

บทที่ 2

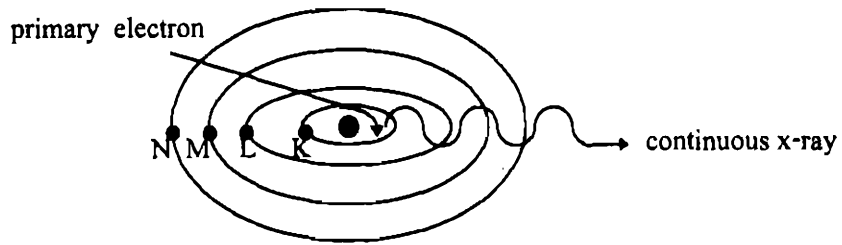
ระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

งานด้านจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ เป็นงานถ่ายภาพด้วยต้นกำเนิดรังสีที่จุดโฟกัสเล็กมากในการศึกษาโครงสร้างจุลภาคของเนื้อวัตถุ ซึ่งให้กำลังขยายและความคมชัดของภาพสูง ปัจจุบันอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์จากลำอิเล็กตรอนของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกนกำเนิดรังสีเอกซ์จากแผ่นฟิล์มโลหะบาง และจัดระบบถ่ายภาพภายในห้องสุญญากาศ ให้กำลังขยายภาพบนฟิล์มในช่วง 20-200 เท่า อย่างไรก็ตามมีกลุ่มนักวิจัยที่ใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่งผ่าน (TEM) และซิงโครตรอน (light synchrotron) เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสที่มีพลังงานสูงกว่า 30 keV ขึ้นไป ในงานด้านจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ด้วย [4]

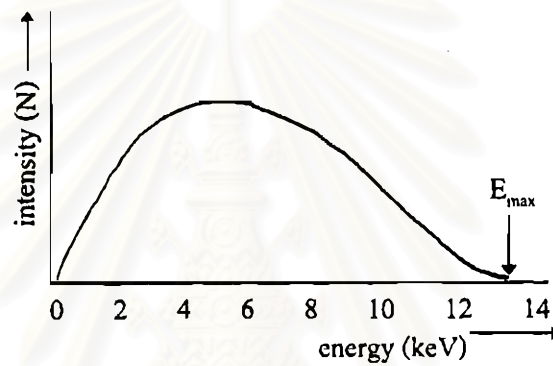
2.1 คุณสมบัติของรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เป็นรังสีที่มีคุณสมบัติเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เกิดขึ้นจากการปลดปล่อยพลังงานหลังจากการเกิดอันตรกิริยาทางนิวเคลียร์ของอะตอมธาตุที่บริเวณชั้น โคจรของอิเล็กตรอนมักจะมี ความยาวคลื่นในช่วงประมาณ 0.0001 ถึง 100 Å (อังสตรอม) ในแถบสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์อาจเกิดได้จากการสลายตัวของสารกัมมันตรังสีตามธรรมชาติ หรือเกิดจาก กลไกทางอิเล็กทรอนิกส์ที่มนุษย์สร้างขึ้น สามารถแบ่งชนิดของรังสีเอกซ์ตามกระบวนการของการปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินจากอะตอมบริเวณชั้น โคจรอิเล็กตรอนได้ 2 ชนิด ดังนี้

2.1.1 รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (continuous x-ray) เป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่อเนื่อง กระจายจากค่าต่ำสุดถึงค่าสูงสุด (บางครั้งเรียกว่า polychromatic หรือ white x-ray) เกิดจากการที่อิเล็กตรอน พลังงานสูงเคลื่อนที่เข้าสู่บริเวณที่มีความหนาแน่นสนามไฟฟ้าสูงระหว่างนิวเคลียสกับวงโคจรชั้น ในของอิเล็กตรอน ความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าสถิตทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างรวดเร็วและปลดปล่อยพลังงานในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ตามปรากฏการณ์ Bremsstrahlung หรือ braking radiation ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.1



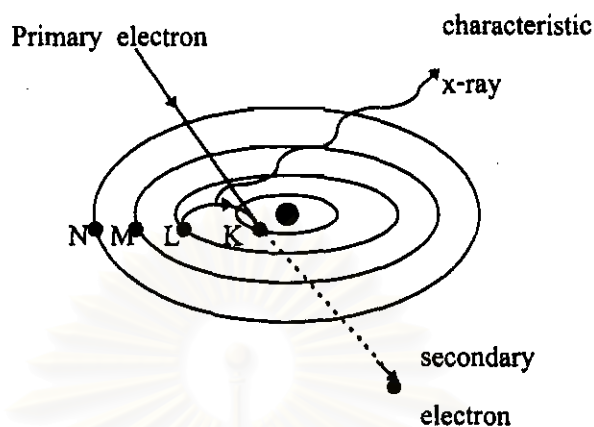
ก. อันตรกิริยาของอะตอมที่ให้รังสีเอกซ์ต่อเนื่อง



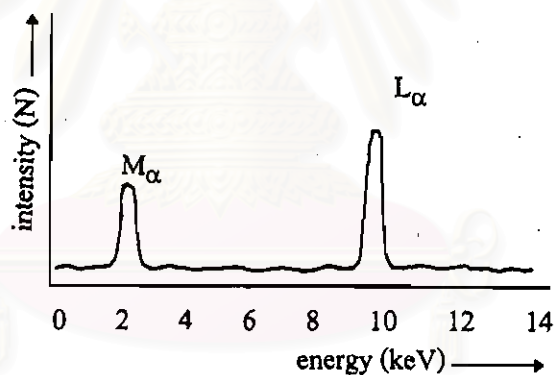
ข. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

รูปที่ 2.1 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

2.1.2 รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (characteristic x-ray) เป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานเดี่ยว (monochromatic) เกิดจากการลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในชั้นโคจรวงนอกแทนที่ว่างของอิเล็กตรอนที่ได้รับการถ่ายโอนพลังงานและหลุดออกไป จึงมีระดับพลังงานที่แน่นอนเฉพาะโครงสร้างอะตอมของธาตุนั้นๆ มีโอกาสเกิดได้จากอิเล็กตรอนพลังงานสูงทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนในชั้นโคจร (K, L หรือ M) หรือถูกรังสีเอกซ์จากอันตรกิริยา bremsstrahlung กระตุ้นแล้วอิเล็กตรอนของชั้นโคจรนั้นหลุดออกมา เกิดที่ว่างของอิเล็กตรอนในชั้นโคจร ทำให้อะตอมอยู่ในสถานะที่ถูกกระตุ้น อะตอมนั้นจะรักษาความสมดุลของโครงสร้างโดยอิเล็กตรอนของวงโคจรชั้นถัดออกไปจะลดระดับพลังงานลงมาด้วยการปล่อยพลังงานที่สูงกว่าออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าเพื่อให้ระดับพลังงานเท่ากับวงโคจรชั้นในก่อนเข้ามาแทนที่ในที่ว่าง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ปล่อยออกมาจะมีพลังงานเท่ากับความแตกต่างของระดับพลังงานยึดเหนี่ยวเฉพาะชั้นโคจรของธาตุนั้นๆ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.2



ก. อันตรกิริยาของอะตอมการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว



ข. สเปกตรัมของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของทองคำ

รูปที่ 2.2 แสดงการเกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัว

สำหรับงานถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์นั้น สามารถจัดแบ่งย่านของรังสีเอกซ์จากลักษณะการใช้งานได้ตามความสามารถในการทะลุทะลวง หรือระดับพลังงานที่ใช้ถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ได้ดังนี้ [1]

ก. รังสีเอกซ์พลังงานสูงมาก (ultrahard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.1 Å (124 keV) ขึ้นไป

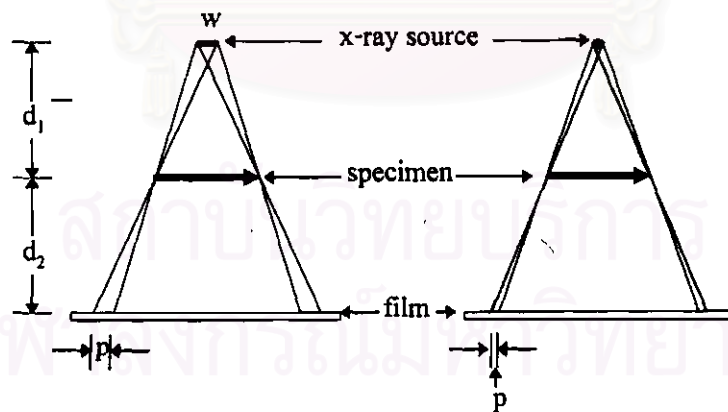
ข. รังสีเอกซ์พลังงานสูง (hard x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 1.0 \AA ถึง 0.1 \AA (12.4 keV ถึง 124 keV)

