บทที่ 2
รังสีเอ็กซ์

วัตถุประสงค์

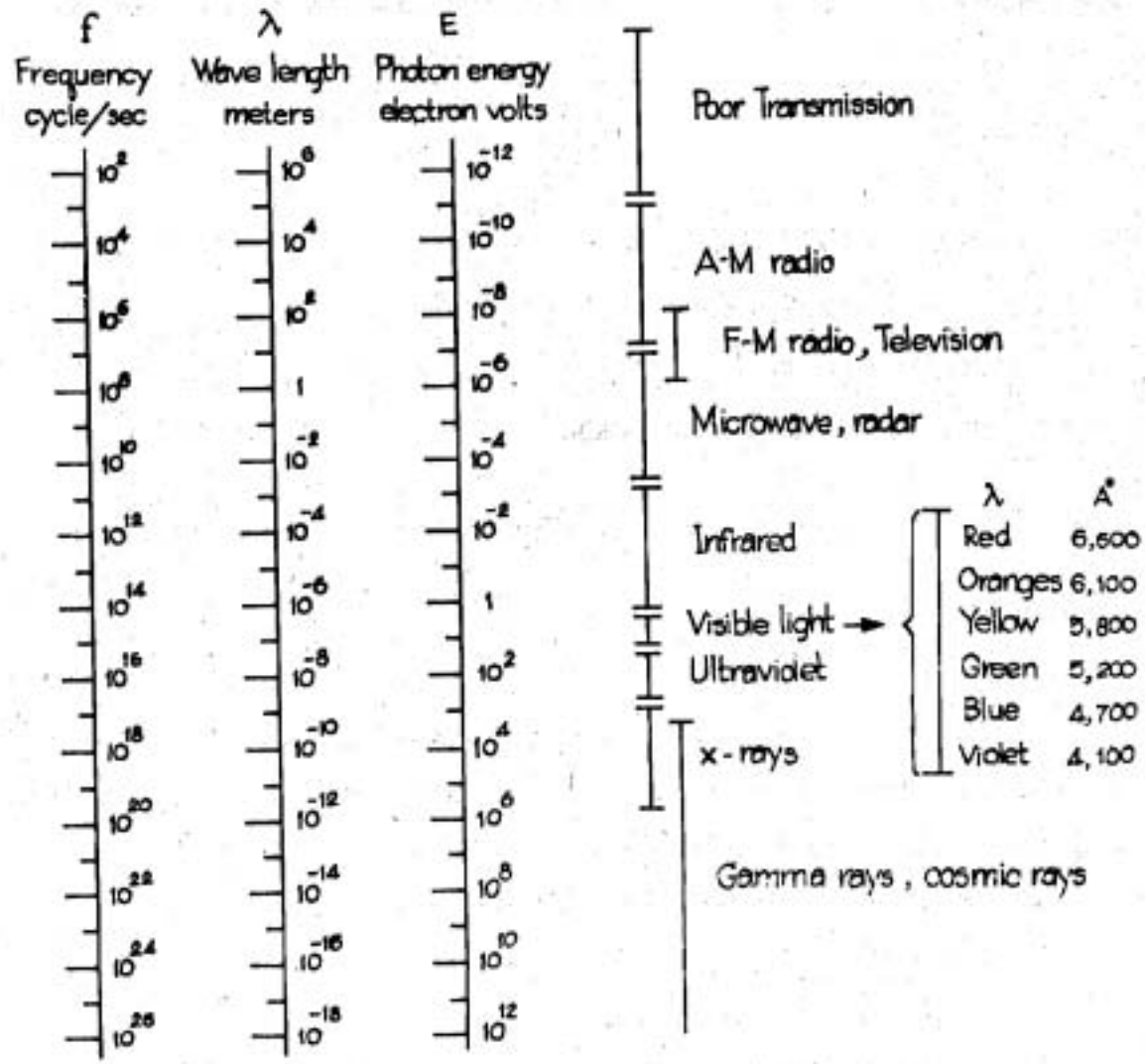
1. ศึกษาการเกิดรังสีเอ็กซ์ในระดับอะตอม
2. ศึกษาเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์
3. ศึกษาหลอดรังสีเอ็กซ์
4. ศึกษาวงจรที่ใช้ในเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

2.1 บทนำ

รังสีเอ็กซ์ถูกค้นพบโดยเรนเก้น (Wilhelm Conrad Roentgen) ในปีค.ศ. 1895 ขณะที่เขากำลังศึกษาหลอดสูญญากาศ เขาตั้งชื่อว่า เอ็กซ์ (X) เพราะว่าเขาไม่ทราบว่า มันคืออะไร เขารู้แต่เพียงว่า เป็นรังสีที่เกิดขึ้นเมื่อยิงอีเล็คตรอนความเร็วสูงไปยังโลหะ ปัจจุบันเราทราบว่า รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นประมาณ 0.01 - 100 อังสตรอม ปัจจุบันเราทราบแล้วว่ารังสีเอ็กซ์มีคุณสมบัติดังนี้

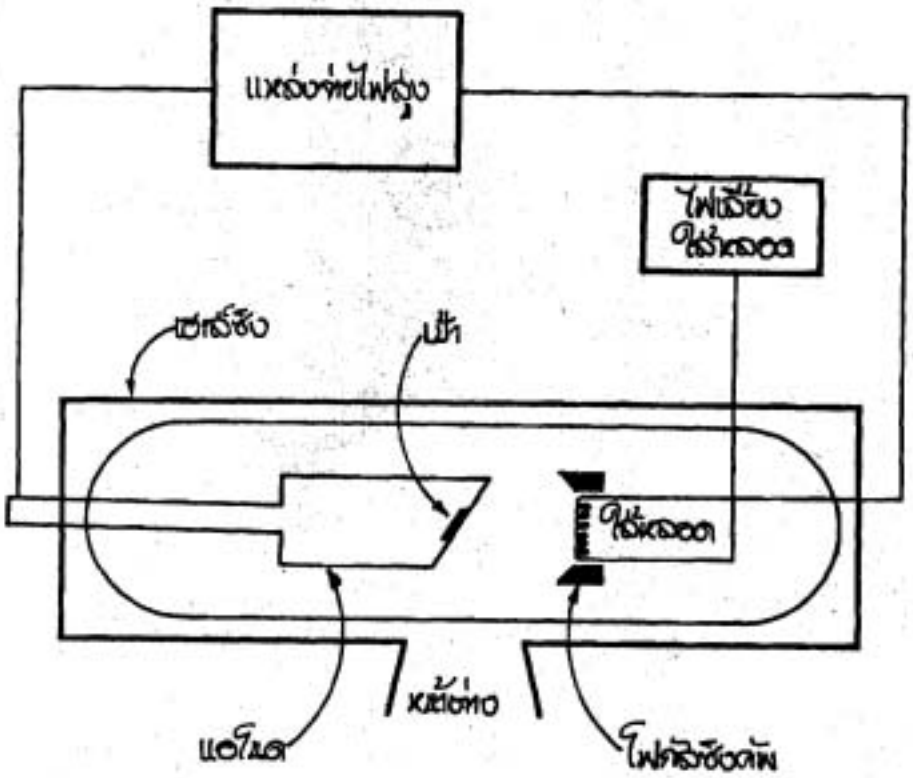
1. เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีความยาวคลื่นประมาณ 0.01 - 100 อังสตรอม
2. ทางเดินเป็นเส้นตรงเช่นเดียวกับแสงสว่าง สามารถผ่านสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กได้โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงประการใด
3. สามารถผ่านทะลุวัตถุได้มากกว่าแสงสว่าง เช่น สามารถผ่านทะลุไม้, เนื้อหนังมนุษย์, สัตว์, โลหะบางๆ, กระดาษดำได้
4. ทำให้เกิดความดำบนฟิล์มถ่ายรูปได้ เช่นเดียวกับแสงสว่าง
5. ทำให้สารบางอย่างเรืองแสงได้

