต้น

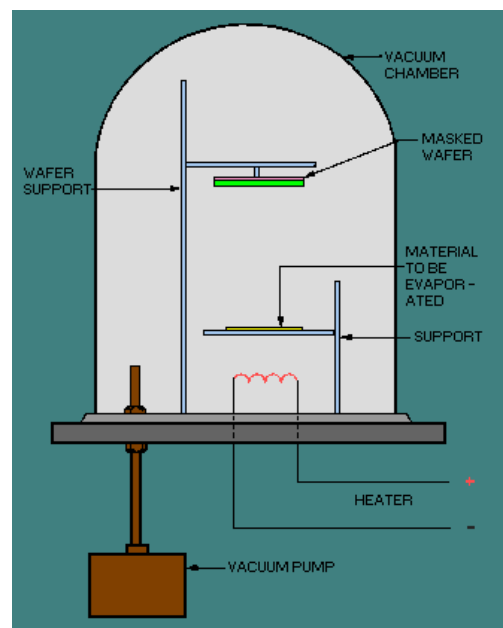
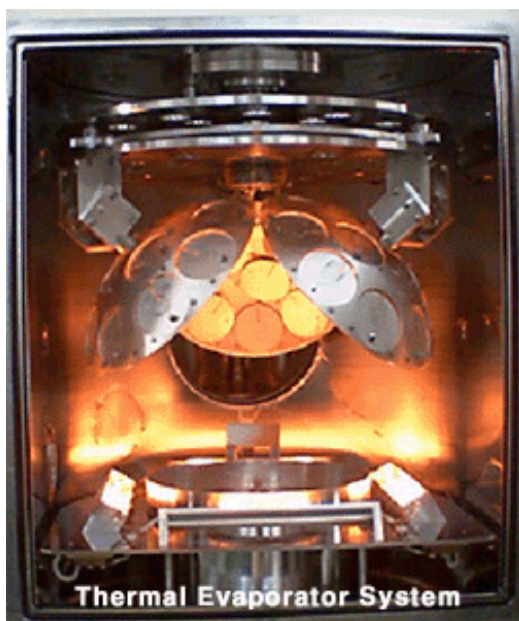
2. การเคลือบฟิล์มบางด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์ (Physical Process) เป็นการเคลือบที่อาศัยการทำให้อะตอมของสารเคลือบหลุดออกจากผิวแล้วฟุ้งกระจายหรือวิ่งเข้าไปจับและยึดติดกับผิวของวัสดุรองรับ เช่น วิธีระเหยสาร (Evaporation) และ วิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นต้น

การเคลือบในสุญญากาศด้วยกระบวนการทางฟิสิกส์แบ่งได้เป็น 2 วิธีหลัก ๆ (พิเศษรู้ สัมสุวรรณ และธนัสถารัตน์, 2547; Wasa & Hayakawa, 1992) คือ

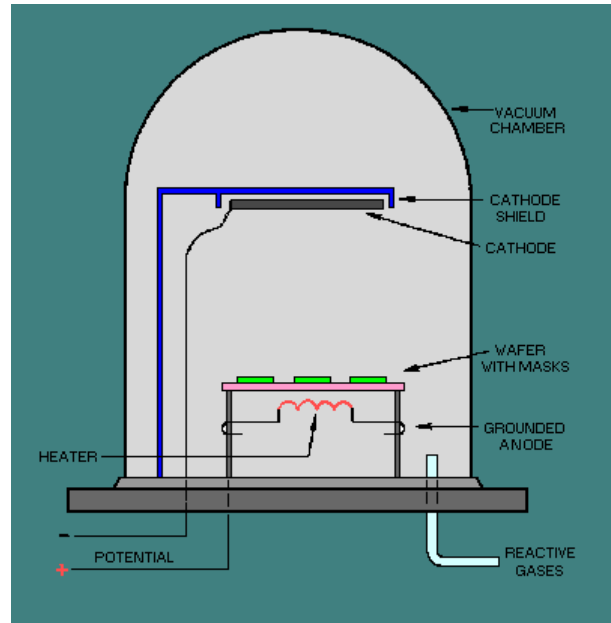
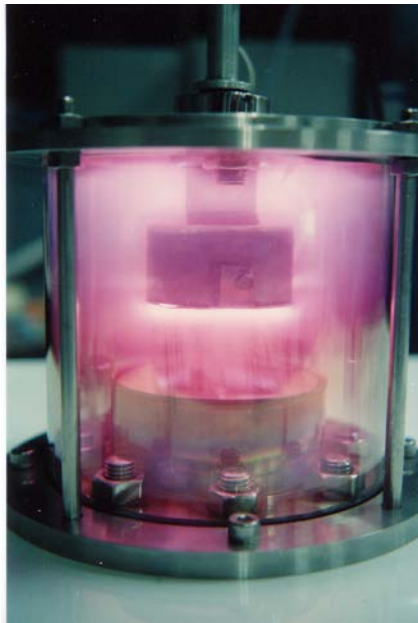
1. การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร (Evaporation) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ทำให้ระเหยในสุญญากาศ โดยการให้ความร้อนที่มากพอที่จะทำให้สารเคลือบกลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการควบแน่นของสารเคลือบและพอกพูนต่อเนื่องกันเป็นชั้นของฟิล์มบาง การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (Resistive Heating) การระเหยแบบวาบแสง (Flash Evaporation) การระเหยด้วยเลเซอร์ (Laser Evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (Electron Beam Evaporation)