ค. รังสีเอกซ์พลังงานต่ำ (soft x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 10 \AA ถึง 1.0 \AA (1.24 keV ถึง 12.4 keV)

ง. รังสีเอกซ์พลังงานต่ำมาก (ultrasoft x-ray) จัดอยู่ในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 10 \AA (1.24 keV) ลงไป

2.2 หลักการของกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์

การถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ มีหลักการคล้ายคลึงกับการถ่ายภาพด้วยรังสีเอกซ์ แบบสัมผัสฟิล์ม แต่ใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโครโฟกัสซึ่งมีความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของจุดภาพสูง พร้อมทั้งการจัดระยะของวัตถุตัวอย่างให้ใกล้กับต้นกำเนิดรังสีและห่างจากฟิล์มจะทำให้ภาพถ่ายรังสีเอกซ์มีกำลังขยายเกิดขึ้น อย่างไรก็ตามความคมชัดของขอบภาพจะขึ้นกับขนาดของจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสี ดังแสดงแผนภาพเปรียบเทียบการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่มีขนาดจุดโฟกัสของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่างกัน ดังรูปที่ 2.3 เมื่อจุดโฟกัสมีขนาดเล็กพอจะเกิดเงา (penumbra, p) ทำให้สูญเสียความคมชัดของภาพ [1] ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการดังนี้



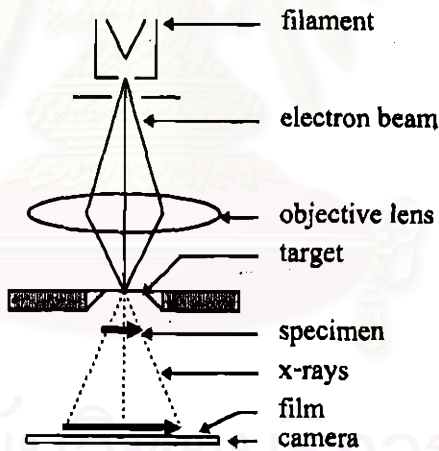
รูปที่ 2.3 แสดงหลักการถ่ายภาพรังสีเอกซ์ที่มีกำลังขยายภาพเปรียบเทียบกันระหว่างต้นกำเนิดรังสีที่มีขนาดจุดโฟกัสต่างกัน

$$p = w (d_2/d_1) \quad \dots\dots\dots(2.1)$$

โดยที่

- p คือ ขนาดของขอบเงา
 w คือ ขนาดของจุดโฟกัส
 d_2 คือ ระยะห่างของชั้นตัวอย่างถึงฟิล์ม
 d_1 คือ ระยะห่างของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงชั้นตัวอย่าง

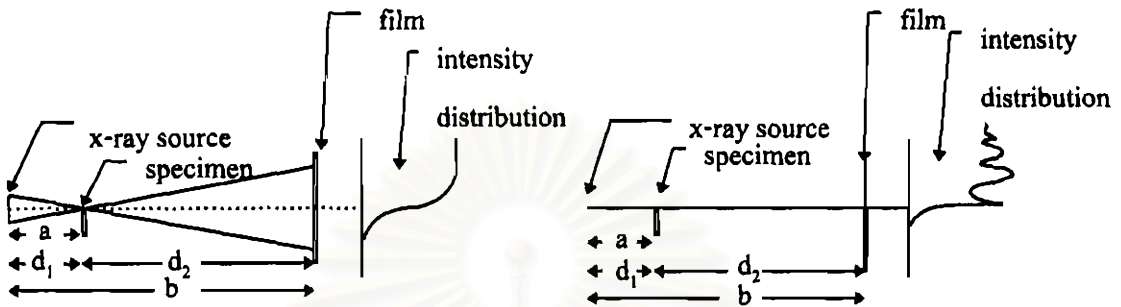
การถ่ายภาพรังสีเอกซ์ในลักษณะที่ทำให้กำลังขยายซึ่งเกิดจากระยะห่างของวัตถุตัวอย่างนี้ จำเป็นต้องอาศัยแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่มีจุดโฟกัสเล็กมาก ๆ ในทางปฏิบัตินิยมใช้ลำอิเล็กตรอนในกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน (scanning electron microscope , SEM) โฟกัสลงบนเป้าโลหะที่ต้องการให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะพลังงาน โดยควบคุมให้ลำอิเล็กตรอนหยุดสแกน จะได้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส ถ่ายภาพเนื้อวัตถุตัวอย่างลงบนแผ่นฟิล์มในห้องสุญญากาศ ที่มีกำลังขยายขึ้นอยู่กับระยะห่างของวัตถุถึงฟิล์มและต้นกำเนิดรังสี เรียกโครงสร้างระบบถ่ายภาพนี้ว่า “ กล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพ ”



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพ

แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ผลิตจากของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนนี้บังคับจุดโฟกัสให้เล็กด้วยระบบเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า จึงสามารถปรับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโฟกัสได้ในช่วง 0.1-1 ไมโครเมตร ทำให้จัดกำลังขยายของภาพถ่ายได้ด้วยการแปรเปลี่ยนระยะ d_1 และ d_2 โดยยังคงรักษาความคมชัดของภาพไว้ ในรูปที่ 2.5 ก. และ 2.5 ข. แสดงถึงกำลังขยายของภาพถ่าย (M) เป็นอัตราส่วนระหว่างระยะห่างของแหล่งกำเนิดรังสีกับฟิล์ม ($b = d_1 + d_2$) และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับชั้นตัวอย่าง (a) ดังนั้น สมการกำลังขยายจึงหาได้จาก [1]

$$M = b/a \quad \dots\dots\dots(2.2)$$



ก. อิทธิพลของขนาดจุดโฟกัสต่อ
ขีดจำกัดของการแจกแจงรายละเอียดภาพ

ข. อิทธิพลของ Fresnel Diffraction ต่อ
ขีดจำกัดของการแจกแจงรายละเอียดภาพ

รูปที่ 2.5 ขีดจำกัดของการแจกแจงรายละเอียดบนภาพ

ในระบบกล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพ จะถูกจำกัดด้วยขนาดจุดโฟกัสของแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์และผลกระทบของ Diffraction Fringe ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ก. และ 2.5 ข. ตามลำดับ ขีดจำกัดของการแจกแจงรายละเอียดภาพสามารถ ประเมินได้ใน 2 กรณี [9] ดังนี้

ในกรณีของความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพ ในลักษณะจุดภาพ (point resolution) พิจารณาจากขนาดของจุดโฟกัสบนตัวอย่าง

$$\delta \approx d \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

- เมื่อ δ คือ ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพ
- d คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของจุดโฟกัสบนตัวอย่าง

และในกรณีของความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพในลักษณะแลตทิซ (lattice resolution) พิจารณาจากปรากฏการณ์เลี้ยวเบนของคลื่นจะประเมินขีดจำกัดได้จาก [1]

$$\delta \approx \sqrt{a\lambda} \quad \dots\dots\dots(2.4)$$

เมื่อ a คือ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีกับชั้นตัวอย่าง

λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

ในทางปฏิบัติ กล้องจุลทรรศน์รังสีเอกซ์แบบฉายภาพสามารถปรับเปลี่ยนกำลังขยายได้จาก 20 ถึง 200 เท่า และมีความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของจุดภาพได้ในช่วง 0.1 ถึง 1 ไมโครเมตร ขึ้นอยู่กับการเลือกความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์หรือชนิดของธาตุที่ใช้ทำเป้า ถ้าจัดระบบกล้องจุลทรรศน์ให้แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์มีความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ $\lambda = 3\text{\AA}$ ระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงชั้นตัวอย่าง $a = 40$ ไมโครเมตร และระยะห่างระหว่างแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ถึงฟิล์ม $b = 10$ มิลลิเมตร สามารถคำนวณความสามารถในการแจกแจงและกำลังขยายได้ดังนี้

$$\text{ความสามารถในการแจกแจง} \quad \delta\sqrt{a\lambda} = 1.09 \times 10^3 \text{\AA}$$

$$\text{กำลังขยายของภาพ} \quad M = b/a = 10 / (40 \times 10^{-3}) = 250 \text{ เท่า}$$

