

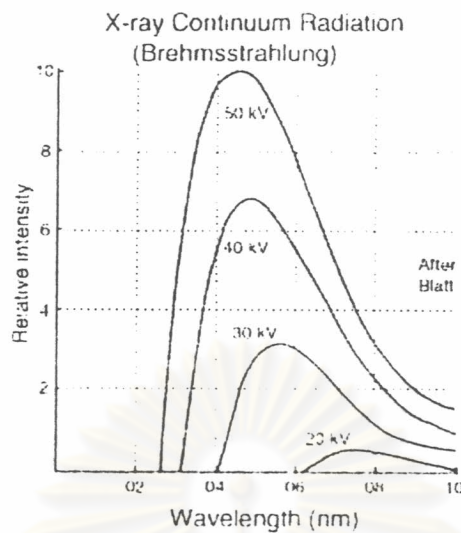
บทที่ 2

หลักการการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีเรืองรังสีเอกซ์

2.1 รังสีเอกซ์^[4]

รังสีเอกซ์เป็นรังสีชนิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic radiation) ที่มีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 10^{-5} ถึง 10^2 angstrom เกิดจากการที่อิเล็กตรอนหรืออนุภาคที่มีประจุซึ่งมีพลังงานสูงลดความเร็วโดยฉับพลันหรือเกิดจากการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนภายในวงโคจรชั้นในของอะตอม ซึ่งกระบวนการเกิดรังสีเอกซ์ทั้งสองแบบนี้จะให้ลักษณะของสเปกตรัมรังสีที่แตกต่างกัน

รังสีเอกซ์แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ รังสีเอกซ์ที่เกิดจากอิเล็กตรอนพลังงานสูง (Fast electrons) เคลื่อนที่ผ่านสนามคูลอมป์ของนิวเคลียส (Coulombic field) แล้วถูกหน่วง (Decelerate) อย่างฉับพลันทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานจากการลดความเร็วหรือที่เรียกว่า "เบรมสตราห์ลุง (Bremsstrahlung)" จะมีลักษณะสเปกตรัมเป็นแบบต่อเนื่อง (Continuous Spectrum) เนื่องจากการสูญเสียพลังงานเป็นไปแบบสุ่ม (Random) มีค่าได้ตั้งแต่ 0 จนถึงพลังงานจลน์ของอนุภาคนั้น ส่วนรังสีเอกซ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนชั้นวงโคจรของอิเล็กตรอนจะมีพลังงานเฉพาะสำหรับแต่ละธาตุหรือที่เรียกว่า "รังสีเอกซ์เรือง (Fluorescent X-ray)" หรือ "รังสีเอกซ์เฉพาะตัว (Characteristic X-ray)" ลักษณะของสเปกตรัมจะเป็นแบบอนุกรมพลังงานเดี่ยว (Characteristic line spectrum) ด้วยลักษณะเฉพาะของรังสีเอกซ์เรืองแต่ละธาตุที่ไม่เหมือนกันนี้เองเราจึงนำมาประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์หาธาตุต่างๆในสารประกอบ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดที่ว่าถึงแม้จะสามารถวิเคราะห์ได้ว่าเป็นธาตุอะไรแต่ก็ไม่สามารถระบุได้โดยตรงว่าเป็นไอโซโทป (Isotope) ใดของธาตุนั้นๆ เพราะการจัดเรียงชั้นพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นจะถูกกำหนดโดยจำนวนโปรตอน (Proton) ในนิวเคลียส (Z) เท่านั้นไม่ใช่จำนวนนิวตรอน (A) ดังนั้นการที่จะหาว่าเป็นไอโซโทปใดเราจะต้องทราบชนิดของการสลายตัว (Decay) ด้วยเพื่อให้ทราบว่ารังสีเอกซ์เรืองที่เกิดขึ้นมาจากกระบวนการใด



รูปที่ 2.1 แสดงสเปกตรัมแบบต่อเนื่องของรังสีเอกซ์ ณ ความต่างศักย์ที่แตกต่างกัน

ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์ (E) กับความยาวคลื่น (λ) เป็นไปตามสมการดังต่อไปนี้

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

เมื่อ h คือ Plank's constant = 6.626×10^{-34} Js

v คือ ความถี่ของรังสีเอกซ์

c คือ ความเร็วแสง = 3×10^8 m/s

λ คือ ความยาวคลื่น

ถ้ารังสีเอกซ์มีความยาวคลื่น 1 A (angstrom) = 10^{-10} เมตร จะมีพลังงานเท่ากับ

$$\begin{aligned} \frac{(6.626 \times 10^{-34} \text{ js})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{10^{-10} \text{ m}} &= 2 \times 10^{-15} \text{ J} \\ &= \frac{2 \times 10^{-15}}{1.6 \times 10^{-19}} \text{ eV} \\ &= 12.4 \text{ keV} \end{aligned}$$