การอาร์ค (Arc Evaporation) การให้ความร้อนด้วยคลื่นความถี่วิทยุ (Radiofrequency Heating)

2. การเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง (Sputtering) เป็นการพอกพูนของชั้นฟิล์มบางของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริง การเคลือบด้วยวิธีนี้เกิดขึ้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงวิ่งเข้าชนวัสดุรองรับและมีการพอกพูนเป็นฟิล์มบางในที่สุด กระบวนการสปัตเตอริงคือการทำให้อะตอมหลุดจากผิวของวัสดุโดยการชนของอนุภาคพลังงานสูงโดยมีการแลกเปลี่ยนพลังงานและโมเมนตัมระหว่างอนุภาคที่วิ่งเข้าชนกับอะตอมที่ผิวสารเคลือบเนื่องจากไอออนที่ได้จากกระบวนการสปัตเตอริงจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงกว่าวิธีการระเหยสารมาก ดังนั้นเมื่ออะตอมของสารเคลือบวิ่งเข้ามากระทบกับพื้นวัสดุรองรับก็จะฝังตัวแน่นลงในเนื้อวัสดุที่ต้องการเคลือบมากกว่าวิธีระเหยสาร ดังนั้นการเคลือบด้วยวิธีสปัตเตอริง จะทำให้การยึดเกาะระหว่างสารเคลือบกับวัสดุรองรับดีกว่า



ภาพที่ 2-2 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร

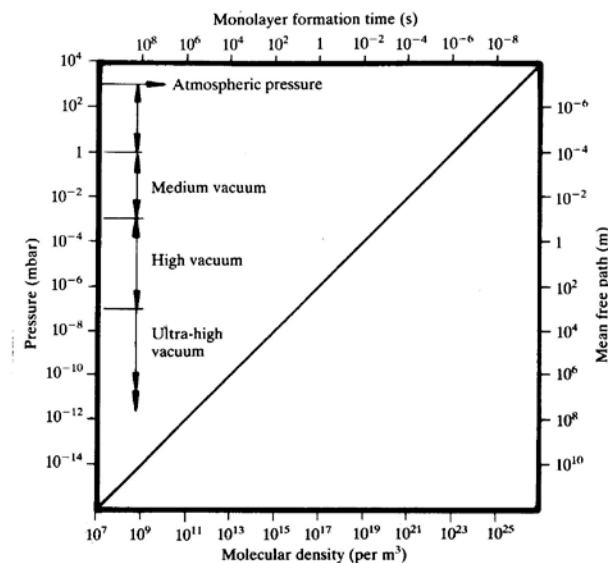


ภาพที่ 2-3 ระบบการเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีสปัตเตอร์

2.2 สภาวะสุญญากาศกับการเคลือบ

การเคลือบในสุญญากาศอะตอมของสารเคลือบในกระบวนการเคลือบอาจอยู่ในลักษณะของโมเลกุลอะตอมหรือกลุ่มอะตอมของสารเคลือบจากวิธีต่างๆ เช่น การให้ความร้อน หรือ การถ่ายเทโมเมนตัม ทั้งนี้หากความดันในห้องเคลือบมีค่าสูง กรณีนี้ห้องเคลือบมีปริมาณอะตอมของแก๊สจำนวนมาก ทำให้เมื่ออะตอมของสารเคลือบภายใต้สภาวะความดันบรรยากาศ อะตอมของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปอาจเกิดการชนกับอะตอมของแก๊สที่มีอยู่จำนวนมาก ทั้งนี้จากการชนกันหลายๆ ครั้ง จะทำให้อะตอมของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปสู่สภาวะพลังงานไม่มาก เมื่ออะตอมของสารเคลือบพลังงานลดลงก็จะควบแน่นเป็นอนุภาคของแข็ง ซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ไปติดบนผิววัสดุรองรับได้ ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องมีลดปริมาณโมเลกุลของแก๊สที่มีอยู่ โดยทำให้เป็นสุญญากาศ เนื่องจากในภาวะสุญญากาศปริมาณโมเลกุลของแก๊สในบรรยากาศจะลดลง อะตอมของสารเคลือบที่ระเหยขึ้นไปจึงมีโอกาสชนกับโมเลกุลของแก๊สน้อยลง ทำให้อะตอมของสารเคลือบสูญเสียพลังงานน้อยและสามารถเคลื่อนที่ไปติดบนผิววัสดุต่างๆ ได้

ระยะทางเฉลี่ยของโมเลกุลที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้ก่อนที่จะเกิดการชน ณ อุณหภูมิและความดันใดๆ เรียกว่า ระยะปลดออกการชนเฉลี่ย (mean free path ; MFP) ดังภาพที่ 2-4 แสดงความสัมพันธ์ของ MFP กับ ความดันที่อุณหภูมิ 25 °C ซึ่งเป็นเวลาก่อตัวเป็นชั้นบางๆ (monolayer) บนผิววัสดุ เช่น ภาพที่ 2-4 ที่ความดัน 1×10^{-6} mbar โมเลกุลมีค่า MFP เท่ากับ 6.4×10^3 cm และใช้เวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุประมาณ 1 วินาที จากภาพที่ 2-4 จะเห็นว่าความดันใช้งานที่ต่ำลงหรือมีความเป็นสุญญากาศมากขึ้นนั้นจะทำให้ค่า MFP ของโมเลกุลแก๊สเพิ่มขึ้น ดังนั้นในงานเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศจึงจำเป็นต้องเคลือบภายในสภาวะความเป็นสุญญากาศมาก