6. ทำให้แกสแตกตัวได้
7. ทำให้เนื้อเยื่อของสิ่งที่มีชีวิตเกิดการเปลี่ยนแปลงได้



รูปที่ 2.1 คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

2.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

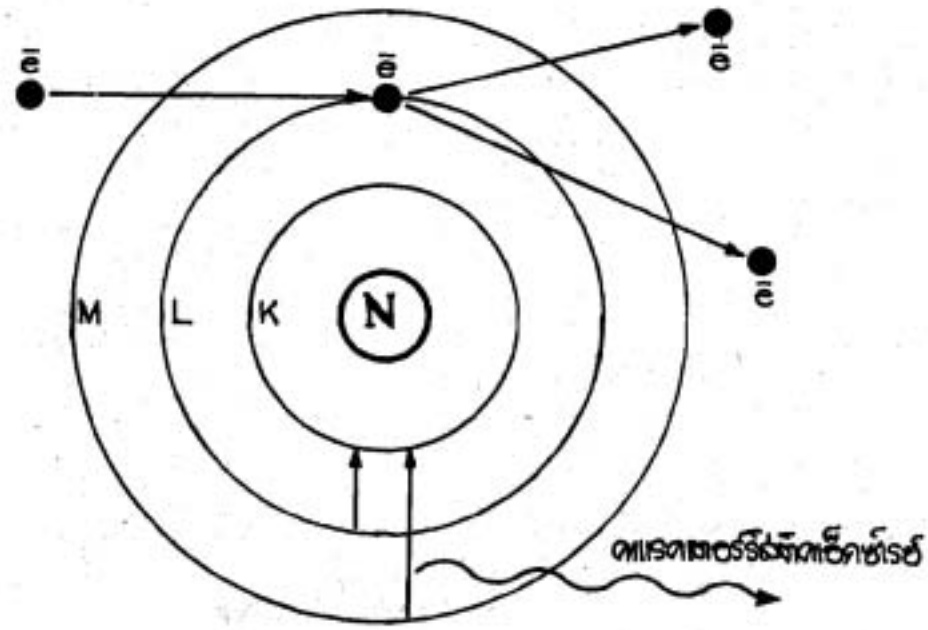


รูปที่ 2.2 เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วยหลอดสูญญากาศ ภายในมีขั้วไฟฟ้าสองขั้ว ไส้หลอด (filament) ต่อกับขั้วลบเป็นขดลวดลักษณะเหมือนกับขดลวดของหลอดไฟ อีกด้านหนึ่งเป็นเป้า (target) ทำด้วยโลหะที่มีเลขมวลสูง เช่น ทังสเตน (tungsten) หรือโมลิบดีนัม (molybdenum) ต่อกับขั้วบวก ทั้งขั้วลบและขั้วบวกต่อกับแหล่งแหล่งจ่ายไฟตรงที่มีแรงเคลื่อนไฟฟ้าสูงกว่า 20 กิโลโวลต์ เมื่อให้กระแสไหลผ่านไส้หลอด จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากไส้หลอด ขั้วบวกจะดึงดูดอิเล็คตรอนเข้าหา ทำให้อิเล็คตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น เมื่อพุ่งเข้ากระทบขั้วบวกซึ่งต่อกับเป้า พลังงานจำนวนนี้จะถูกเปลี่ยนออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์และความร้อน

2.3 กำเนิดรังสีเอ็กซ์ในระดับอะตอม

1. เกิดการชนกับอิเล็คตรอนที่อยู่ในวงโคจรของอะตอมของเป้า ถ้าพลังงานที่ส่งให้อิเล็คตรอนมากกว่าพลังงานที่ยึดอิเล็คตรอนได้ จะทำให้อิเล็คตรอนหลุดออกจากอะตอม



รูปที่ 2.8 แสดงการเกิดคาแรคเตอร์ริสติคเอ็กซ์เรย์

อีเล็คตรอนจากวงโคจรอื่นที่อยู่ห่างจากนิวเคลียสมากกว่าจะวิ่งเข้าไปแทนที่พร้อมกับคายพลังงานออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์ชนิดนี้มีชื่อเรียกว่า คาแรคเตอร์ริสติคเอ็กซ์เรย์ (Characteristic X-rays) จะมีพลังงานเฉพาะบางค่าเท่านั้น โดยมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานตึงดูดของอีเล็คตรอนในวงจรโคจรเริ่มต้น และวงโคจรสุดท้าย

2. ถ้าอีเล็คตรอนวิ่งผ่านใกล้นิวเคลียสจะถูกดูดโดยสนามไฟฟ้า ที่เกิดจากประจุบวกที่มีในนิวเคลียส ทำให้เกิดการเปลี่ยนทิศทาง ขบวนการนี้ทำให้พลังงานของอีเล็คตรอนลดลง โดยคายออกมาในรูปรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์นี้มีชื่อเรียกว่า เบรมสตราลัง (Bremsstralung) พลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่มีกำเนิดแบบนี้ จะมีค่าตั้งแต่มากกว่าศูนย์เล็กน้อยถึงค่าสูงสุดเท่าที่จะมีได้

พลังงานของรังสีเอ็กซ์ $(E_x) = \frac{1}{2} mV_i^2 - \frac{1}{2} mV_f^2$

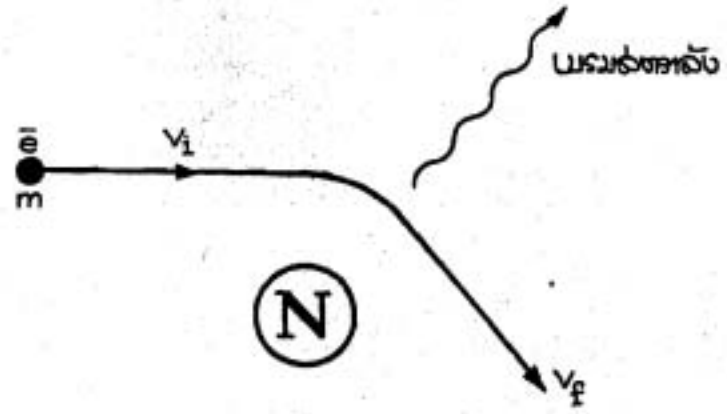
เมื่อ m = มวลของอีเล็คตรอน

V_i = ความเร็วของอีเล็คตรอนเมื่อเริ่มวิ่งผ่านนิวเคลียส

V_f = ความเร็วของอีเล็คตรอนหลังจากวิ่งผ่านนิวเคลียส

รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นนี้จะมีความถี่ต่างๆ มากมายหลายขนาดขึ้นอยู่กับ

1. ระยะทางใกล้ที่สุดระหว่างอีเล็คตรอนกับนิวเคลียสนั้น
2. ขนาดความเร็วของอีเล็คตรอนที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดเบรมสตราลัง

ความถี่สูงสุดของรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นเมื่อ $V_f = 0$ ซึ่งก็คือ อีเล็คตรอนถูกนิวเคลียสดึงไว้จนหยุดนิ่งในการชนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น นั่นคือ

$$E_X(max) = \frac{1}{2} mV_i^2 = hf_{max} = \text{พลังงานจลน์ของอีเล็คตรอน}$$

แต่พลังงานจำนวนนี้ได้มาจากความต่างศักย์ V ดังนั้น

พลังงานจลน์ = eV

หรือ $$hf_{max} = eV$$

ตัวอย่างที่ 2.1 จงคำนวณความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้น จากหลอดรังสีเอ็กซ์ที่มีความต่างศักดา 15,000 โวลต์ กำหนดให้ค่าคงที่ของแพลงค์ = 6.625×10^{-34} จูล.วินาที ความเร็วแสง = 3×10^8 เมตร/วินาที

วิธีทำ ความยาวคลื่นสั้นที่สุดเมื่อความถี่มากที่สุด

ความถี่มากที่สุดเกิดขึ้นเมื่อ $hf_{max} = eV$

จาก $\lambda_{min} = \frac{c}{f_{max}}$

คูณทั้งข้างบนและข้างล่าง, $\lambda_{min} = \frac{hc}{hf_{max}}$

ดังนั้น $\lambda_{min} = \frac{hc}{eV}$

แทนค่า $\lambda_{min} = \frac{(6.625 \times 10^{-34})(3 \times 10^{8})}{(1.6 \times 10^{-19})(15{,}000)}$ เมตร