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอกซ์ในหน่วยกิโลอิเล็กตรอนโวลต์ (Kiloelectronvolt, keV) กับความยาวคลื่นในหน่วย Angstrom (A) เป็น

$$\lambda(A) = \frac{12.4}{E(keV)} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

2.2 การดูดกลืนรังสีเอกซ์ ^[4]

การดูดกลืนรังสีเอกซ์จะเกิดขึ้นเมื่อรังสีเอกซ์ที่มีความเข้ม I_0 เคลื่อนที่ผ่านตัวกลาง (Medium material) โฟตอนบางส่วนจะเกิดอันตรกิริยา (Interaction) กับอะตอมของตัวกลาง สามารถแยกได้ตามลักษณะของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (Photoelectric effect), การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering) และการกระเจิงแบบเรย์เลห์ (Rayleigh scattering) ทำให้ปริมาณความเข้มของรังสีเอกซ์ที่ผ่านออกมา (I_x) มีค่าลดลงเป็นไปตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_x = I_0 e^{-\mu x} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

- เมื่อ I_x คือ ความเข้มของโฟตอนที่ผ่านออกมาโดยไม่ทำอันตรกิริยาใดๆ กับตัวกลาง
 I_0 คือ ความเข้มของโฟตอนก่อนเข้าชนตัวกลาง
 μ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (Absorption coefficient) รังสีเอกซ์
 x คือ ความหนาของตัวกลางในหน่วยเซนติเมตร

ค่าสัมประสิทธิ์การลดทอนเชิงเส้น μ เป็นค่าที่บอกถึงโอกาสในการเกิดอันตรกิริยาต่างๆ ของโฟตอนกับตัวกลาง ซึ่งประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลักๆ คือ

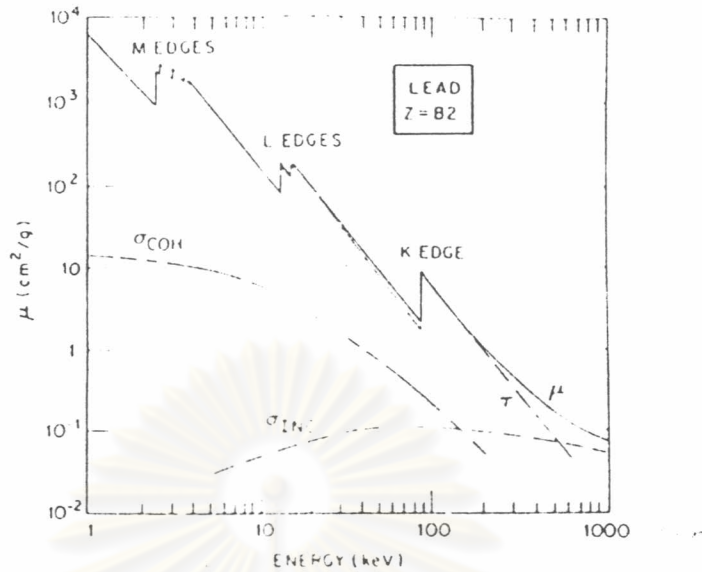
$$\mu = \mu_{pe} + \mu_{coh} + \mu_{inc} \quad \dots\dots\dots (2.4)$$

- เมื่อ μ_{pe} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก
 μ_{coh} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบไม่สูญเสียพลังงานเชิงเส้น
 μ_{inc} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การกระเจิงแบบสูญเสียพลังงานเชิงเส้น

ในช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์ อันตรกิริยาส่วนใหญ่เป็นแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนรังสีเอกซ์เนื่องจากอันตรกิริยาโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟกต์ (μ_{pe}) ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีเอกซ์ (E) และเลขอะตอมของตัวกลาง (Z) ตามความสัมพันธ์ดังนี้

$$\mu_{pe} \propto Z^n E^{-3} \quad \dots\dots\dots (2.5)$$

เมื่อ n คือ ค่าตัวเลขซึ่งแปรผันตามพลังงาน E ในช่วงพลังงานของรังสีเอกซ์ n มีค่าประมาณ 3-4



รูปที่ 2.2 ภาพแสดง Mass attenuation coefficient ของตะกั่วกับพลังงานโฟตอน

ถ้าพิจารณารูปความสัมพันธ์ระหว่างค่า μ กับพลังงานของรังสีเอกซ์ตามรูป จะเห็นว่า ในบางช่วงพลังงานอะตอมจะมีค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนสูงชันอย่างฉับพลัน ซึ่งค่าพลังงานเหล่านี้จะตรงกับค่าพลังงานยึดเหนี่ยว (Binding energy) หรือพลังงานไอออไนเซชัน (Ionization energy) ของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรพอดี เราเรียกตำแหน่งเหล่านี้ว่า “absorption edge” เช่น K-absorption edge (มักเขียนย่อ เป็น K_{ab}) L-absorption edge (มี 3 ค่า L_{Iab} , L_{IIab} และ L_{IIIab}) ค่า absorption edge ของธาตุจะมีค่าสูงชันตามเลขอะตอม