ภาพที่ 2-4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าระยะปลดออกการชนเฉลี่ย ความหนาแน่นของแก๊ส และเวลาในการก่อตัวเป็นชั้นบางๆ บนผิววัสดุ ที่เป็นฟังก์ชันของความดันที่ อุณหภูมิ 25 °C

2.3 การก่อเกิดฟิล์มบาง

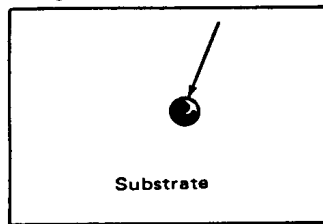
การเกิดฟิล์มบางจากกระบวนการเคลือบฟิล์มบางในสุญญากาศ Chapman (1980) ได้อธิบายไว้ดังนี้เมื่อสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดสารเคลือบเคลื่อนที่มาถึงวัสดุรองรับ สารเคลือบที่กระทบผิววัสดุรองรับส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของอะตอมหรือโมเลกุล (ภาพที่ 2-5 (a)) โดยพลังงานพันธะ (Bonding Energy) ระหว่างอะตอมของสารเคลือบกับวัสดุรองรับและอุณหภูมิของวัสดุรองรับ จะเป็นตัวกำหนดความสามารถในการแพร่ (Diffusion) ของสารเคลือบบนผิววัสดุรองรับ อะตอมของสารเคลือบจะตกกระทบผิววัสดุรองรับในตำแหน่งที่เรียกว่าตำแหน่งการดูดซับ (Adsorption Site) ทำ

ทำให้เกิดการเกาะติดหรือถ้ามีพลังงานมากพอก็อาจกระโดดข้ามกำแพงพลังงานไปยังบริเวณที่อยู่ติดกันหรือหลุดออกจากตำแหน่งนั้นไป (ภาพที่ 2-5 (b)) ในช่วงเวลาหนึ่งอะตอมสารเคลือบอาจเกิดการระเหิดกลับและเกิดการรวมตัวกันระหว่างอะตอมที่มีการแพร่ด้วยกัน เมื่ออะตอมของสารเคลือบรวมตัวกันอาจเกิดเป็นอะตอมคู่ (ภาพที่ 2-5 (c)) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าอะตอมเดี่ยว (Single Atom) ซึ่งการรวมตัวกันของอะตอมนั้นจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอะตอมเดี่ยวและอัตราเคลือบ (Deposition Rate) อะตอมคู่อาจรวมตัวกับอะตอมเดี่ยวอื่นแล้วกลายเป็นสามอะตอม (Triplets) หรือสี่อะตอม (Quadruplets) หรืออื่น ๆ ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า สภาวะการเกิดนิวเคลียส (ภาพที่ 2-5 (d)) ทำให้เกิดกลุ่มอะตอมกึ่งเสถียร (Quasi-Stable Islands) จากนั้นกลุ่มอะตอมจะเริ่มโตขึ้นเรียกว่า การโตเป็นกลุ่มก้อน (Island Growth) ขนาดของกลุ่มอะตอมจะใหญ่ขึ้น โดยมีจำนวนอะตอมเท่าเดิม หรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 2-5 (e) และ 2-5 (f)) การโตของกลุ่มอะตอมนี้จะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนกระทั่งขอบของแต่ละกลุ่มอะตอมชนกัน เรียกว่า การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอม (Agglomeration หรือ Coalescence) (ภาพที่ 2-5 (g)) จากการศึกษาด้วยเทคนิค Transmission Electron Microscopy (TEM) พบว่าขณะที่กลุ่มอะตอมรวมกันเป็นก้อนอะตอมจะมีพฤติกรรมคล้ายของเหลว (Liquid-Like Behaviour) และมีการจัดเรียงทิศทางในเชิงผลึกวิทยา (Crystallographic Orientation) ด้วย การรวมกันเป็นก้อนของกลุ่มอะตอมจะเกิดขึ้นจนกระทั่งเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่อง (ภาพที่ 2-5 (h)) แต่ในบางกรณีการเชื่อมต่อกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์เมื่อฟิล์มมีความหนาโดยเฉลี่ยประมาณ $0.04 - 0.05 \mu\text{m}$ ลักษณะผิวของฟิล์มบางขณะเกิดการรวมกลุ่มอะตอมจะตูดคล้ายเนินเขาและหุบเขา

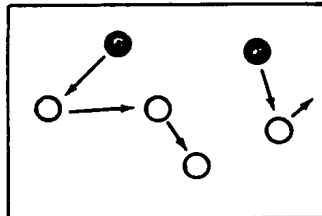
เมื่อพิจารณาการเกิดฟิล์มในสภาวะที่เป็นกลุ่มอะตอม (Island) พบว่าอาจเป็นกลุ่มของผลึกเดี่ยวหรือกลุ่มของผลึกคู่หรือมากกว่านั้น ซึ่งกลุ่มอะตอมเหล่านี้จะตกเคลือบลงบนวัสดุรองรับที่เป็นวัสดุหยาบผลึก ทิศทางการจัดเรียงตัว (Orientation) ของแต่ละกลุ่มอะตอมนั้นจะเป็นแบบสุ่ม (Random) ทำให้ได้ฟิล์มบางที่มีโครงสร้างเป็นหลายผลึกด้วย แต่ถ้ากลุ่มอะตอมเหล่านี้ตกเคลือบบนวัสดุรองรับที่เป็นผลึกเดี่ยว การจัดเรียงตัวของฟิล์มก็จะมีลักษณะเป็นผลึกเดี่ยว และเรียกการเกิดฟิล์มแบบผลึกเดี่ยวประเภทนี้ว่า เอพิแทกซี (Epitaxy)