$= 8.28 \times 10^{-11}$ เมตร

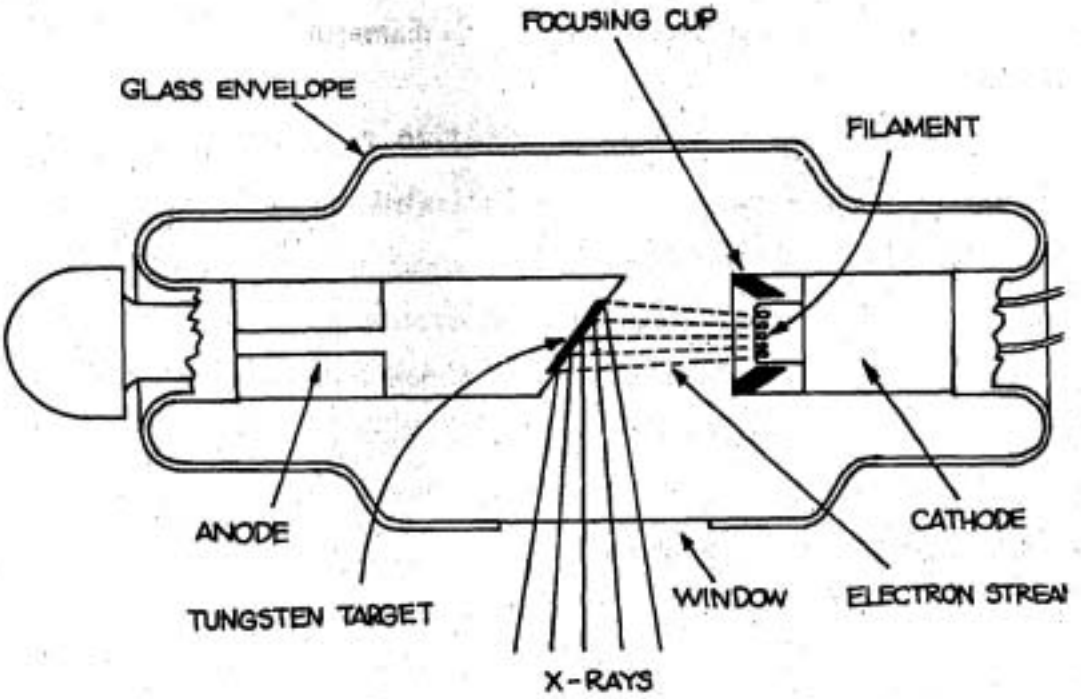
$= 0.828$ อังสตรอม

ความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นจากหลอดรังสีเอ็กซ์ที่มีความต่างศักดา 15,000 โวลต์ เท่ากับ 0.828 อังสตรอม

2.4 ส่วนประกอบของเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตรังสีเอ็กซ์

เครื่องมือที่ใช้ในการผลิตรังสีเอ็กซ์ประกอบด้วย

1. แหล่งกำเนิดอีเล็กตรอน (electron source)
2. ไฟแรงสูงเพื่อใช้เร่งอีเล็กตรอน (high voltage)
3. ทางเดินของอีเล็กตรอน (electron path)
4. เป้า (target)
5. หลอดแก้วสูญญากาศ (vacuum tube)



รูปที่ 2.5 แสดงหลอดรังสีเอ็กซ์เบื้องต้น

แหล่งกำเนิดอีเล็คตรอน

แหล่งกำเนิดอีเล็คตรอนแบ่งเป็นสองชนิด คือ

1. ในระยะแรกหลอดรังสีเอ็กซ์ไม่ได้เป็นสูญญากาศที่เดียว ภายในมีอะตอมของแกสเหลืออยู่ เมื่อให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน อะตอมจะเกิดการแตกตัวได้ไอออนคู่ ไอออนบวกจะวิ่งชนขั้วลบ ทำให้อีเล็คตรอนหลุดออกจากขั้วลบ

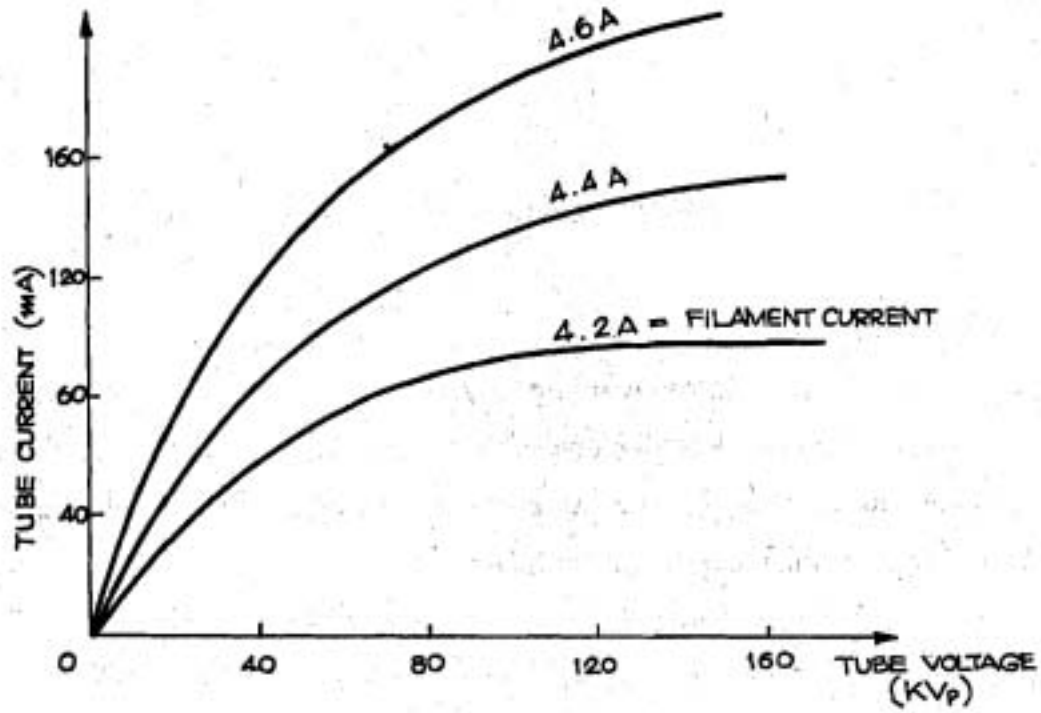
2. ในระยะต่อมาประมาณปี ค.ศ. 1913 คูลลิดจ์ (Coolihge) ปรับปรุงหลอดรังสีเอ็กซ์ให้ดีขึ้น การใช้ไส้หลอดที่ร้อนเป็นตัวให้อีเล็คตรอนหลอดรังสีเอ็กซ์แบบนี้เนต้นแบบของหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในปัจจุบัน

ไส้หลอดทำจากโลหะที่มีจุดหลอมตัวสูง เช่น ทังสเตน (จุดหลอมตัว 3.370°) เมื่อให้กระแสไฟฟ้าผ่านไส้หลอดจะทำให้ไส้หลอดมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ทำให้อีเล็คตรอนหลุดออกมายิ่งเพิ่มกระแสมาก อีเล็คตรอนก็จะหลุดออกมามาก รอบๆ ไส้หลอดจะมีโลหะหุ้มอยู่ เพื่อทำให้อีเล็คตรอนเคลื่อนไปยังตำแหน่งที่ต้องการเรียกว่า โฟคัสซิงคัพ (Focusing cup) ทั้งไส้หลอดและโฟคัสซิงคัพ อาจจะรวมเรียกชื่อว่า แคโทดแอสเซมบี (cathode assembly)

จุดโฟกัส (focal spot) เป็นบริเวณพื้นที่ของเป้าที่อิเล็คตรอนตกกระทบและให้รังสีเอ็กซ์ออกมา

การถ่ายภาพอวัยวะภายในโดยใช้รังสีเอ็กซ์ มีชื่อเรียกว่า เรดิโอกราฟ (radiograph) ถ้าต้องการให้ได้รายละเอียด (detail) ของภาพจะต้องใช้จุดโฟกัสขนาดเล็ก ซึ่งได้จากไส้หลอดที่มีขนาดเล็ก ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ไฟน์ฟิลลาเมนท์ (fine filament) แต่ไส้หลอดขนาดเล็กไม่สามารถทนกระแสได้มากนัก ดังนั้น ถ้าต้องการถ่ายภาพโดยใช้ระยะวลาน้อย และต้องการความเข้มสูง เช่น คนไข้ เด็ก อาจจะมีการเคลื่อนไหว จึงต้องใช้ไส้หลอดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งมีชื่อเรียกว่า คอสฟิลลาเมนท์ (coarse filament) ดังนั้น หลอดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนี้จะมีไส้หลอดทั้งสองชนิด

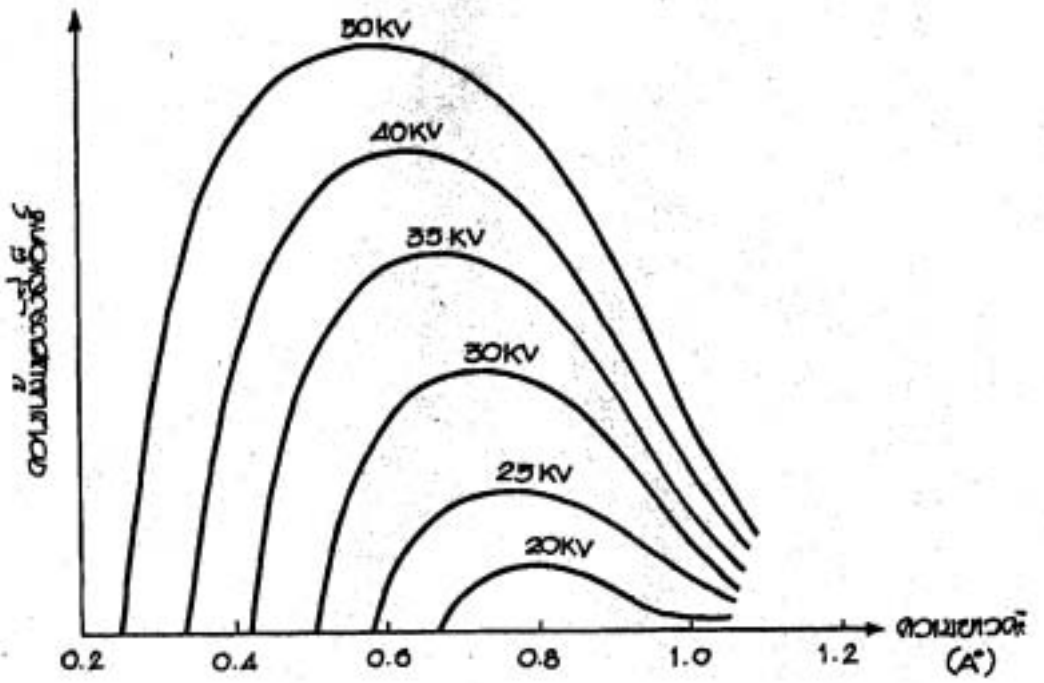
ความต่างศักย์ของหลอด (Tube voltage)