กำลังขยายของภาพที่เกิดบนฟิล์มบันทึกภาพ ยังสามารถนำไปผ่านกระบวนการอัดขยายภาพอีก 10 เท่า ซึ่งจะทำให้ กำลังขยายภาพขั้นสุดท้ายเป็น $250 \times 10 = 2500$ เท่า

2.3 แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไมโครโฟกัส

การทำงานของระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์นั้น แหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์แบบไมโคร โฟกัส ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนและเป้าผลิตรังสีเอกซ์

2.3.1 แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน

แหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนสำหรับระบบถ่ายภาพจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ประกอบด้วยลวดทังสเตน (tungsten filament) ทำหน้าที่ปล่อยอิเล็กตรอนด้วยการให้ความร้อนแก่ลวดทังสเตนโดยการให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน เมื่ออุณหภูมิของลวดทังสเตนเพิ่มขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนได้รับการถ่ายโอนพลังงาน จนกระทั่งมีพลังงานจลน์สูงเพียงพอที่จะข้ามแรงยึดเหนี่ยวที่ผิวโลหะได้ ทำให้มีกลุ่มอิเล็กตรอนหลุดออกมา กลุ่มอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้จะถูกเร่งด้วยศักดาไฟฟ้าผ่านช่องแอโนด ผ่านเลนส์ และถูกโฟกัสแล้วลงสู่ฉากรับอิเล็กตรอนซึ่งครบวงจร ความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากผิวของโลหะจะเป็นไปตามสมการของ ริชาร์ดสัน-ดัชแมน (Richardson-Dushman thermionic emission) ดังนี้ [3]

$$J = A_0 T^2 e^{-e\phi/kT} \dots\dots\dots(2.5)$$

โดยที่

A_0 คือ ค่าคงที่รีซาร์ดตัน ($4\pi m_e k^2/h^3$) มีหน่วยเป็น $A/cm^2 \cdot k^2$

J คือ ความหนาแน่นของกระแสที่ผิวโลหะ

T คือ อุณหภูมิของแคโทด

e คือ ประจุของอิเล็กตรอน

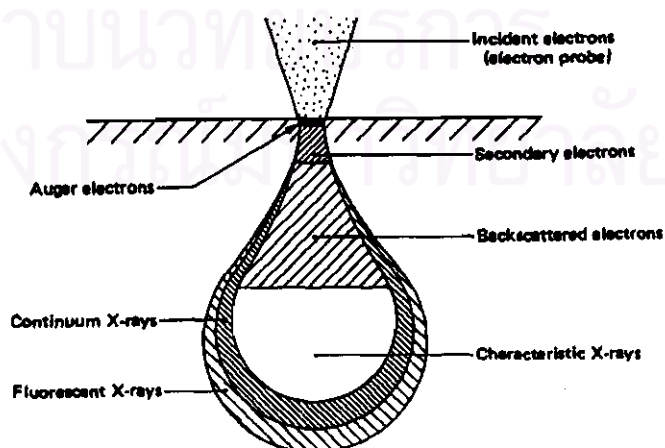
$e\phi$ คือ ค่าเวอรัคฟังก์ชัน (work function) ของผิวโลหะ

k คือ ค่าคงที่โบลทซ์แมน

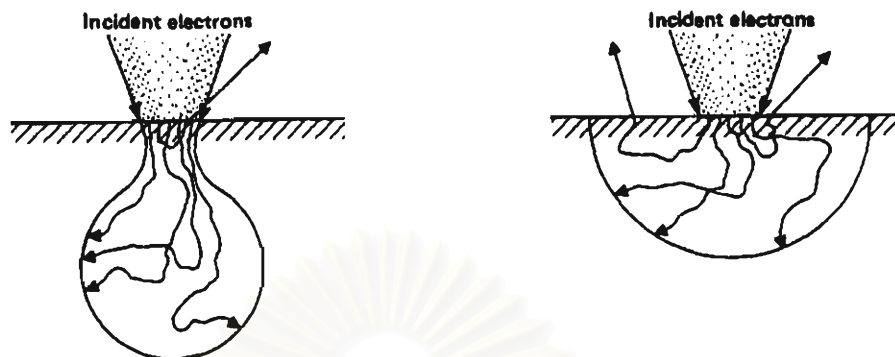
ซึ่งความหนาแน่นของกระแสอิเล็กตรอนนี้คือ ความสว่างของลำอิเล็กตรอน ซึ่งจะเป็นส่วนที่สร้างความเข้มของรังสีเอกซ์จากแผ่นเป้าผลิตรังสีเอกซ์

2.3.2 เป้า (target) ผลิตรังสีเอกซ์

เมื่อลำอิเล็กตรอนทำอันตรกิริยากับอิเล็กตรอนของอะตอมในเนื้อแผ่นโลหะที่ใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์อิเล็กตรอนจะกระเจิงในชั้นความลึกของเป้าผลิตรังสีเอกซ์ต่างกันขึ้นอยู่กับตัวแปรหลัก 2 ชนิดคือ ค่าเลขอะตอมของธาตุและพลังงานของอิเล็กตรอน ซึ่งพลังงานของลำอิเล็กตรอนนี้ควบคุมได้ด้วยแรงดันไฟฟ้าเร่ง ถ้าแรงดันไฟฟ้าเร่งยิ่งสูงมากอันตรกิริยาที่จะเกิดในความลึกมากขึ้นและในกรณีที่พลังงานของอิเล็กตรอนคงที่ อันตรกิริยาที่เกิดกับธาตุเลขอะตอมสูงชั้นความลึกจะเกิดขึ้นในบริเวณกว้าง ทำนองเดียวกันถ้าเลขอะตอมต่ำจะเกิดบริเวณแคบแต่ลึกมากกว่าโดยชั้นความลึกของการเกิดอันตรกิริยาในเนื้อเป้าผลิตรังสีเอกซ์จะมีโอกาสปลดปล่อยอนุภาคนิวเคลียร์ชนิดต่าง ๆ ได้ดังรูปที่ 2.6 [2]



ก. การเกิดอันตรกิริยานิวเคลียร์ที่ชั้นความลึกต่างๆ

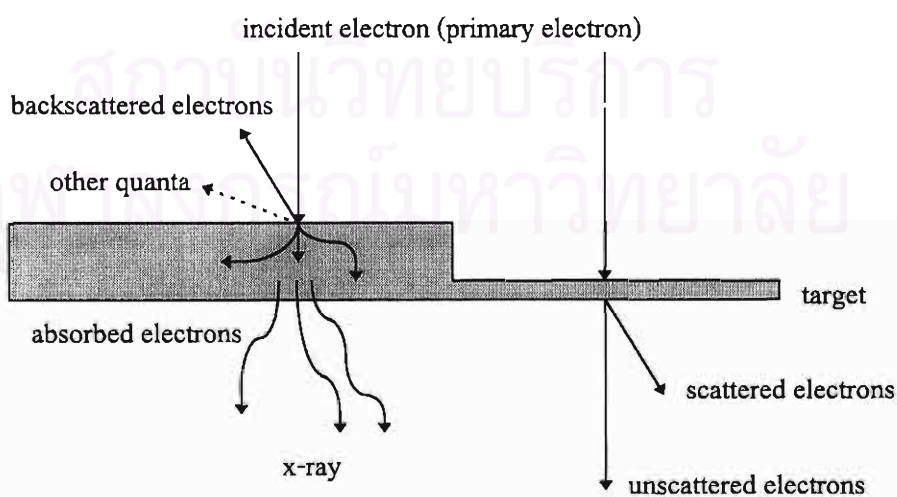


ข. เป้าที่มีเลขอะตอมต่ำ

ค. เป้าที่มีเลขอะตอมสูง

รูปที่ 2.6 แสดงชั้นความลึกของการเกิดอันตรกิริยาในเป้าผลิตรังสีเอกซ์ที่เลขอะตอมต่างกัน

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 2.6 จะเห็นได้ว่าถ้าเป้าผลิตรังสีเอกซ์บางเกินไป อิเล็กตรอนสามารถทะลุผ่านลงมาได้และไม่เกิดรังสีเอกซ์ แต่ถ้าเป้าผลิตรังสีเอกซ์หนาเกินไป ปริมาณรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นก็จะถูกกลทอนลงไปจากการสูญเสียพลังงานในเนื้อของโลหะที่ใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์ ด้านตรงข้ามกับผิวหน้าออกมาน้อย ดังนั้นความหนาของเป้าผลิตรังสีเอกซ์สำหรับระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์ต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย ในรูปที่ 2.7 เป็นแผนภาพแสดงอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าผลิตรังสีเอกซ์แบบฟิล์มบางที่มีความหนาต่างกัน