ถ้าอะตอมที่ผิวของวัสดุรองรับมีพลังงานเพียงพอ อะตอมเหล่านั้นจะเคลื่อนที่เพื่อเลื้อยเข้าไปอยู่ในตำแหน่งที่มีพลังงานต่ำกว่าเสมอ ทั้งนี้ความสามารถในการเคลื่อนที่ (Mobility) ของอะตอมจะเพิ่มขึ้น ถ้าอุณหภูมิที่ผิววัสดุรองรับสูงขึ้น นอกจากนั้นการลดอัตราเคลือบยังสามารถช่วยให้การโตของผลึกเกิดได้ดียิ่งขึ้น เพราะอะตอมมีเวลาในการไต่มาพอดังนั้นถ้าอุณหภูมิของวัสดุรองรับสูงและมีอัตราเคลือบต่ำจะได้ฟิล์มที่มีขนาดของเกรนใหญ่ขึ้น มีขอบเกรนน้อยลง และได้ฟิล์มที่มีความหนาเพียงพอสำหรับการเชื่อมต่อกันอย่างสมบูรณ์ ในทางกลับกันถ้าอุณหภูมิวัสดุรองรับต่ำต่ออัตราเคลือบสูงก็จะให้ผลลักษณะเดียวกัน

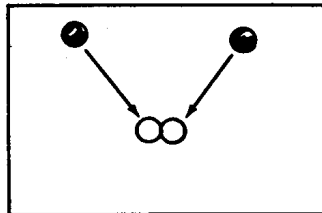
(a) Single Atom Arrives



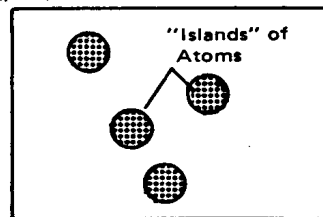
(b) Migration Re-evaporation



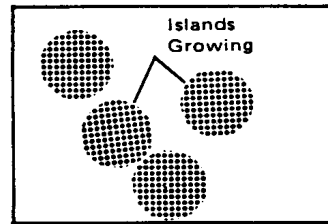
(c) Collision & Combination of Single Atoms



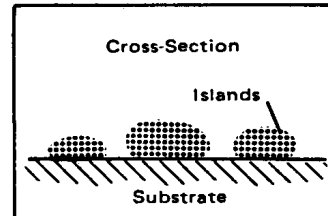
(d) Nucleation



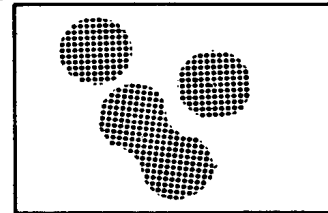
(e) Growth



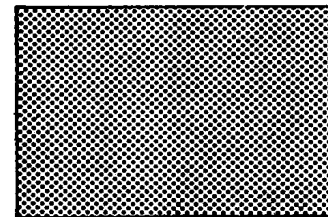
(f) Island Shape



(g) Coalescence



(h) Continuity



ภาพที่ 2-5 การก่อเกิดฟิล์มบาง (Chapman, 1980)

2.4 การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีระเหยสาร

การเคลือบในสุญญากาศทำได้หลายวิธี ซึ่งไม่ยุ่งยาก วิธีหนึ่งที่ได้รับความสะดวกและมีประสิทธิภาพคือ การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร ทำได้โดยให้ความร้อนกับสารเคลือบซึ่งอยู่ในสถานะของแข็ง ถ้าความร้อนที่ให้กับสารเคลือบมากพอ จะทำให้สารเคลือบนั้นเปลี่ยนสถานะจากของแข็งกลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายภายในภาชนะสุญญากาศ เมื่อไอของสารเคลือบไปกระทบกับวัสดุรองรับที่อุณหภูมิเหมาะสมก็จะควบแน่นเป็นของแข็งจับเกาะติดอยู่บนวัสดุรองรับ การให้ความร้อนในการระเหยสารเคลือบทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่นิยมใช้และไม่ยุ่งยากคือการให้ความร้อนแก่ภาชนะบรรจุสารเคลือบด้วยวิธีทางไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีวิธีอื่น เช่น การให้ความร้อนจากตัวต้านทาน (resistive heating) การระเหยด้วยเลเซอร์ (laser evaporation) การระเหยด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam evaporation) การระเหยด้วยการอาร์ค (arc evaporation) เป็นต้น การเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้นิยมใช้ในการเคลือบสารไดอิเล็กตริก (dielectric) เช่น แมกนีเซียมฟลูออไรด์ (MgF_2) หรือ ออกไซด์ (oxide) ของโลหะที่มีสมบัติโปร่งใสบนวัตถุที่ต้องการเคลือบ เช่น เลนส์ กล้องถ่ายรูป แว่นตาและกระจกเลนเซอร์ ฯลฯ ข้อเสียของการเคลือบฟิล์มบางด้วยวิธีนี้คือการบดตีตบไม่ตบนักจึงต้องอาศัยการอบด้วยความร้อนหรือวิธีอื่นช่วยให้การยึดเกาะของสารเคลือบดีขึ้น นอกจากนี้ฟิล์มบางที่ได้จากวิธีการนี้เปื้อนของสารที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารเคลือบได้ ถ้าภาชนะบรรจุสารเคลือบมีจุดหลอมเหลวต่ำหรือใกล้เคียงกับสารเคลือบ