รูปที่ 2.6 แสดงอิทธิพลของความต่างศักย์ระหว่างหลอดและกระแสไส้หลอดที่มีผลต่อการไหลของอิเล็คตรอนจากไส้หลอดไปยังเป้า

ความต่างศักย์ระหว่างหลอดและเป้าของหลอดรังสีเอ็กซ์ มีผลต่อความเข้มและพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่ออกมา เมื่อความต่างศักย์ระหว่างหลอดต่ำ จำนวนอิเล็คตรอนที่หลุดออก

มาจากไส้หลอดต่ำทำให้อิเล็คตรอนรวมตัวกันอย่างหนาแน่นรอบๆ ไส้หลอด ซึ่งจะมีผลให้อิเล็คตรอนหลุดจากไส้หลอดน้อยลง รูปที่ 2.6 แสดงถึงอิทธิพลของความต่างศักย์ของหลอดและกระแสไส้หลอด (filament current) ที่มีผลต่อการไหลของอิเล็คตรอนจากไส้หลอดไปยังเป้า เมื่อกระแสไส้หลอดต่ำ ถ้าเพิ่มความต่างศักย์ของหลอด กระแสที่ไหลผ่านรังสีเอ็กซ์จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ไม่ว่าจะเพิ่มความต่างศักย์ระหว่างหลอดเท่าไร กระแสที่ไหลผ่านหลอดก็ยังคงมีค่าคงที่ ความต่างศักย์ที่อยู่ในช่วงนี้เรียกว่า ความต่างศักย์อิ่มตัว (saturation voltage) เมื่อกระแสไส้หลอดมาก จะไม่พบความต่างศักย์อิ่มตัว



รูปที่ 2.7 แสดงถึงผลของความต่างศักย์ระหว่างหลอดที่มีต่อความเข้มและพลังงานของเบรมสตราลัง

โฟตอนที่มีพลังงานมากที่สุด จะมีความยาวคลื่นสั้นที่สุด (λ_{min}) ถ้าทราบค่าแรงดันพีก (peak voltage) ของหลอดรังสีเอ็กซ์จะสามารถคำนวณหาความยาวคลื่นสั้นที่สุดได้ เพราะว่ากิโลโวลต์พีก (KV_p) มีค่าเท่ากับพลังงานสูงสุด (E_{max}) ของรังสีเอ็กซ์

$$E_{max} = hf_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}}$$

แทนค่า

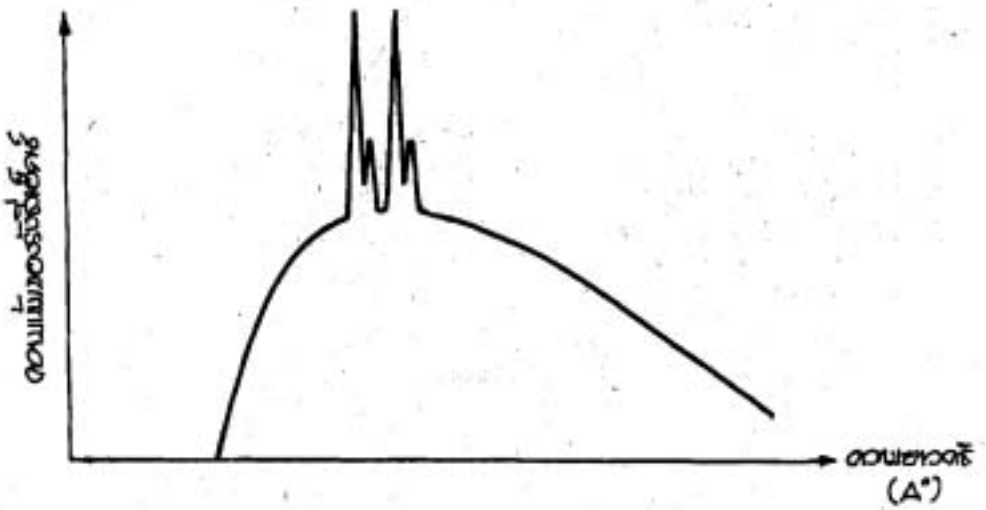
$$E_{max} = \frac{(6.625 \times 10^{-34})(3 \times 10^{8})}{(\lambda_{min} \times 10^{-10})(1.6 \times 10^{-19})}$$

$$= \frac{12.4}{\lambda_{min}} \quad \text{KeV}$$

$$\lambda_{min}(A^{\circ}) = \frac{12.4}{E_{max}\ (\text{KeV})}$$

หรือ $$\lambda_{min}(A^{\circ}) = \frac{12.4}{KV_p}$$

จำนวนเบรมสตราลังจะเพิ่มขึ้น ถ้าแรงดันระหว่างขั้วทั้งสองของหลอดรังสีเอ็กซ์เพิ่มมากขึ้น เมื่อแรงดันหลอดมากกว่า 70 เควีพี (KV_p) จะเกิดพีกจำเพาะ (characteristic peak) ขึ้น ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แสดงพีกจำเพาะ (characteristic peak)

ตัวอย่างที่ 2.2 จงคำนวณพลังงานสูงสุดและความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากหลอดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีค่าแรงดันหลอดพีกเท่ากับ 100 เควีพี

วิธีทำ เนื่องจากแรงดันหลอดสูงสุด = 100 เควีพี

ดังนั้นพลังงานสูงสุด = 100 เคอีวี

จาก $$\lambda_{min} = \frac{12.4}{KV_p}$$

แทนค่า $\lambda_{min} = \frac{12.4}{100} = 0.124$ อังสตรอม

ความดันภายในหลอด

ภายในหลอดรังสีเอ็กซ์จะเป็นสูญญากาศมีความดันน้อยกว่า 10^{-5} มิลลิเมตร ของปรอท ป้องกันไม่ให้ไส้หลอดที่ร้อนมากเกินไปเกิดการลุกไหม้ และทำให้อิเล็คตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปมาในหลอดรังสีเอ็กซ์ได้อย่างสะดวก อย่างไรก็ตามหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ใช้มาเป็นเวลานานอาจมีแกสเพิ่มมากขึ้น จนอาจทำให้ไส้หลอดถูกทำลายได้

หลอดแก้วสูญญากาศ

หลอดรังสีเอ็กซ์เป็นหลอดแก้วสูญญากาศ วางอยู่ในกล่องโลหะมีชื่อเรียกว่า เฮาส์-ซิง (housing) แผ่นตะกั่วในเฮาส์ซิงเป็นตัวกันรังสีที่ไม่ต้องการไม่ให้ออกมาภายนอก ช่องเปิดให้รังสีเอ็กซ์ออกมา เรียกว่า คอลลิเมเตอร์ (collimator) สามารถตั้งขนาดของลำรังสีได้

เป้าและแอโนด

เมื่ออิเล็คตรอนวิ่งชนเป้า พลังงานส่วนใหญ่จะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานส่วนน้อยเพียง 1 เปอร์เซ็นต์เท่านั้นที่เปลี่ยนเป็นรังสีเอ็กซ์ จึงทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการถ่ายเทพลังงานความร้อนจำนวนนี้ทิ้ง

คุณสมบัติของสารที่ใช้เป็นเป้า

1. มีเลขอะตอมสูง เพราะว่า สารที่มีเลขอะตอมสูง จะให้รังสีเอ็กซ์มากกว่าสารที่มีเลขอะตอมต่ำ

2. มีจุดหลอมตัวสูง เนื่องจากเกิดความร้อนขึ้นมาก เป้าจึงต้องทำจากสารที่ทนความร้อนได้ดี

3. มีการนำไฟฟ้าดี

เป้าส่วนมากทำมาจากทังสเตน (tungsten)