รูปที่ 2.7 อันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนและเป้าผลิตรังสีเอกซ์

เมื่อลำอิเล็กตรอนผ่านฟิล์มโลหะที่ใช้เป็นเป้าผลิตรังสีเอกซ์โดยเฉลี่ยอิเล็กตรอนจะมีการกระเจิงแบบยืดหยุ่นไม่เกิน 1 ครั้ง และในการกระเจิงแบบยืดหยุ่น สามารถเกิดกระบวนการต่างๆของการกระเจิงแบบไม่ยืดหยุ่นขึ้นได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าอิเล็กตรอนสามารถทำให้เกิดการไอออไนซ์ในวงโคจรชั้นในของอะตอม และผลิตรังสีเอกซ์ ปริมาณโฟตอนรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น (n_x) ตามระยะทาง t จะเป็นไปตามสมการ [7]

$$n_x = Q_i \omega N_0 \rho C_A t / A \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

โดยที่

- n_x มีหน่วยเป็น photon/e⁻
- Q_i คือ ภาคตัดขวาง มีหน่วยเป็น ionizations/e⁻ per (atom/cm²)
- ω คือ fluorescence yield มีหน่วยเป็น photons/ionization
- N_0 คือ เลขอวกาโดร มีหน่วยเป็น atoms/mole
- A คือ น้ำหนักอะตอม มีหน่วยเป็น g/moles
- ρ คือ ความหนาแน่น มีหน่วยเป็น g/cm³
- C_A คือ ความเข้มข้นของธาตุ A
- t คือ ระยะทาง มีหน่วยเป็น cm

และจากการทดลองของ Belitty (1912) [9] พบว่าความเข้มรังสีเอกซ์ (I_{int}) ได้พื้นที่ของสเปกตรัมพลังงาน ซึ่งเกิดจากรังสีเอกซ์ต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวรวมกันทั้งหมดเป็นความสัมพันธ์ของผลคูณของเลขอะตอม กระแสและแรงดันไฟฟ้า ตามสมการ

$$I_{int} = aZIV^2 \quad \text{W/m}^2 \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

โดยที่

- a คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ $1.4 \times 10^{-9} \text{ V}^{-1}$
- Z คือ เลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์
- I คือ กระแสที่ผ่านแผ่นเป้าผลิตรังสีเอกซ์
- V คือ ไฟฟ้าแรงสูงระหว่างขั้วไฟฟ้า

Gilfrich และ Birks (1968) [9] กล่าวว่ารังสีเอกซ์เฉพาะตัวเมื่อเทียบกับปริมาณรังสีที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะมีสัดส่วนระหว่าง 24-75 % ขึ้นกับ x-ray line และชนิดของธาตุ ในระบบจุลทรรศน์รังสีเอกซ์นั้นสนใจใช้ปริมาณรังสีเอกซ์เฉพาะพลังงาน จากอันตรกิริยาของลำอิเล็กตรอนบนแผ่นฟิล์มบางโดยเฉพาะ K line และ L line จากงานวิจัยของ Keiji Yada [10] ได้ศึกษาวิจัยกลุ่มวัสดุเป็นสำหรับผลิตรังสีเอกซ์ในช่วงแรงดันไฟฟ้าแรงของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบสแกน พบว่าช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมกับตัวอย่างทางชีววิทยา สามารถแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม คือ hard tissue , intermediate tissue และ soft tissue ดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 วัสดุเป้าหมายผลิตรังสีเอกซ์และแรงดันไฟฟ้าแรงที่เหมาะสมสำหรับตัวอย่างทางชีวภาพ

sample	wavelength (nm)	target	acc. voltage (kV)	ambience
hard tissue bone, tooth, insect etc.	0.1-0.3	W, Au, Ti	30-20	air
intermediate tissue plant cell, neuron(stained) etc.	0.3-0.7	Ti, Sc, Ta, Si	20-10	He, vacuum
soft tissue cultured cell, muscle etc	0.7-1.1	Au, Al, Ta, Ge	10-8	He, vacuum

การพิจารณาเลือกธาตุที่ใช้เป็นวัสดุเป้าหมายผลิตรังสีเอกซ์ฟิล์มบางเพื่อให้รังสีเอกซ์ที่ผลิตได้ทะลุผ่านออกมา จะต้องพิจารณาทั้งคุณสมบัติของความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์และความหนาของแผ่นฟิล์มเป้าหมายผลิตรังสีเอกซ์รวมทั้งจุดหลอมละลายและการนำความร้อนที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงานของลำอิเล็กตรอน ดังนี้

ก. ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์

จากที่กล่าวในข้อ 2.2 แล้วว่า ข้อจำกัดของความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดภาพในลักษณะของแลทธิซ จะขึ้นกับความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ ดังนั้นการเลือกวัสดุที่ใช้ทำบั้งจึงต้องคำนึงถึงชนิดของอะตอมธาตุที่ให้ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ที่เหมาะสมกับงาน ดังแสดงในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงความยาวคลื่นและพลังงานของรังสีเอกซ์เฉพาะตัว, จุดหลอมเหลว และการนำความร้อนของธาตุบางธาตุ

element		characteristic x-ray wavelength			mp (°C)	K (W.m ⁻¹ .T ⁻¹)
		K _α (keV)	L _α (keV)	M _α (keV)		
C	6	44			3,500	250
Al	13	8.43(1.48)			660	233
Si	14	7.13(1.74)			1,414	170
Sc	21	3.03(4.09)	31.4		1,400	22
Ti	22	2.75(4.51)	27.4		1,675	22
Ge	32	1.26(9.87)	10.5(1.19)		958	67
Zr	40	0.79	6.07(2.04)		1,852	22
Mo	42	0.71	5.41(2.29)		2,610	135
Ag	47	0.56	4.15(2.98)	21.8	962	428
Ta	73	0.22	1.52(8.14)	7.25(1.71)	2,996	57
W	74	0.21	1.47(8.39)	6.98(1.77)	3,384	139
Au	79	0.18	1.28(9.71)	5.84(2.15)	1,064	319

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของธาตุสำหรับใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์ที่ให้ความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ระหว่าง 5-10 Å (5-10 nm) เนื่องจากความยาวคลื่นรังสีเอกซ์ในช่วง 10 Å หรือมากกว่าเล็กน้อย จะทำให้ความเปรียบต่าง (contrast) เพียงพอในการถ่ายภาพรังสีเอกซ์สำหรับตัวอย่างด้านชีวภาพ

ข. ความหนาของเป้าผลิตรังสีเอกซ์

การคำนวณความหนาที่เหมาะสมของเป้าผลิตรังสีเอกซ์ จะต้องพิจารณาถึงการดูดกลืนปริมาณรังสีเอกซ์ในวัสดุที่ใช้ทำเป้าผลิตรังสีเอกซ์ และการกระจายของเนวรังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้น จากงานวิจัยของ Keiji Yada [10] กล่าวว่า ปริมาณความเข้มรังสีที่ผ่านออกมาจากแผ่นเป้าผลิตรังสีเอกซ์สามารถคำนวณได้จาก

$$I = I_0 e^{-(\mu/p)p^1} \dots\dots\dots(2.8)$$

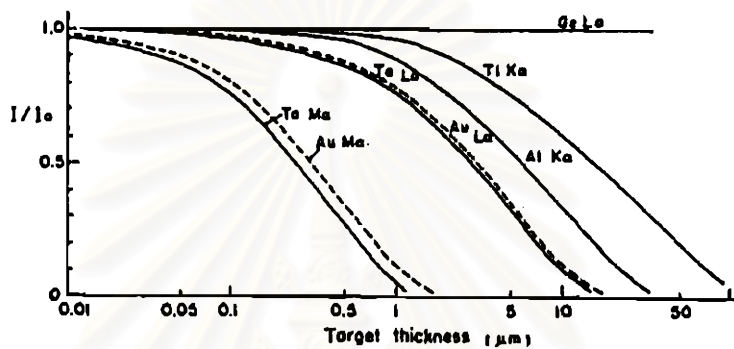
โดยที่

μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงเส้น (linear absorption coefficient)

t คือ ความหนาของเป้าผลิตรังสีเอกซ์

ρ คือ ความหนาแน่นของเป้าผลิตรังสีเอกซ์

$\mu\rho$ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (mass absorption coefficient)