1. แนวคิดเบื้องต้นเกี่ยวกับการเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร

การเคลือบด้วยวิธีระเหยสาร พิจารณาได้ดังนี้ ถ้ามีสารชนิดหนึ่ง (สารเคลือบ) บรรจุอยู่ในภาชนะปิด ซึ่งสูบล้ออากาศออกจนมีความดันต่ำมาก ถ้าเริ่มต้นทำให้สารมีอุณหภูมิต่ำกว่าหนึ่ง ซึ่งความดันไอหรือความดันแก๊สต่ำกว่าที่มาตรวัดความดันจะวัดได้ ต่อมาถ้าเราเพิ่มอุณหภูมิของภาชนะบรรจุสารให้สูงขึ้นและคงไว้ที่ระดับหนึ่งจะระเหยของสารดังกล่าวจะเริ่มระเหย หรือ ระเหิด จาก ผิวของสารในภาชนะดังกล่าว ความดันในภาชนะจะเพิ่มขึ้นและสมดุลอยู่ที่ความดันหนึ่งซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของสารที่อยู่ในภาชนะบรรจุที่อุณหภูมิหนึ่ง ที่ความดันนี้จะระเหยออกจนกระทั่งผิวของสารแล้วเกิดการกลั่นตัวบนผิวของสารจะเท่ากับอะตอมที่ระเหยออกจากผิวของสาร ทำให้ความดันไม่เปลี่ยนแปลง ซึ่งความดันสมดุลของแก๊ส (equilibrium gas pressure) ที่อุณหภูมิที่กำหนดนี้ ก็คือความดันไอของสาร (vapor pressure) ที่อุณหภูมินั้น

การทำให้สาร (สารเคลือบ) เกิดการระเหยในสุญญากาศ จะมีภาชนะที่ใช้บรรจุสารซึ่งภาชนะนี้จะสามารถให้ความร้อนกับสารจนถึงอุณหภูมิที่สารมีความดันไอเท่ากับความดันในสุญญากาศที่สารนั้นอยู่ เพื่อไม่ให้เกิดการปนเปื้อนในสารที่ใช้สำหรับการเคลือบ ภาชนะที่รองรับจะต้องสะอาดและไม่เกิดการระเหยที่อุณหภูมิใช้งาน ชนิดของวัสดุที่ใช้เป็นภาชนะรองรับจะต้องไม่ทำปฏิกิริยากับสารที่จะทำการระเหย นอกจากนี้รูปร่างของภาชนะที่ใช้บรรจุสารจะมีลักษณะขึ้นกับสารที่ใช้

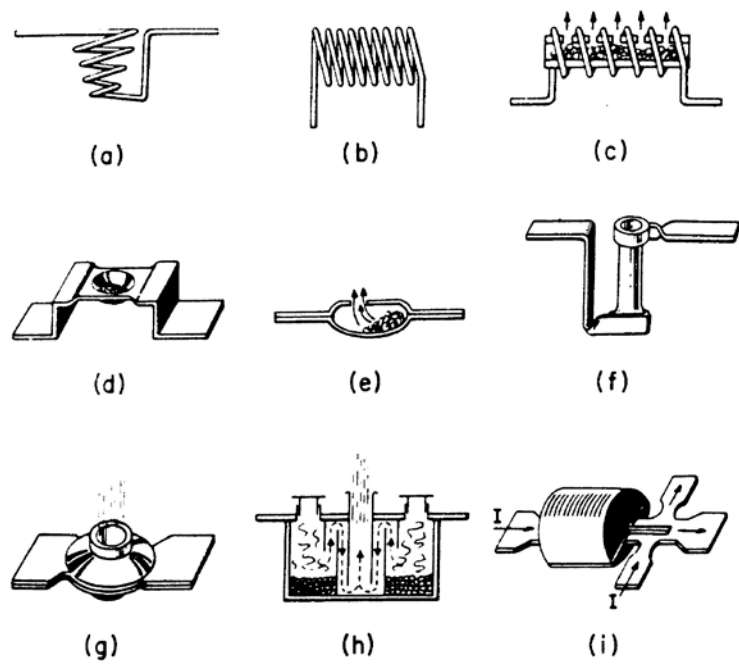
การเคลือบด้วยวิธีระเหยสารเป็นเทคนิคการเคลือบในสุญญากาศเทคนิคหนึ่งที่น่าสนใจเนื่องจากทำได้ค่อนข้างง่ายไม่ยุ่งยาก แนวคิดการเคลือบด้วยวิธีระเหยสารทำได้โดยการให้พลังงานความร้อนแก่สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอ หลุดขึ้นไปเกาะตัวกันเป็นฟิล์มบางบนผิวชิ้นงานที่ต้องการเคลือบ (วัสดุรองรับ ที่เรียกว่า substrate) อย่างไรก็ตามวิธีการเคลือบด้วยวิธีนี้ไม่สามารถใช้กับสารที่มีจุดหลอมเหลวสูงมากๆ เช่น ทังสเตน เป็นต้น