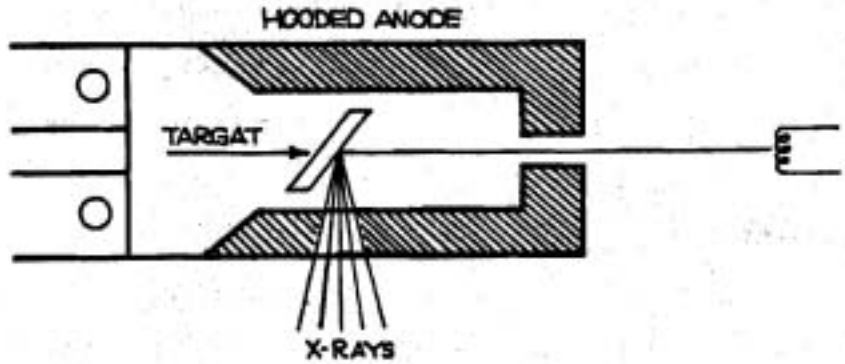
แอโนดมี 2 ชนิด

1. แอโนดคงที่ (stationary anode) เป็นแบบที่เคลื่อนที่ไม่ได้ เป้าซึ่งฝังอยู่ที่แอโนดจะถูกอิเล็คตรอนชน ณ ตำแหน่งเดิมตลอดอายุของหลอดรังสีเอ็กซ์

2. แอโนดหมุน (rotating anode) เป็นแบบที่เคลื่อนที่ได้โดยหมุนรอบแกนหมุน

ทำให้บริเวณพื้นที่รับอีเล็คตรอนเพิ่มขึ้น ทำให้ความร้อนระบายออกไปในเนื้อที่กว้าง ตามปกติแอโนดหมุนด้วยความเร็วประมาณ 10,000 รอบต่อนาที ต้องหมุนแอโนดประมาณ 1 นาที ก่อนที่จะให้ความต่างศักย์แก่หลอดรังสีเอ็กซ์ เพื่อป้องกันไม่ให้อีเล็คตรอนพุ่งกระทบจุดใดจุดหนึ่งบนเป้านานเกินไป อันอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายกับเป้าส่วนนั้นได้

เมื่ออีเล็คตรอนพุ่งชนเป้า นอกจากจะได้รังสีเอ็กซ์แล้ว ยังอาจจะได้อีเล็คตรอนออกมาด้วย อีเล็คตรอนเหล่านี้อาจจะวิ่งชนหลอดแก้ว หรือ ส่วนที่เป็นโลหะรอบหลอดรังสีเอ็กซ์ รังสีเอ็กซ์ที่เกิดเช่นนี้เป็นรังสีเอ็กซ์ที่นำมาใช้งานไม่ได้ และยังทำให้คุณภาพของภาพลดลงด้วย จึงต้องขจัดรังสีเอ็กซ์ที่เกิดเช่นนี้ทิ้ง โดยใช้แผ่นโลหะครอบเป้าไว้ เพื่อป้องกันและสกัดกั้นอีเล็คตรอนที่เกิดจากเป้าแผ่นโลหะนี้มีชื่อเรียกว่า ฮูดแอโนด (hooded anode)

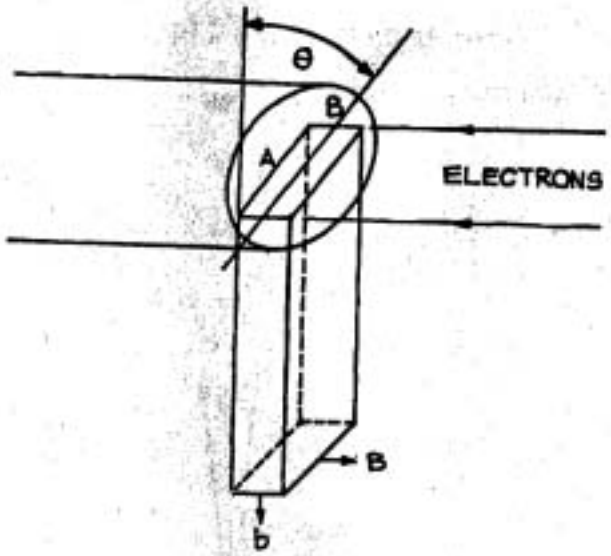


รูปที่ 2.9 แสดงฮูดแอโนด

ในการถ่ายภาพให้ได้รายละเอียดของภาพ จะต้องใช้จุดโฟคัสขนาดเล็ก ซึ่งอาจจะทำได้ 2 วิธี คือ

1. ใช้ไส้หลอดขนาดเล็ก

2. ลดขนาดปรากฏ (apparent size) ของจุดโฟคัสให้เล็กลง โดยการจัดเป้าให้เอียงทำมุมน้อยกว่า 90° กับทิศทางการเคลื่อนที่ของอีเล็คตรอน ทำให้ดูเหมือนว่า รังสีเอ็กซ์ออกมาจากจุดโฟคัสที่มีพื้นที่เล็กกว่าจุดโฟคัสที่แท้จริง (true focal spot) เรียกจุดโฟคัสนี้ว่า จุดโฟคัสปรากฏ (apparent focal spot)



รูป 2.10 แสดงจุดโฟกัสปรากฏและจุดโฟกัสจริง

ถ้า a เป็นความยาวของจุดโฟกัสปรากฏ จากรูปที่ 2.10 จะคำนวณหาค่า a ได้จาก

$$a = A \sin \theta$$

เมื่อ A = ความยาวที่แท้จริงของจุดโฟกัส

θ = มุมที่เป้าเอียงทำมุมกับเส้นตั้งฉากกับทิศทางของอิเล็คตรอน

ขนาด b ของจุดโฟกัสปรากฏ จะมีค่าเท่ากับขนาด B ของจุดโฟกัสที่แท้จริง อย่างไรก็ตาม ด้าน B สั้นกว่าด้าน A เพราะว่าความกว้างของไส้หลอด B น้อยกว่า ความยาว A เสมอ ตามปกติจุดโฟกัสปรากฏจะเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัส มีขนาดเป็นมิลลิเมตร เช่น 1, 2, 3 และ 4 มิลลิเมตร

ขนาดของจุดโฟกัสปรากฏ สามารถวัดได้โดยใช้กล้องรูเข็ม ซึ่งประกอบด้วยแผ่นโลหะทึบแสงเจาะช่องตรงกลาง ขนาดของช่องประมาณ 1/100 มิลลิเมตร แผ่นโลหะวางอยู่ระหว่างหลอดรังสีเอ็กซ์และแผ่นฟิล์ม วัดขนาดของภาพบนแผ่นฟิล์มได้ นำมาคำนวณหาขนาดของจุดโฟกัสปรากฏ

กำหนดให้ ขนาดของจุดโฟกัสปรากฏ = a

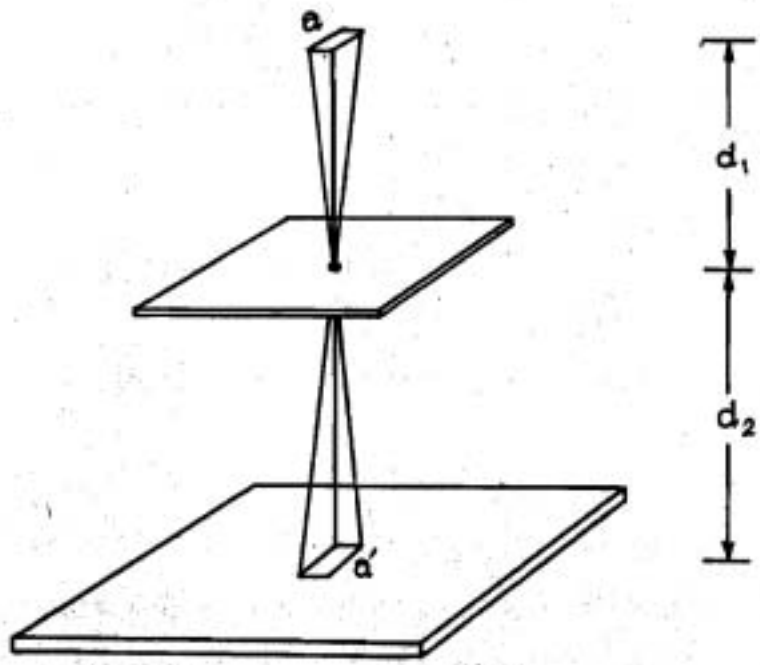
ขนาดของภาพ = a'