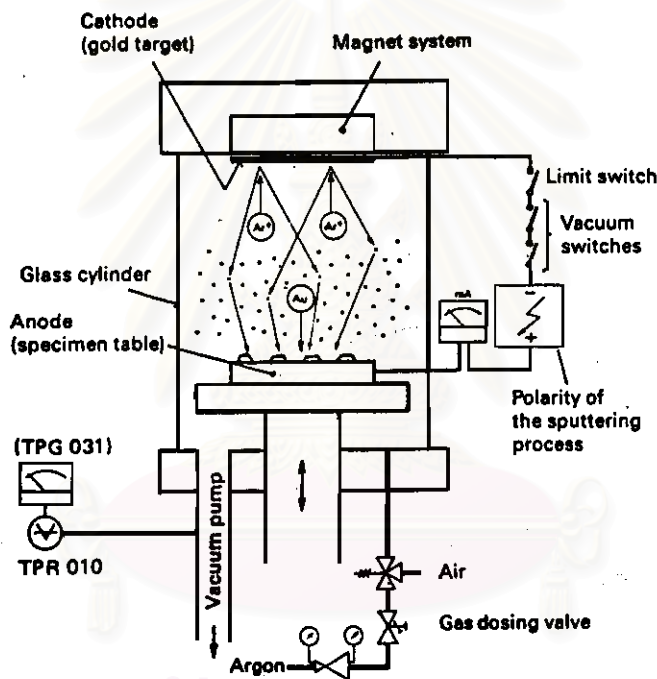
รูปที่ 2.8 กราฟแสดงการดูดกลืนรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของเป้าผลิตรังสีเอกซ์ชนิดต่าง ๆ

จากรูปที่ 2.8 เป็นเส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์ของอัตราส่วนปริมาณรังสีและความหนาของวัสดุเป้าผลิตรังสีเอกซ์จะเห็นได้ว่าความหนาของเป้า Ta และ Au ที่มี M x-ray เป็น 7.25 Å และ 5.28 Å จะต้องบางมาก คือ 0.1 - 0.13 μm ในขณะที่ Germanium สามารถใช้ที่ความหนามากกว่าเพราะสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสำหรับ L x-ray (10.5 Å) มีค่าน้อย ในทางปฏิบัติแผ่นฟิล์มที่ใช้ทำเป้านี้ ได้จากการฉาบผิวด้วยอะตอมของธาตุบนฐานฟิล์มบางที่มีสัมประสิทธิ์การลดทอนพลังงานของรังสีเอกซ์ต่ำด้วยเทคนิคไอออนสปัตเตอร์ (ion sputtering)

ค. การเคลือบแผ่นฟิล์มบางด้วยการฉาบผิว (ion sputtering)

การฉาบผิวโลหะฟิล์มบางบนผิววัสดุเป็นกระบวนการที่ อะตอมของสารที่จะฉาบผิวถูกระดมยิง (bombardment) ด้วยไอออนของก๊าซที่มีประจุบวกให้ห้องสุญญากาศ อัตราการฉาบผิวโลหะจะไม่ขึ้นกับความดันก๊าซ แต่ความดันก๊าซจะมีอิทธิพลต่อการเกิดปริมาณไอออนและพฤติกรรมของผิววัสดุที่ถูกฉาบผิว รูปแบบของการจัดชิ้นงานที่จะฉาบผิวมีลักษณะดังรูปที่ 2.9 โดยชิ้นงานที่ต้องการฉาบผิวจะเป็นขั้วไฟฟ้าบวกหรือแอโนด ขณะที่วัสดุที่จะนำมาฉาบผิวจะอยู่ด้านขั้วไฟฟ้าลบหรือแคโทด วางขนานกันมีระยะห่างหลายเซนติเมตร ก๊าซที่ใช้ในการผลิตไอออนประจุบวกนิยมใช้ก๊าซอาร์กอน ซึ่งมีความดันก๊าซระหว่าง 10^{-1} - 10^{-2} มิลลิบาร์ เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่ขั้วไฟฟ้าระหว่าง 300 โวลต์ ถึง 1,000 โวลต์ จะทำให้ก๊าซอยู่ในภาวะดิสชาร์จ (discharge) แฉกตัว

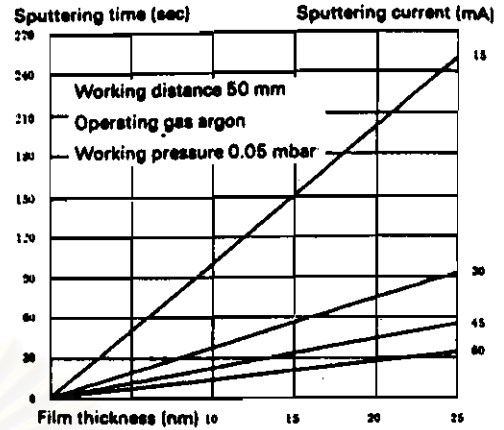
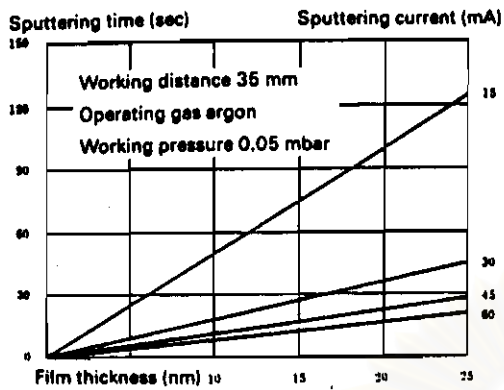
เป็นไอออนและอิเล็กตรอน อิเล็กตรอนจะเคลื่อนมาขั้วบวกขณะที่ไอออนบวกของอาร์กอนจะถูกเร่งให้ชนกับผิวหน้าของวัสดุโลหะฉาบผิวด้านแคโทด ซึ่งปริมาณการเคลื่อนที่ของพาหะประจุนี้สามารถวัดกระแสไฟฟ้าได้ ผลของการชนผิวโลหะด้านแคโทดทำให้เกิดการปลดปล่อยอะตอมโลหะออกมา ที่ความดันของก๊าซ $10^{-1}-10^{-2}$ มิลลิบาร์นี้ ระยะทางปลอดเฉลี่ย (mean free path) จะมีระยะเพียง 1-10 มิลลิเมตร ดังนั้นการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและไอออนบวกของก๊าซจะเกิดการชนอะตอมเป็นกลางให้เกิดการแตกตัวต่อเนื่อง ทำให้ไอออนบวกของก๊าซไปชนผิวหน้าโลหะด้านแคโทดกัดผิวอะตอมโลหะให้หลุดออกมา และเคลื่อนมาจับผิวของชิ้นงานที่ต้องการฉาบผิวเป็นฟิล์มบาง สะสมหนาขึ้นตามสัดส่วนเวลาที่ปล่อยให้อะตอมโลหะก่อตัวทับกันเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.9 ก. แผนภาพการจัดระบบฉาบแผ่นฟิล์มบางแบบ ion sputtering

ความหนาของโลหะฉาบผิวนี้ขึ้นอยู่กับ คุณสมบัติของโลหะฉาบผิว ระยะห่างระหว่างชิ้นงานและโลหะฉาบผิว ความดันก๊าซ และกระแสดีสชาร์จของก๊าซระหว่างฉาบผิว ดังนั้นในทางปฏิบัติจึงมีการควบคุมพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อจะควบคุมความหนาของฟิล์มโลหะที่ต้องการ

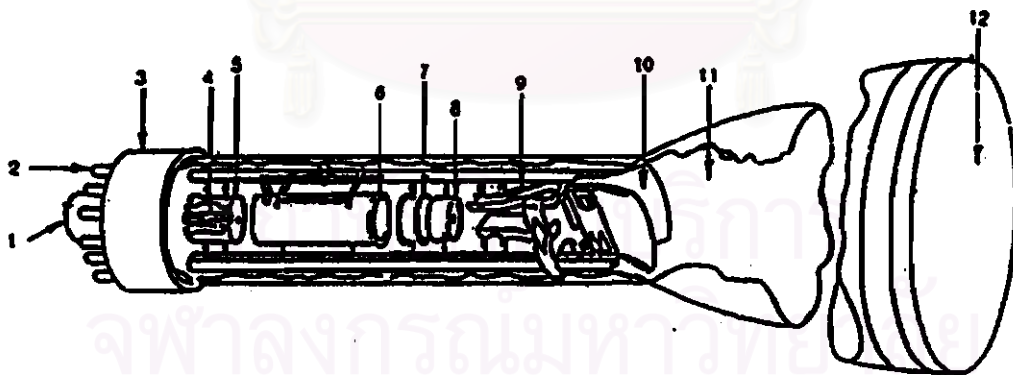
เส้นกราฟในรูปที่ 2.9 ข. แสดงความสัมพันธ์ของเวลาในการฉาบผิว ความหนา และกระแสที่ใช้ในการฉาบผิวทองคำ ที่ระยะชิ้นงานกับโลหะฉาบผิวเท่ากับ 35 และ 50 มิลลิเมตร และความดันก๊าซอาร์กอนในห้องตัวอย่างเท่ากับ 0.05 มิลลิบาร์ [2]