สำหรับวิธีการเคลือบในสุญญากาศโดยการระเหยสารนี้สามารถแบ่งได้ตามชนิดของแหล่งให้พลังงานความร้อนที่เป็นตัวทำให้สารเคลือบเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นไอ ได้แก่

1. การระเหยสารด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดตัวต้านทาน (resistance heated sources) ใช้วิธีการจ่ายไฟฟ้ากำลังสูงเข้าไปยังขดลวดหรือแผ่นโลหะที่ใช้เป็นตัวกำเนิดความร้อน ซึ่ง ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะถ่ายเทไปยังสารเคลือบแล้วทำให้สารเคลือบระเหยกลายเป็นไอ

2. การระเหยสารด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนชนิดขดลวดเหนี่ยวนำ (induction heated sources) เป็นการนำขดลวดมาพันรอบถ้วยใส่สาร (crucible) แล้วจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเข้าไป ทำให้เกิดการเหนี่ยวนำไฟฟ้าขึ้นภายในเนื้อสารเคลือบ จนสารเคลือบเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ

3. การระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน (electron beam heated sources) เป็นการรวมพลังงานจุดของอิเล็กตรอนจำนวนมากเป็นจุดเล็กๆ ลงไปยังเนื้อสารเคลือบ เพื่อทำให้สารเคลือบเกิดความร้อนและระเหย กลายเป็นไอ สารเคลือบที่ต้องการเคลือบด้วยวิธีนี้จะถูกบรรจุอยู่ในถ้วยใส่สารซึ่งมักทำจากอลูมินา (alumina) หรือ ทองแดง โดยถ้วยใส่สารดังกล่าวนี้จะต้องมีการหล่อเย็นอยู่ตลอดเวลาที่ยิงลำอิเล็กตรอน เพื่อป้องกันไม่ให้ถ้วยถูกหลอมไปด้วย



ภาพที่ 2-6 ตัวให้ความร้อนสำหรับการเคี้ยวแบบระเหยสารชนิดตัวตันทาน

2. การระเหยสารในสุญญากาศ

การก่อตัวของชั้นเคลือบของสารที่ได้จากการระเหยในสุญญากาศ ทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อนคือ การให้ความร้อนกับสารที่มีเป็นของแข็ง ในสภาวะสุญญากาศ ทั้งนี้ถ้าความร้อนที่ให้มากพอจะทำให้สารเคลือบนั้นระเหยกลายเป็นไอ ซึ่งเมื่อไอของสารเคลือบเคลื่อนที่ไปกระทบกับวัสดุรองรับที่มีอุณหภูมิเหมาะสมก็จะเกิดการกondensation เป็นชั้นของฟิล์มบางบนวัสดุรองรับ ทั้งนี้สารหลายชนิดสามารถระเหยได้ในสุญญากาศและกลั่นตัวเป็นฟิล์มที่มีสถานะเป็นของแข็งบนวัสดุรองรับซึ่งมีหลายชนิด ทั้งนี้วัสดุรองรับจะต้องได้รับการควบคุมให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสม ซึ่งอุณหภูมินี้จะขึ้นอยู่กับสมบัติของฟิล์มแต่ละชนิดที่ต้องการ โดยอุณหภูมิที่ใช้ในการระเหยสารเคลือบจากของแข็งให้กลายเป็นไอจะต่ำกว่าเมื่ออยู่ในความดันบรรยากาศปกติ โดยทั่วไปความดันที่ใช้ในการระเหยสารในสภาวะสุญญากาศจะมีค่าประมาณ 10^{-5} mbar ที่ความดันนี้การเคลื่อนตัวของไอสารเคลือบจากแหล่งกำเนิดไปยังวัสดุรองรับที่อยู่ห่างออกไปเป็นระยะประมาณ 10-50 cm จะอยู่ในแนวเส้นตรง ทั้งนี้การระเหยของสารเคลือบสามารถอธิบายได้ดังนี้

อัตราการระเหยของสารมากที่สุดจากผิวที่มีพื้นที่ A_e หาได้จากสมการของ Knudsen

$$\frac{dN_e}{A_e dt} = (2\pi mKT)^{-1/2} P_e \quad \text{..... (2-1)}$$

เมื่อ dN_e คือ จำนวนโมเลกุลมากที่สุดที่ระเหยออกจากผิวในช่วงเวลา dt
 P_e คือ ความดันสมดุล (equilibrium pressure)
 m คือ มวลของโมเลกุล

สำหรับอัตราการระเหยของมวล m_e จากผิวหนึ่งหน่วยในสุญญากาศ จะเป็นไปตามสมการ Langmuir คือ

$$m_e = 5.83 \times 10^{-2} P_e \left(\frac{M}{T} \right)^{1/2} \quad \text{..... (2-2)}$$

หรือ

$$N_e = 3.513 \times 10^{22} P_e \left(\frac{1}{MT} \right)^{1/2} \quad \text{..... (2-3)}$$