ระยะห่างเป้าถึงช่องบนแผ่นโลหะ = d_1

ระยะห่างระหว่างช่องบนแผ่นโลหะถึงฟิล์ม = d_2

จะคำนวณหาขนาดของจุดโฟคัสปรากฏได้

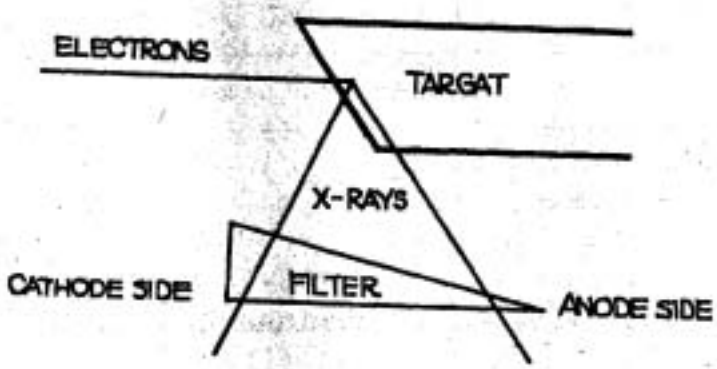
$$a = a' \frac{d_1}{d_2}$$



รูปที่ 2.11 การวัดขนาดของจุดโฟคัสปรากฏ

2.5 ฮีล เอฟเฟ็ค (heel effect)

รังสีเอ็กซ์พลังงานต่ำจะถูกดูดกลืนโดยส่วนของเป้า ทำให้ความเข้มข้นของรังสีเอ็กซ์ลดลง รังสีเอ็กซ์ทางด้านแอโนดจะถูกดูดกลืนมากกว่าทางด้านแคโทด ดังนั้น ความเข้มของรังสีเอ็กซ์ทางด้านแคโทดจะมากกว่าด้านแอโนด เรียกปรากฏการณ์ที่รังสีเอ็กซ์มีความเข้มไม่เท่ากันนี้ว่า ฮีล เอฟเฟ็ค ในทางปฏิบัติสามารถแก้ ฮีล เอฟเฟ็คได้ โดยใช้ฟิลเตอร์ (filter) ซึ่งเป็นโลหะมีความหนาไม่เท่ากันวางไว้ในเฮาส์ซิงใกล้กับจุดที่รังสีเอ็กซ์ออกมา ความหนาของฟิลเตอร์ทางด้านแอโนดน้อยกว่าความหนาทางด้านแคโทด



รูปที่ 2.12 อีฉ เอฟเฟ็ค

2.6 ความสามารถในการทำงานของหลอดรังสีเอ็กซ์

ความสามารถในการทำงานของหลอดรังสีเอ็กซ์พิจารณาจาก

1. **แรงดันหลอดสูงสุด** (maximum tube voltage) หลอดรังสีเอ็กซ์แต่ละหลอด จะมีแรงดันหลอดสูงสุดเฉพาะค่าหนึ่ง ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติต่างๆ ของหลอด เช่น ระยะห่างระหว่างแคโทดและแอโนดรูปร่างของหลอดแก้ว รูปร่างของแอโนด และรูปร่างของแคโทด ตัวอย่างเช่น แรงดันหลอดสูงสุดของเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ชนิดแมชเช็ท ไดนาแมค "25" (Machlett dynamac "25") เท่ากับ 100 เคอีวี แต่อย่างไรก็ตามหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ดีได้รับการออกแบบให้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของแรงดันที่เกิดขึ้น เป็นครั้งคราวได้มากกว่าแรงดันสูงสุดนี้

2. **กระแสและแรงดันไส้หลอดสูงสุด** (Maximum filament current and voltage) แบ่งเป็นแบบไฟน์ฟิลลาเมนท์ และคอสฟิลลาเมนท์ ตัวอย่างเช่น กระแสและแรงดันของเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์แบบแมชเช็ท ไดนาแมค "25" ซึ่งมีทั้งคอสฟิลลาเมนท์ (จุดโฟคัสปรากฏ 2 มิลลิเมตร) และไฟน์ฟิลลาเมนท์ (จุดโฟคัสปรากฏ 1 มิลลิเมตร) มีดังต่อไปนี้ จุดโฟคัสเล็ก (1 มม.) 3.0 - 7.5 โวลต์ม 3.0 - 5.0 แอมแปร์ จุดโฟคัสใหญ่ (2 มม.) 4.0 - 12.0 โวลต์, 3.0 - 5.5 แอมแปร์ สำหรับหลอดรังสีเอ็กซ์ที่ทำงานเป็นช่วง (มีการหยุดพัก) กระแสไส้หลอดสูงสุดเท่ากับ 5.5 แอมแปร์ ส่วนหลอดที่มีการทำงานติดต่อกันเป็นเวลานาน กระแสไส้หลอดสูงสุดลดลงเหลือเท่ากับ 4.5 แอมแปร์ เพราะว่า อุณหภูมิของไส้หลอดเพิ่มขึ้นมาก จนอาจจะก่อให้เกิดความเสียหายแก่ไส้หลอดได้

3. **พลังงานสูงสุด** (maximum energy) เป็นพลังงานสูงสุดที่เป้า, แอโนด และเฮาส์ซิง สามารถรับไว้ได้ กล่าวถึงในเทอมของฮีทยูนิต (heat unit) ใช้ตัวย่อ hu โดยที่

ฮีตยูนิต = (แรงดันหลอด)(กระแสหลอด)(เวลา)

hu = (KVP)(mA)(S)

ตัวอย่างเช่น เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ชนิดแมชเช็ทไดนาแม็ค "25" มีค่าพลังงานสูงสุดดังนี้

ก. แอโนดสะสมพลังงานได้มากที่สุดเท่ากับ 72,000 ฮีทยูนิต

ข. เฮาส์ชิงสะสมพลังงานได้มากที่สุดเท่ากับ 1,000,000 ฮีทยูนิต

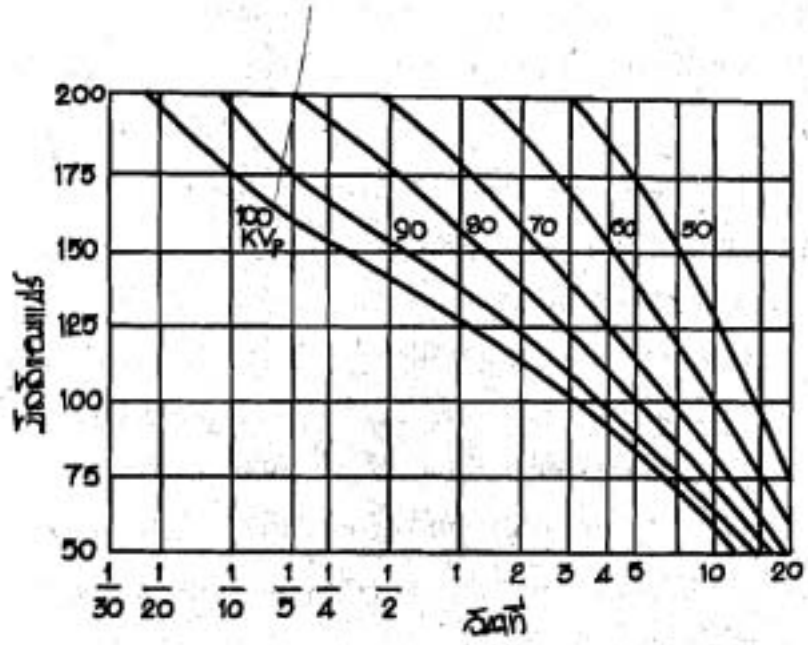
การพิจารณาว่าเป้า, แอโนด และเฮาส์ชิงของหลอดรังสีเอ็กซ์สามารถทนต่อการทำงานได้หรือไม่ ให้ใช้กราฟต่อไปนี้

ก. กราฟสำหรับเป้า

ข. กราฟสำหรับแอโนด

ค. กราฟสำหรับเฮาส์ชิง

กราฟสำหรับเป้า



รูปที่ 2.18 กราฟสำหรับเป้าของเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ชนิดแมชเช็ทไดนาแม็ค "25" ซึ่งมีจุดโฟกัส 1 มิลลิเมตร

การพิจารณาว่าเป้าสามารถทนต่อการทำงานได้หรือไม่ ให้ใช้กราฟสำหรับเป้าในรูปที่ 2.13 วิธีการใช้กราฟมีดังต่อไปนี้ ลากเส้นเริ่มต้นจากกระแสหลอดที่ใช้ขนานกับแกน x ไปตัดกับกราฟของแรงดันที่ใช้จากจุดตัดลากเส้นขนานกับแกน y ไปพบกับเวลา เวลาที่อ่านได้เป็นเวลามากที่สุดที่หลอดรังสีเอ็กซ์หลอดนี้สามารถทนได้ ถ้าใช้เวลามากกว่านี้หลอดรังสีเอ็กซ์จะเกิดการเสียหาย

พื้นที่ใต้กราฟแสดงถึงกระแสหลอด และเวลาที่ไม่เกินความสามารถสูงสุดเมื่อหลอดรังสีเอ็กซ์ทำงานด้วยแรงดันใต้กราฟนั้น ส่วนพื้นที่เหนือกราฟ แสดงถึงค่ากระแสหลอดและเวลาที่มากเกินกว่าที่หลอดรังสีเอ็กซ์จะทนได้