รูปที่ 2.9 ข. เส้นกราฟแสดงเวลาในการฉาบผิวทองคำของเครื่อง ion sputtering ของ Baltech รุ่น SCD 040

2.4 หลอดรังสีแคโทด

หลอดรังสีแคโทดเป็นส่วนแสดงผลของออสซิลโลสโคป (oscilloscope) มีโครงสร้างคล้ายหลอดภาพโทรทัศน์ ทำหน้าที่แสดงภาพของสัญญาณที่ได้จากการวัดรูปคลื่นสัญญาณไฟฟ้า โดยมีแสดงโครงสร้างภายในหลอดรังสีแคโทดดังรูปที่ 2.10.



รูปที่ 2.10 โครงสร้างภายในของหลอดรังสีแคโทด

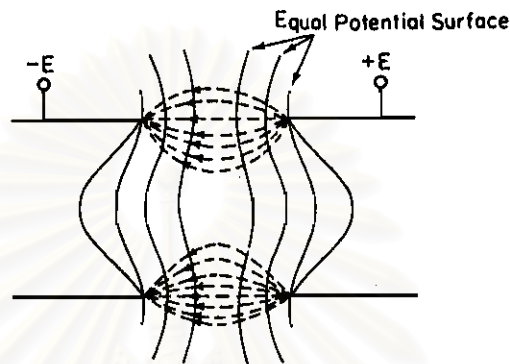
- หมายเลข 1 สันเดี่ยของฐานหลอด (key)
- หมายเลข 2 ขาหลอด (pins)
- หมายเลข 3 ฐานหลอด (base)

- หมายเลข 4 ใย้หลอด-แคโทด (heater-cathode)
- หมายเลข 5 คอนโทรลกริด (control grid)
- หมายเลข 6 แอนโอดเร่งความเร็วตัวหน้า (preaccelerating anode)
- หมายเลข 7 แอนโอดปรับโฟกัส (focusing anode)
- หมายเลข 8 แอนโอดเร่งความเร็วตัวหลัง (accelerating anode)
- หมายเลข 9 แผ่นเพลตควบคุมการบ่ายเบนลำอิเล็กตรอนแนวตั้ง (vertical deflection plates)
- หมายเลข 10 แผ่นเพลตควบคุมการบ่ายเบนลำอิเล็กตรอนแนวนอน (horizontal deflection plates)
- หมายเลข 11 ภายในหลอดเคลือบสารตัวนำ (internal conductive coating)
- หมายเลข 12 จอภาพเรืองแสง (fluorescent screen)

ซึ่งส่วนประกอบทั้งหมดของหลอดรังสีแคโทด สามารถแบ่งเป็นส่วนประกอบที่สำคัญตามหน้าที่การทำงานได้ 5 ส่วนดังนี้

1. ส่วนปืนอิเล็กตรอน (electron gun) ทำหน้าที่ผลิตลำอิเล็กตรอนเพื่อส่งไปจอภาพ ประกอบด้วยใย้หลอด-แคโทด (หมายเลข 4) และคอนโทรลกริด (หมายเลข 5)
2. ส่วนบังคับลำอิเล็กตรอนให้เรียวเล็ก (focus electrode) ทำหน้าที่ปรับลำอิเล็กตรอนให้เรียวเล็กตกกระทบบนจอคมชัดที่สุด ประกอบด้วยแอนโอดปรับโฟกัส(หมายเลข 7)
3. ส่วนเร่งความเร็วของอิเล็กตรอน (accelerating electrode) ทำหน้าที่เร่งความเร็วให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังจอภาพด้วยความเร็วสูง ประกอบด้วยแอนโอดเร่งความเร็วส่วนหน้า (หมายเลข 6) และแอนโอดเร่งความเร็วส่วนหลัง (หมายเลข 8)
4. ส่วนหักเหแนวนอนและแนวตั้ง (horizontal & vertical deflection electrode) ทำหน้าที่ควบคุมลำอิเล็กตรอนที่จะไปกระทบจอภาพให้เกิดการบ่ายเบนไปทางซ้ายหรือขวา ขึ้นบนหรือลงล่างเกิดภาพสัญญาณบนจอภาพ ประกอบด้วยแผ่นเพลตควบคุมการเบี่ยงเบนแนวตั้ง (หมายเลข 9) และแผ่นเพลตควบคุมการเบี่ยงเบนแนวนอน (หมายเลข 10) มีอย่างละ 2 แผ่น
5. ส่วนจอภาพ (screen) มีหน้าที่ทำให้เกิดภาพเรืองแสงขึ้นบนจอภาพ โดยจอภาพด้านในจะถูกเคลือบด้วยสารฟอสเฟอร์ ฟอสเฟอรันี้จะเกิดเรืองแสงขึ้นมา เมื่อมีลำอิเล็กตรอนมากระทบฟอสเฟอร์เป็นสารที่สำคัญที่จะทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้นบนจอภาพ โดยจะเป็นตัวเปลี่ยนพลังงานจลน์ของอิเล็กตรอนให้เป็นแสงสว่าง เมื่อฟอสเฟอร์ถูกชนด้วยลำอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูง จะเกิดการเรืองแสงขึ้น และมองเห็นขนาดของจุดโฟกัสของลำอิเล็กตรอนได้

ถ้าอิเล็กตรอนภายในหลอดรังสีแคโทด สามารถปรับความเข้ม (intensity) ได้จากปริมาณของอิเล็กตรอนจากไส้หลอด และปรับโฟกัสได้โดยอาศัยหลักการของเลนส์ไฟฟ้าสถิต (electrostatic lens) การทำงานของเลนส์ไฟฟ้าสถิตนั้นสามารถอธิบายได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 อีควิโพเทนเชียลเซอร์เฟส (equipotential surface) ระหว่างขั้วไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.11 แสดงส่วนปลายของขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกที่มีศักย์ต่างกัน ซึ่งทรงกระบอกด้านขวามีศักย์ไฟฟ้าบวกสูงกว่าทรงกระบอกด้านซ้าย ความต่างศักย์นี้จะสร้างสนามไฟฟ้าสถิตขึ้น โดยความเข้มของสนามไฟฟ้าจะเป็นสัดส่วนกับแรงกระทำ (force) ของอนุภาคต่อประจุที่เกิดขึ้นในสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นไปตามสมการ [5]

$$E = f/q \quad \dots\dots\dots(2.9)$$

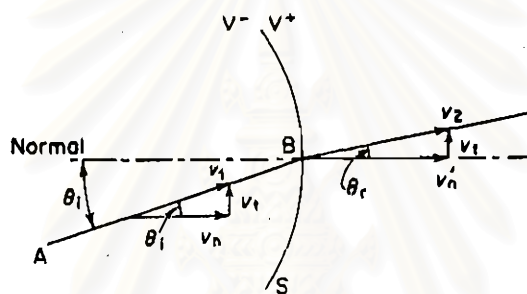
โดยที่

- E คือ ความเข้มของสนามไฟฟ้า หน่วยเป็น โวลต์ ต่อเมตร
- f คือ แรงซึ่งเกิดขึ้นโดยอนุภาคของประจุ หน่วยเป็น นิวตัน
- q คือ ประจุ มีหน่วยเป็น คูลอมป์