เมื่อ T คือ อุณหภูมิ
 M คือ น้ำหนักโมเลกุลของสารที่เป็นไอ
 P_e คือ ความดัน

ในกรณีที่การเกิดฟิล์มของสารเคลือบบนวัสดุรองรับที่เกิดจากการระเหยของสารต้นกำเนิดที่มีขนาดเล็กจนถือว่าเป็นจุด สะอาด และอัตราการระเหยเป็นไปอย่างสม่ำเสมอ อัตราการเกิดฟิล์มบนวัสดุรองรับที่เป็นแผ่นราบจะเป็นไปตาม Knudsen's cosine law คือแปรผันตาม $\cos\theta/r^2$ เมื่อ r เป็นระยะจากแผ่นรองรับถึงต้นกำเนิดไอ และ θ เป็นมุมที่ r ทำกับแนวเส้นตรงที่ตั้งฉากกับแผ่นรองรับ ถ้าให้ d_0 เป็นความหนาของการเกิดฟิล์มที่กึ่งกลางแนวตั้งเหลือจุดที่เป็นต้นกำเนิดเป็นระยะทาง h และ d เป็นความหนาของฟิล์มที่ระยะ l จากแนวกึ่งกลาง จะได้ความสัมพันธ์ของ d/d_0 ตามสมการ

$$\frac{d}{d_o} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1}{h}\right)^2\right]^{3/2}} \quad \text{..... (2-4)}$$

ถ้าต้นกำเนิดไอเป็นพื้นที่เล็กๆ การกระจายความหนาจะเป็นตามสมการ

$$\frac{d}{d_o} = \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{1}{h}\right)^2\right]^2} \quad \text{..... (2-5)}$$

ปกติแล้วการเคลื่อนที่ของฟิล์มบนวัสดุรองรับที่มีลักษณะเป็นแผ่นเรียบ นอกจากอะตอมของสารเคลือบจะตกเคลือบบนแผ่นรองรับแล้ว ยังมีโมเลกุลของแก๊สชนิดอื่นๆ ที่หลงเหลืออยู่ในสถานะสุญญากาศที่กระทบกับวัสดุรองรับ แก๊สที่เหลืออยู่นี้จะผลิตโดยตรงต่อการเกิดฟิล์มและสมบัติของฟิล์ม เนื่องจากแก๊สเหล่านี้สามารถชนกับอะตอมของไอสารเคลือบที่ระเหยจากต้นกำเนิดที่อยู่ระหว่างต้นกำเนิดกับวัสดุรองรับ โดยจำนวนครั้งของการชนจะขึ้นอยู่กับระยะปลอดการชนเฉลี่ย หรือ MFP

ทั้งนี้ถ้าให้ N เป็นจำนวนอะตอมที่สามารถเคลื่อนที่ไปได้เป็นระยะทาง L โดยปราศจากการชนกับอะตอมอื่น จะพบว่า

$$N = N_0 \exp\left(\frac{-L}{\lambda}\right) \quad \text{..... (2-6)}$$

โดยที่ λ เป็นค่าระยะปลอดการชนเฉลี่ยของแก๊สที่เหลืออยู่ในสถานะสุญญากาศ ทั้งนี้การชนกันของโมเลกุลแก๊สหนึ่ง จะน้อยลงเมื่อความดันในสถานะสุญญากาศมีค่าลดลง ซึ่งพบว่าที่ความดันต่ำระดับ 10^{-5} mbar การชนกันจะน้อยมากและโมเลกุลของไอสารเคลือบจะมีการเคลื่อนที่ในแนวเส้นตรง

แก๊สที่หลงเหลืออยู่ภายในสถานะสุญญากาศจะทำให้ฟิล์มที่เคลือบบนวัสดุรองรับมีการปนเปื้อน โมเลกุลของแก๊สที่เหลืออยู่จะชนกับวัสดุรองรับ ขณะที่เกิดการก่อตัวของฟิล์ม อัตราการชนของโมเลกุลแก๊สกับวัสดุรองรับนี้จะเป็นไปตามสมการ

$$N_g = 3.513 \times 10^{22} \frac{P_g}{(M_g T_g)^{1/2}} \quad \text{..... (2-7)}$$

เมื่อ P_g คือ ความดันสัมบูรณ์ของแก๊สที่อุณหภูมิ T_g

- ลักษณะของเครื่องเคลือบในสุญญากาศด้วยวิธีระเหยสาร
เครื่องเคลือบในสุญญากาศแบบวิธีระเหยสารโดยทั่วไปประกอบด้วยอุปกรณ์พื้นฐาน ดังนี้