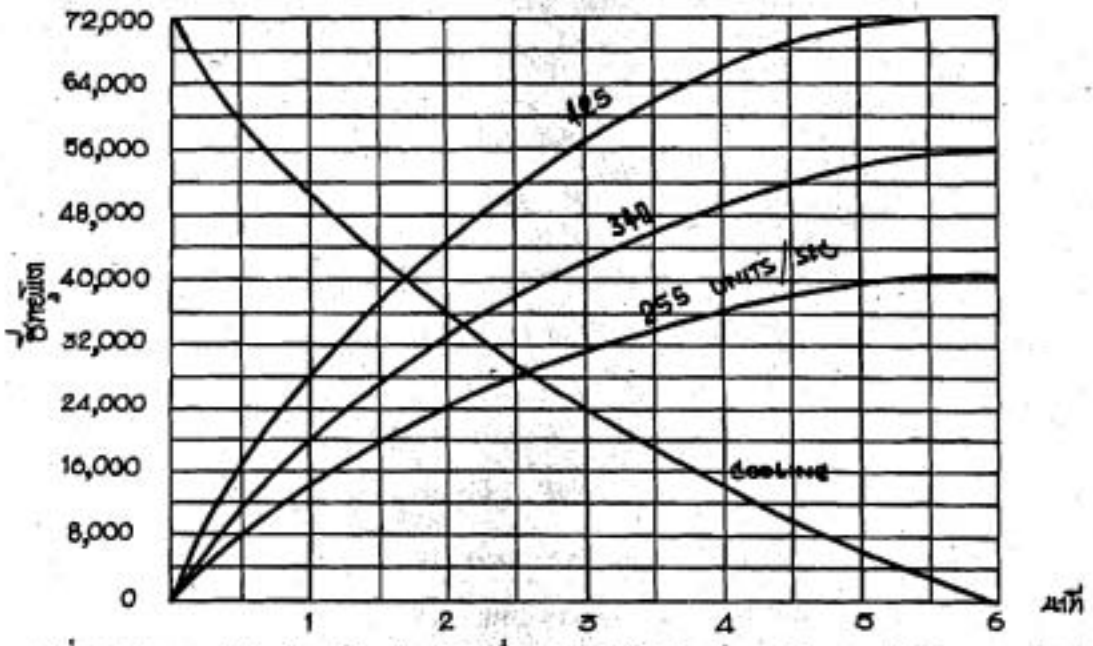
ตัวอย่างที่ 2.3 ให้ใช้กราฟสำหรับเป้ารูปที่ 2.13 หาว่าจะทำการถ่ายรูปโดยใช้เทคนิคต่อไปนี้แล้วเป้าสามารถทนได้หรือไม่

ก. 150 มิลลิแอมแปร์, 1 วินาที และ 100 เควีพี

ข. 100 มิลลิแอมแปร์, 1.5 วินาที และ 100 เควีพี

วิธีทำ ก. จากกราฟจะได้ว่า เวลาสูงสุดที่ใช้น้อยกว่า 1/4 วินาที สำหรับ 150 มิลลิแอมแปร์ และ 100 เควีพี ดังนั้นจึงถ่ายรูปโดยใช้เทคนิคนี้ไม่ได้

ข. สำหรับ 100 มิลลิแอมแปร์ และ 100 เควีพี เวลาสูงสุดเท่ากับ 3 วินาที ดังนั้นจึงสามารถใช้เทคนิคนี้ได้



รูปที่ 2.14 กราฟสำหรับแอโนดสำหรับเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ชนิดแมชเชี่ทไดนาแมท "25"

กราฟสำหรับแอโนดแสดงถึงจำนวนพลังงานสูงสุดที่แอโนดสามารถรับไว้ได้ การพิจารณาจะรวมถึงความร้อนที่ส่งแอโนดไปยังเฮาส์ซิงด้วย ตัวอย่างเช่น เครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ชนิดแมชเช็ทไดนาแมค "25" ความร้อนจำนวน 425 ฮีทยูนิตต่อวินาที จะมีค่าเกินที่แอโนดสามารถทนได้หลังจากเวลาผ่านไป 6 นาที แต่ความร้อนจำนวน 340 ฮีทยูนิตต่อวินาที จะให้นานเท่าไรก็ได้ รูปที่ 2.14 จะมีกราฟอีกเส้นหนึ่งซึ่งแสดงถึงอัตราการเย็นลงของแอโนดหลังจากเก็บความร้อนไว้จำนวนหนึ่ง

ตัวอย่างที่ 2.4 ถ่ายภาพโดยใช้รังสีเอ็กซ์นาน 5 นาที โดยใช้กระแสหลอด 4 มิลลิแอมแปร์ และแรงดันหลอด 100 เควีพี หลังจากนั้นก็ถ่ายภาพจุดต่างๆ อีก 8 ครั้ง แต่ละครั้งใช้เวลา 1/2 วินาที, 100 เควีพี และ 100 มิลลิแอมแปร์ ให้หาว่า หลอดรังสีเอ็กซ์จะสามารถทนได้หรือไม่

วิธีทำ ต้องดูว่า 1. หลอดรังสีเอ็กซ์สามารถทนได้หรือไม่โดยใช้กราฟสำหรับเป้า

2. แอโนดสามารถทนได้หรือไม่โดยใช้กราฟสำหรับแอโนด

จากกราฟสำหรับเป้ารูปที่ 2.13 พบว่า เป้าสามารถทนได้ อัตราการถ่ายเทพลังงานให้แก่แอโนดระหว่างการถ่ายภาพ

= (100 KVP)(4 mA)

= 400 hu / s

จากกราฟรูปที่ 2.14 พบว่า หลังจากเวลาผ่านไป 5 นาทีแล้ว ความร้อนจำนวน 400 ฮีทยูนิตต่อวินาที จะสะสมอยู่ที่แอโนดเท่ากับ 65,000 ฮีทยูนิต

การถ่ายรูปจุดต่างๆ อีก 8 จุด จะเพิ่มพลังงานให้แก่แอโนด

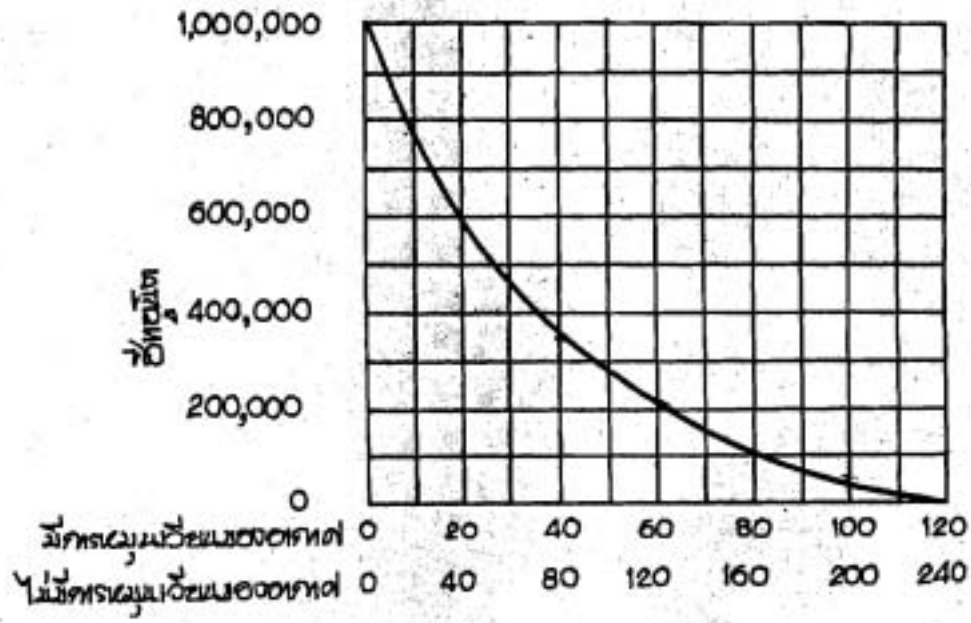
= (100 KVP)(100 mA)($^1/_2$ s) x 8

= 40,000 hu

หลังจากถ่ายภาพทั้งหมดแล้ว ปริมาณความร้อนที่เก็บอยู่ในแอโนดเท่ากับ 40,000 + 65,000 = 105,000 ฮีทยูนิต ความร้อนจำนวนนี้เกินกว่าแอโนดจะรับไว้ได้ เพราะว่าแอโนดรับพลังงานได้มากที่สุดเท่ากับ 72,000 ฮีทยูนิตเท่านั้น จึงใช้เทคนิคนี้ไม่ได้