อิเล็กตรอนมีประจุเป็นลบ 1.6×10^{-19} คูลอมป์ ดังนั้นแรงกระทำต่ออิเล็กตรอนในสนามไฟฟ้า E จะมีค่าเป็น

$$f_e = eE \quad \dots\dots\dots(2.10)$$

สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะไม่เป็นแนวเดียวกันทั้งหมดและถ้าลากเส้น equipotential จะมีรูปแบบ (pattern) ดังรูปที่ 2.11 และแนวเส้นแรงสนามไฟฟ้าจะพุ่งออกที่ตรงกลางระหว่างปลายทางกระบอกขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ลักษณะนี้จึงทำให้มีเพียงอิเล็กตรอนที่ผ่านตรงกลางของทั้งสองกระบอกเท่านั้นที่ไม่มีแรงกระทำกับสนามไฟฟ้าเกิดขึ้น ส่วนอิเล็กตรอนที่นอก center lines จะเกิดแรงกระทำกับสนามไฟฟ้าขึ้น และจะเบนออกไปเป็นการสร้างพฤติกรรมเลนส์อิเล็กตรอนขึ้นในบริเวณ equipotential surface



รูปที่ 2.12 แสดงการหักเหของลำอิเล็กตรอนที่ equipotential surface

จากรูปที่ 2.12 ศักดาไฟฟ้าที่มีต่อด้านซ้ายของพื้นผิว S เป็น V- และต่อด้านขวาเป็น V+ อิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ในทิศทาง AB ทำมุมกับเส้นปกติ (θ_i) ผ่าน equipotential surface เข้าไปในบริเวณด้านซ้ายของ S ด้วยความเร็ว v_1 จะเกิดแรงกระทำที่พื้นผิว S แรงนี้จะกระทำในทิศทางของมุมหักเห (θ_r) กับเส้นปกติผ่าน equipotential surface มีผลให้ความเร็วของอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นค่าใหม่ (v_2) หลังจากทีอิเล็กตรอนผ่านพื้นผิว S องค์ประกอบของเวกเตอร์ความเร็ว (v) บนเส้นสัมผัสของพื้นผิวทั้งสองข้างของ S ยังคงเหมือนเดิม เนื่องจากไม่มีประจุของศักย์ในแนว equipotential line มีเพียงองค์ประกอบของเวกเตอร์ในแนวเส้นปกติของความเร็ว (v_n) เท่านั้นที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อแตกเวกเตอร์องค์ประกอบของความเร็วอิเล็กตรอนจะได้

$$v_t = v_1 \sin \theta_i = v_2 \sin \theta_r \quad \dots\dots\dots(2.11)$$

โดยที่

θ_i คือ มุมตกกระทบ

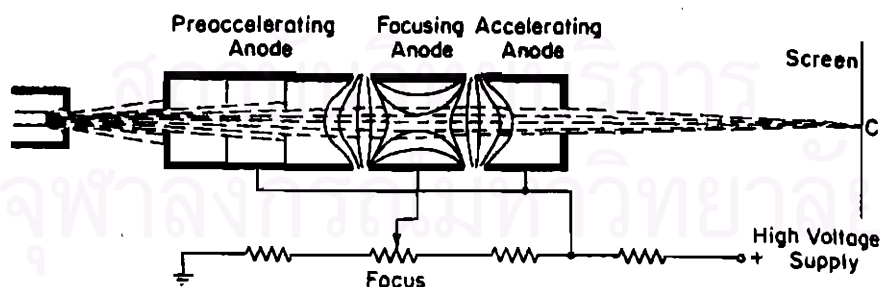
θ_r คือ มุมหักเหของลำอิเล็กตรอน

เมื่อจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\sin \theta_i / \sin \theta_r = v_1 / v_2 \quad \dots\dots\dots(2.12)$$

จากสมการที่ 2.12 เห็นได้ว่ามีลักษณะเดียวกับสมการการหักเหของแสงที่ผ่านบริเวณเนื้อวัสดุที่มีดัชนีการหักเหต่างกัน เช่น ในเนื้อผลึกแก้วที่ทำเลนส์แสง ดังนั้น equipotential line จึงเปรียบเสมือนผิวเลนส์

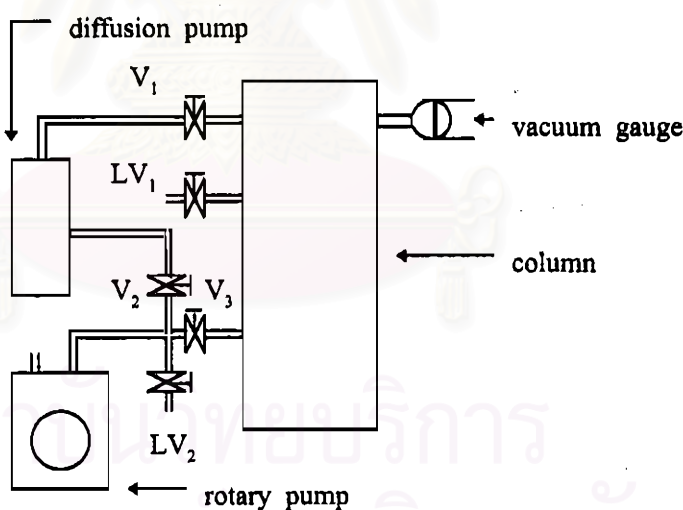
จากรูปที่ 2.13 ช่องว่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกทั้งสองของเอโนดโพกัสและเอโนดเร่งจะมี equipotential line คล้ายกับเลนส์เว้า ลำอิเล็กตรอนจากแคโทดที่ผ่านเลนส์เว้าไฟฟ้าสถิตชุดแรกจะเคลื่อนเป็นแนวเส้นตรงขนานกับแกนของหลอดรังสีแคโทดมากขึ้น ซึ่งหลังจากผ่านเลนส์เว้าอันที่ 2 ลำอิเล็กตรอนก็จะโฟกัสลงบนแผ่นฟอสเฟอร์ ดังนั้นระยะจากศูนย์กลางของเลนส์ไปยังจุดที่แสงรวมกัน (focal length) ของเลนส์ไฟฟ้าสถิตนี้สามารถปรับได้โดยการปรับความต่างศักย์ระหว่างขั้วไฟฟ้าทรงกระบอกทั้งสอง ทำให้ลำอิเล็กตรอนถูกควบคุมให้โฟกัสลงบนแผ่นฟอสเฟอร์และเกิดจุดสว่างขนาดเล็กได้



รูปที่ 2.13 แสดงระบบการปรับโฟกัสด้วยเลนส์ไฟฟ้าสถิตของหลอดรังสีแคโทด

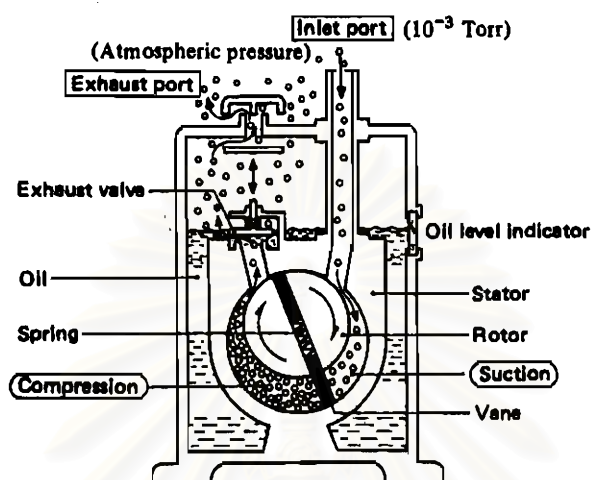
2.5 ระบบสุญญากาศ (vacuum system)

เนื่องจากอิเล็กตรอนสามารถสูญเสียพลังงานในตัวกลางที่เคลื่อนที่ผ่านได้ง่าย ดังนั้นเพื่อไม่ให้โมเลกุลของก๊าซในห้องตัวอย่าง (specimen chamber) เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของลำอิเล็กตรอน จึงต้องสูบอากาศออกโดยรักษาระดับความดันสุญญากาศในคอลัมน์และห้องใส่ตัวอย่างให้อยู่ที่ 10^{-5} ทอร์ (torr) หรือมากกว่า ระบบสุญญากาศของห้องตัวอย่างที่ทำความดันสุญญากาศให้สูงในระดับ 10^{-5} ทอร์ ขึ้นไปนั้นจะต้องมีการต่อพ่วงกันระหว่าง เครื่องสูบอากาศแบบโรตารี (rotary pump) และเครื่องสูบอากาศแบบดิฟฟิวชัน (diffusion pump) และจัดระบบวาล์วสูบอากาศเป็นขั้นตอนตามลำดับการทำงานที่ระดับความดันสุญญากาศต่างๆ โดยอ่านค่าจากเกจวัดความดันต่ำต่ำ ซึ่งใช้เกจวัดแบบพิรานี (pirani gauge) อ่านความดันสุญญากาศในช่วง 10^{-1} - 10^{-4} ทอร์ และเกจวัดความดันสุญญากาศด้านสูงใช้เกจวัดแบบเพนนิ่ง (penning gauge) อ่านความดันสุญญากาศในช่วง 10^{-4} - 10^{-7} ทอร์ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แผนภาพของระบบสุญญากาศความดันสูง