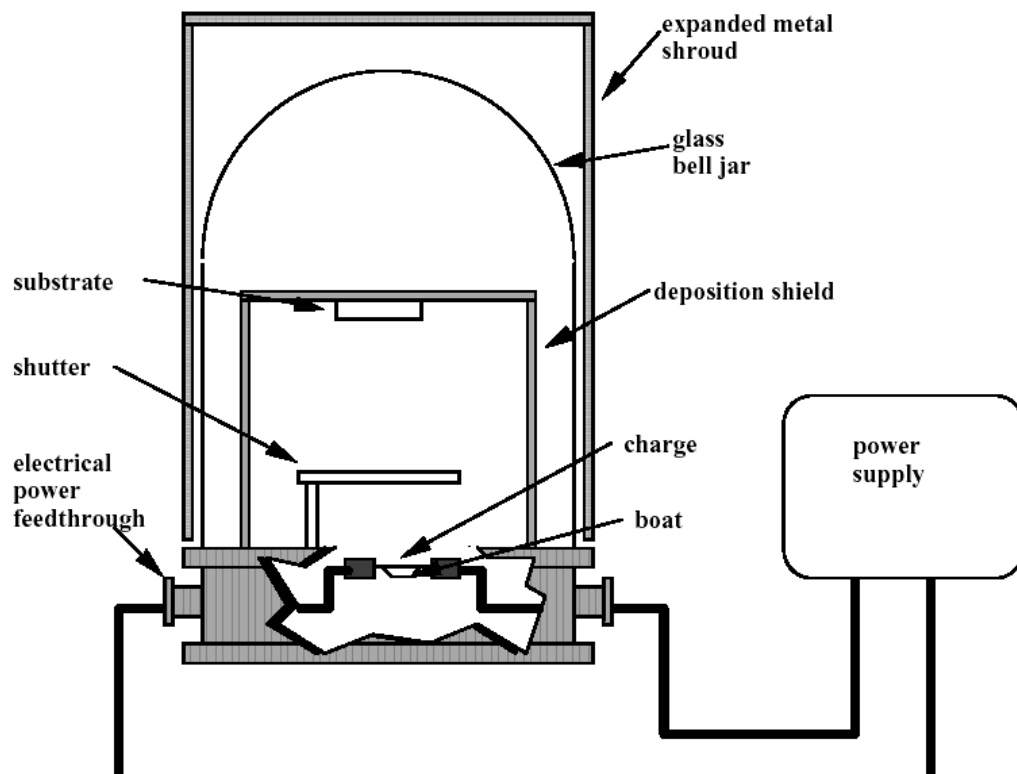
1. ภาชนะสุญญากาศ หรือ ห้องเคลือบสุญญากาศ (vacuum chamber) ทำจากสแตนเลส เนื่องจากมีความทนทาน แข็ง ไม่เป็นสนิม ดูแลรักษาง่าย ที่สำคัญสแตนเลส มีปริมาณแก๊สละตรึมในเนื้อน้อย ทำให้ง่ายต่อการสร้างสภาวะสุญญากาศ เนื่องจากไม่เกิดการคายแก๊ส

2. เครื่องสูบลสุญญากาศ (vacuum pump) สำหรับสร้างสภาวะสุญญากาศในภาชนะสุญญากาศมีหลายแบบ สำหรับระบบพื้นฐานที่ต้องการความดันในช่วง 10^{-7} - 10^{-5} mbar นั้นจะประกอบด้วยเครื่องสูบลอย่างน้อย 2 ชนิด ได้แก่ เครื่องสูบลโรตารี ทำหน้าที่ลดความดันจากบรรยากาศ (ประมาณ 10^3 mbar) จนถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar จากนั้นจึงใช้เครื่องสูบลแบบแพร่โอ ลดความดันต่อจนถึงความดันที่ต้องการ

3. มาตรวัดความดัน (pressure gauge) เป็นอุปกรณ์วัดความดันภายในภาชนะสุญญากาศ มาตรวัดความดันจะมีหลายชนิด แต่ละชนิดจะอาศัยหลักการในการวัดความดันต่างกัน โดยพื้นฐานแล้วระบบสุญญากาศจะประกอบด้วยมาตรวัดความดัน 2 ชนิด ได้แก่ มาตรวัดความดันต่ำ วัดความดันเต็ในช่วง บรรยากาศ (ประมาณ 10^3 mbar) จนถึงความดันประมาณ 10^{-3} mbar เช่น มาตรวัดแบบพิรานี (Pirani gauge) อาศัยหลักการพาความร้อนของแก๊ส โดยถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) ก็จะสามารถพาความร้อนได้ดี แต่ถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การพาความร้อนก็จะไม่ดี และ มาตรวัดความดันสูง วัดความดันน้อยกว่า 10^{-2} mbar เช่น มาตรวัดแบบเพนนิ่ง (Penning gauge) อาศัยการนำไฟฟ้าเนื่องจากการแตกตัวของแก๊ส ถ้าความดันในภาชนะสุญญากาศสูง (มีแก๊สมาก) จะเกิดการแตกตัวของแก๊สมากทำให้น้ำไฟฟ้าได้ดี ในทางกลับกันถ้าความดันต่ำ (มีแก๊สน้อย) การแตกตัวของแก๊สก็จะน้อยทำให้น้ำไฟฟ้าไม่ดี

4. อุปกรณ์ให้ความร้อนแก๊สขึ้นงาน (heater) เพื่อให้ได้ฟิล์มที่มีสมบัติตามที่ต้องการ รวมถึงเพื่อเพิ่มแรงยึดติดของฟิล์มกับวัสดุรองรับ ในการเคลือบบางครั้งจำเป็นต้องใช้ความร้อนร่วมในการเคลือบทำให้ต้องมีชุดให้ความร้อนแก๊สขึ้นงาน ซึ่งอาจเป็นแบบแท่งความร้อน หรือ อินฟราเรด

5. แหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อใช้ในการระเหยสารเคลือบ ส่วนนี้เป็นการให้ความร้อนแก่สารเคลือบเพื่อให้สารเคลือบเปลี่ยนสถานะจากของแข็ง กลายเป็นไอ แล้วฟุ้งกระจายไปทั่วภาชนะสุญญากาศไปกระทบกับวัสดุรองรับซึ่งติดตั้งด้านบน



ภาพที่ 2-7 ลักษณะพื้นฐานของเครื่องเคสอิมในศุญญากาศ