กราฟสำหรับเฮาส์ซิงแสดงถึงอัตราการเย็นของเฮาส์ซิง หลังจากที่ได้รับพลังงานความร้อนจากแอโนด แบ่งเป็น 2 ชนิด คือ สำหรับเฮาส์ซิงที่มีการไหลเวียนของอากาศ และเฮาส์ซิงที่ไม่มีการหมุนเวียนของอากาศ เมื่อมีการไหลเวียนของอากาศ อัตราการเย็นลงจะมีค่ามากกว่า เมื่อไม่มีการไหลเวียนของอากาศ

กราฟสำหรับเฮาส์ชิง



รูปที่ 2.15 กราฟสำหรับเฮาส์ชิงของเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ชนิดแมชชีทไดนามิค "25"

2.7 ชนิดของหลอดรังสีเอ็กซ์

หลอดรังสีเอ็กซ์แบ่งตามการใช้งานได้ 2 พวก คือ

1. หลอดรังสีเอ็กซ์รักษา (therapeutic x - ray tube) ใช้ในการรักษาโรค มีกระแสประมาณ 2 - 30 มิลลิแอมแปร์ ต้องการลำรังสีกว้าง ไม่คำนึงถึงโฟกัสมากนัก มีระบบถ่ายเทความร้อนที่ดี เพราะว่าจะต้องใช้งานเป็นเวลานาน

2. หลอดรังสีเอ็กซ์วินิจฉัยโรค (diagnostic x - ray tube) ใช้ในการตรวจโรค ถ่ายภาพอวัยวะภายในร่างกาย จุดโฟกัสมีความสำคัญมาก เพราะต้องการรายละเอียดของภาพ

ถ้าแบ่งตามชนิดของแอโนดแบ่งได้เป็น 2 พวก เช่นกัน คือ

1. หลอดที่แอโนดอยู่กับที่ (stationary anode tube)
2. หลอดที่แอโนดหมุนได้ (rotating x - ray tube)

2.8 ความผิดปกติของหลอดรังสีเอ็กซ์

หลอดรังสีเอ็กซ์ เมื่อใช้เป็นเวลานาน อาจจะเกิดความผิดปกติขึ้น ดังนี้

1. ไส้หลอดขาด เกิดจากการกระแทกกระทั้น โดยเฉพาะเครื่องกำนิดรังสีเอ็กซ์

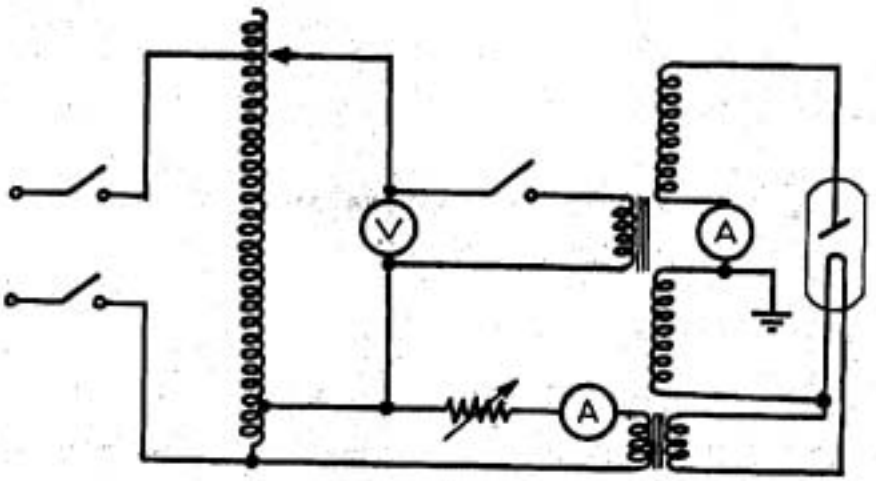
ชนิดที่เคลื่อนที่ได้ หรือเกิดจากการสึกหรอเพราะใช้งานมานาน

2. เป้าเสียหาย เกิดจากอิเล็คตรอนพุ่งเข้าชนเป้าแล้วทำให้เกิดความร้อนขึ้น ทำลายผิวของเป้า เมื่อเป้าเกิดการชำรุดลง ปริมาณความเข้มของรังสีเอ็กซ์ลดน้อยลง จึงต้องเพิ่มเวลาในการถ่ายภาพให้มากขึ้น

3. หลอดแก้วทะลุ เกิดจากการไม่ระมัดระวังในการใช้

4. หลอดมีแกส บางครั้งแกสอาจจะถูกปล่อยออกมาจากชิ้นส่วนภายในหลอด เช่น ไปของทังสเตนจากไส้หลอด ถ้าไปเคลือบหลอดแล้ว จะกรองรังสีเอ็กซ์บางส่วน ทำให้ความเข้มลดลงได้

2.9 วงจรที่ใช้ในเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.16 วงจรเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์เบื้องต้น

ประกอบด้วย

1. วงจรจ่ายไฟแรงสูง สำหรับหลอดรังสีเอ็กซ์ มีค่าเป็นกิโลโวลต์ ใช้ทรานส์ฟอร์เมอร์ชนิดเพิ่มแรงดัน

2. วงจรเลี้ยงไส้หลอด มีค่าต่ำเป็นโวลต์ สำหรับไส้หลอด

วงจรที่ใช้งานจริง จะมีส่วนประกอบนอกเหนือไปจากนี้มาก

แบบฝึกหัดที่ 2

1. จงหาพลังงาน, มวล และโมเมนตัมของโฟตอนที่มีความยาวคลื่น 0.016 อังสตรอม
2. จงหามวลของโฟตอนต่อไนี้
   ก. แสงสีแดง (ความยาวคลื่นเท่ากับ 7×10^{-5} ซม.)
   ข. รังสีเอ็กซ์ (ความยาวคลื่นเท่ากับ 0.25 อังสตรอม)
   ค. รังสีแกมมา (ความยาวคลื่นเท่ากับ 1.24×10^{-2} อังสตรอม)
3. จงหาความเร็วของอีเล็คตรอนที่มีโมเมนตัมเท่ากับโฟตอนที่มีความยาวคลื่น $\lambda = 5{,}200$ อังสตรอม
4. จงหาความเร็วของอีเล็คตรอนที่มีพลังงานจลน์เท่ากับพลังงานของโฟตอนที่มีความยาวคลื่น $\lambda = 5{,}200$ อังสตรอม
5. โมเมนตัมจากลำโฟตอนพลังงานเดียวที่วิ่งผ่านพื้นที่ S = 2 ตารางเซ็นติเมตร ในช่วงเวลา t = 0.5 นาที มีค่าเท่ากับ $\Gamma = 3 \times 10^{-2}$ กรัม·เซ็นติเมตร/วินาที จงหาพลังงานที่ตกกระทบพื้นที่หนึ่งหน่วยในเวลาหนึ่งหน่วยของลำโฟตอนนี้
6. พลังงานของอีเล็คตรอนของอะตอมไฮโดรเจนจะเปลี่ยนไปเท่าไร ถ้าหากว่าอะตอมไฮโดร-เจน ส่งโฟตอนที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 4,860 อังสตรอม ออกมา
7. จงหาพลังงานของโฟตอนที่มีมวลท่ากับมวลนิ่ง (rest mass) ของอีเล็คตรอน
8. จงอธิบายเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์ แสดงส่วนประกอบต่างๆ พร้อมทั้งอธิบายการทำงานด้วย
9. จงอธิบายกำเนิดรังสีเอ็กซ์ในระดับอะตอม
10. จงอธิบายถึงส่วนประกอบที่มีผลต่อความเข้มและพลังงานของรังสีเอ็กซ์
11. ให้ความต่างศักย์กับหลอดรังสีเอ็กซ์ 60 กิโลโวลต์ พบว่า รังสีเอ็กซ์ที่เกิดขึ้นมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดเท่ากับ 0.206 อังสตรอม จงหาค่าคงที่ของแพลงก์
12. จงหาความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดของรังสีเอ็กซ์จากหลอดรังสีแกซ์ที่มีความต่างศักย์
    ก. 30 กิโลโวลต์ ข. 40 กิโลโวลต์ ค. 50 กิโลโวลต์
13. ความยาวคลื่นของรังสีแกมมาจากเรเดียม C เท่ากับ 0.016 อังสตรอม จงหาว่า จะต้องให้ความต่างศักย์แก่หลอดรังสีเอ็กซ์เท่าไร ลำรังสีเอ็กซ์ จึงจะมีความยาวคลื่นสั้นที่สุดเท่านี้
14. จงหาความยาวคลื่นที่สั้นที่สุดของรังสีเอ็กซ์ที่ได้จากจากหลอดรังสีเอ็กซ์ที่มีคุณสมบัติว่า เมื่อลดความต่างศักย์ลง 23 กิโลโวลต์ ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้นสองเท่า