2.5.1 เครื่องสูบลูกอากาศแบบโรตารี (rotary pump)

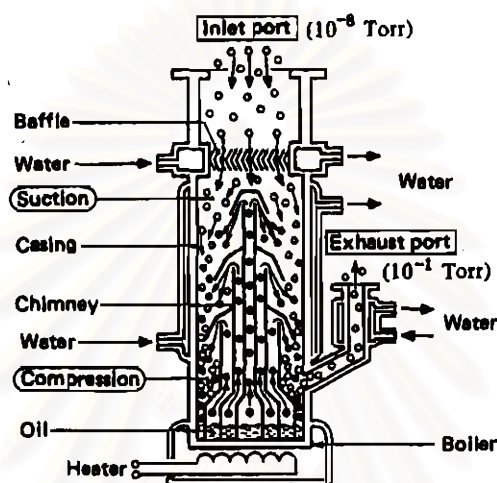


รูปที่ 2.15 โครงสร้างของเครื่องสูบลูกอากาศแบบ Gaede oil rotary pump

เครื่องสูบลูกอากาศแบบ Gaded oil rotary นี้ ส่วนของห้องสูบลูกอากาศโรตารีจะผนึกสนิท เปิดให้อากาศเข้าได้เฉพาะทางเข้าเท่านั้น และเช่อยู่ในน้ำมันหล่อลื่นเครื่องสูบลูก ด้านทางขับอากาศออกจะมีลิ้นคายอากาศ (exhaust valve) ทางเดียวปล่อยผ่านน้ำมัน ห้องสูบลูกอากาศจะแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยแผ่นขับอากาศ (vane) ดังในรูปที่ 2.15 เมื่อโรตารีหมุนตามทิศทางลูกศร อากาศในส่วนห้องสูบลูกทางออกจะถูกอัดแน่น มีความดันสูงกว่าความดันบรรยากาศขับออกสู่อากาศ ขณะที่ยีกส่วนหนึ่งของห้องสูบลูกอากาศจะดึงโมเลกุลอากาศเข้ามาจับช่วงกันต่อเนื่องเป็นวงรอบ ระหว่างการสูบลูกและอัดอากาศออกสำหรับการหมุนของโรตอร์ 1 รอบ เครื่องสูบลูกอากาศแบบชุดเดียว (single stage) จะทำความดันสุญญากาศได้ต่ำลงประมาณ 10^{-2} - 10^{-3} ทอร์ ในกรณีที่ต้องการให้ความดันสุญญากาศสูงถึง 10^{-3} - 10^{-4} ทอร์ เครื่องสูบลูกอากาศจะเป็น 2 ชุดต่อเนื่อง (double stage) การทำงานจะมีการสั่นสะเทือนและเสียงรบกวนจากการขับอากาศออกต่ำกว่า อย่างไรก็ตามถ้าต้องการความดันสุญญากาศเพียง 10^{-3} ทอร์ ที่ความเร็วในการสูบลูกอากาศ (pumping speed) 50-100 ลิตรต่ออนาที จะใช้เครื่องสูบลูกอากาศชนิดชุดเดียวก็เพียงพอ เครื่องสูบลูกอากาศแบบโรตารีเป็นเครื่องสูบลูกอากาศสำหรับขั้นตอนเริ่มต้นของการทำสุญญากาศ เพื่อลดความดันอากาศด้านทางออกของเครื่องสูบลูกอากาศความดันสุญญากาศสูง เช่น เครื่องสูบลูกอากาศดิฟฟิวชัน (diffusion pump) หรือเครื่องสูบลูกอากาศแบบเทอร์โบ

โมเลกุลาร์ (turbo molecular pump) เป็นต้น บางครั้งจึงเรียกเครื่องสูบลูโรตารีนี้ว่าเป็น เครื่องสูบล้วนหน้า (fore pump) ก่อนเริ่มต้นสูบลูอากาศของเครื่องสูบลูอากาศความดันสุญญากาศสูง

2.5.2 เครื่องสูบลูอากาศแบบคิฟิวชัน (diffusion pump)



รูปที่ 2.16 โครงสร้างของเครื่องสูบลูอากาศแบบ three-stage oil diffusion pump

เครื่องสูบลูอากาศแบบคิฟิวชัน เป็นเครื่องสูบลูอากาศความดันสุญญากาศสูงที่ทำงานโดยแรงคูดโมเลกุลก๊าซของไอน้ำมันที่พวยพุ่งด้วยความเร็วสูง (jet speed) โดยไม่มีส่วนที่เคลื่อนไหว ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญ 4 ส่วน ได้แก่ หม้อต้มไอน้ำมัน (boiler) ซึ่งกำเนิดความร้อนจากลวดความร้อน (heater) ปล่องขับไอน้ำมัน (chimney) แบบซ้อนกันหลายชั้น ระบบหล่อเย็นผนังเครื่องสูบลูเย็น (water-cooled casing) และตะแกรงควมแน่นไอน้ำมัน (water-cooled baffle) เพื่อป้องกันไม่ให้ไอน้ำมันเล็ดรอดขึ้นไปในห้องสุญญากาศดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.16 คุณสมบัติของน้ำมันที่เติมจะมีหลายเกรด ขึ้นกับความดันสุญญากาศที่ต้องการ ดังรายละเอียดในตารางที่ 2.3 การทำงานของเครื่องสูบลูสุญญากาศแบบคิฟิวชัน เริ่มจากการต้มไอน้ำมันให้เดือดและหล่อเย็นผนังของเครื่องสูบลูไอน้ำมันที่กำลังเดือดจะถูกอัดพุ่งออกทางปล่องไอแต่ละชั้นคลุมพื้นที่รอบทรงกระบอกด้วยความเร็วสูงมาก ทำให้เกิดแรงคูดโมเลกุลก๊าซแพร่เข้าสู่กลุ่มไอน้ำมัน เมื่อไอน้ำมันปะทะกับความเย็นที่ผนังจะควมแน่นเป็นน้ำมันไหลสู่กันหม้อต้ม ขณะที่ก๊าซจะถูกขับออกทางท่อระบายออก (exhaust port) ที่มีความดันต่ำอย่างน้อย 10^{-1} ทอร์ เพื่อไม่ให้เกิดการย้อนกลับ (back pressure) ซึ่งความดันนี้เครื่องสูบลูโรตารีจะทำหน้าที่รักษาระดับความดันไว้ต่อเนื่อง เมื่อน้ำมันที่ควมแน่นกลับสู่

หม้อต้มก็จะกลายเป็นไอออกทางปล่องเป็นวัฏจักรต่อเนื่อง ด้วยความเร็วในการสูบอากาศสูงเป็น 50-100 ลิตรต่อวินาที จนได้ความดันสุญญากาศสูงในระดับ 10^{-5} - 10^{-8} ทอร์ ขึ้นกับชนิดของน้ำมัน ขนาดของเครื่องสูบ และความเย็นของผนังเครื่องสูบ

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติของน้ำมันสำหรับเครื่องสูบคิฟิวชันบางชนิด[6]

		Balzers Oil 61	Balzers Oil 71	DC 704	AN 175	Santovac 5
Baffle with						
LN ₂ cooling	mbar	$< 6 \times 10^{-8}$	$< 6 \times 10^{-9}$	$< 6 \times 10^{-9}$	$< 6 \times 10^{-9}$	$< 6 \times 10^{-9}$
Machine cool. -20 °C	mbar	$< 6 \times 10^{-7}$	$< 6 \times 10^{-8}$	$< 3 \times 10^{-8}$	$< 3 \times 10^{-8}$	$< 3 \times 10^{-8}$
Water cooling 20 °C	mbar	$< 4 \times 10^{-6}$	$< 4 \times 10^{-7}$	$< 6 \times 10^{-8}$	$< 3 \times 10^{-8}$	$< 3 \times 10^{-8}$
Air cooling 25 °C	mbar	$< 1 \times 10^{-5}$	$< 1 \times 10^{-6}$	$< 5 \times 10^{-7}$	$< 2 \times 10^{-7}$	$< 2 \times 10^{-7}$