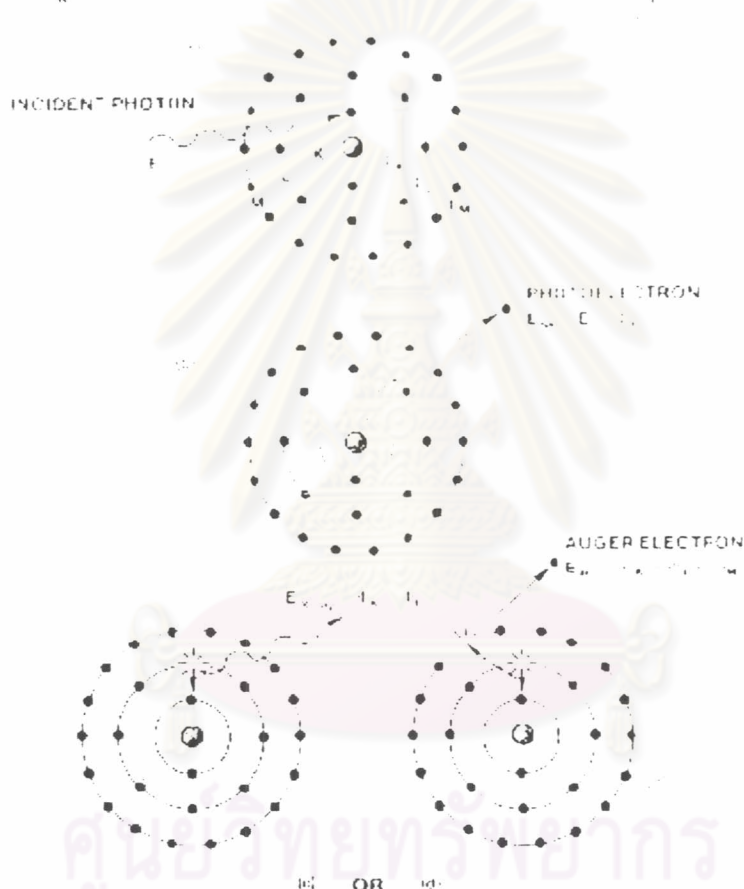
2.2.1 การดูดกลืนแบบโฟโตอิเล็กทริก

การดูดกลืนในลักษณะนี้ เกิดจากปรากฏการณ์ที่เรียกว่าปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) คือปรากฏการณ์ที่อิเล็กตรอนในวงโคจรของอะตอมดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนไว้ทั้งหมดและทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกไปจากอะตอม อะตอมจึงสูญเสียอิเล็กตรอนกลายเป็นไอออน (Ion) ส่วนอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากอะตอมเรียกว่า “โฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron)” เนื่องจากอิเล็กตรอนที่โคจรรอบนิวเคลียสอยู่ในชั้นพลังงานยึดเหนี่ยวต่างกัน หากอิเล็กตรอนชั้นในๆ (ชั้น K หรือชั้น L) ดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและหลุดออกจากอะตอมก็ จะทำให้เกิดที่ว่างขึ้น อิเล็กตรอนที่อยู่ใต้วงโคจรชั้นนอกๆลำดับถัดไป ซึ่งมีพลังงานสูงกว่าก็จะเข้าไปแทนที่ที่ว่างนั้นพร้อมปลดปล่อยพลังงานส่วนหนึ่งออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โฟโต

อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีค่าพลังงานเท่ากับผลต่างระหว่างพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนกับพลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนในชั้นวงโคจรนั้น ดังสมการ ต่อไปนี้

$$E_{pe} = E - \Phi_k \quad \dots\dots\dots (2.6)$$

- เมื่อ E_{pe} คือ พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน
 E คือ พลังงานของโฟตอนที่เข้าชน
 Φ_k คือ พลังงานยึดเหนี่ยวอิเล็กตรอนที่ชั้นวงโคจรนั้น ๆ



รูปที่ 2.3 การเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก

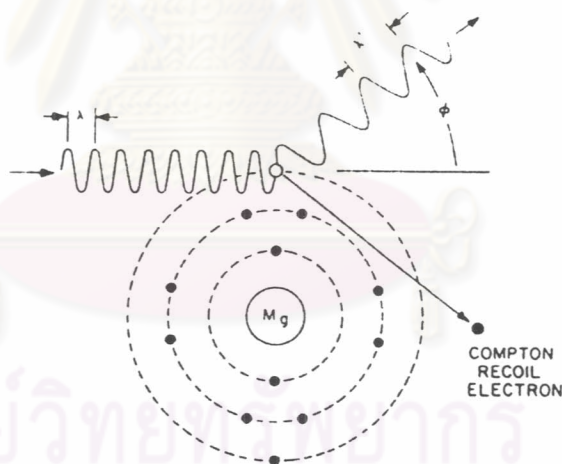
โอกาสในการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกนั้นจะมีค่าลดลงเมื่อตัวกลางเป็นธาตุเบา และพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนมีค่าสูงขึ้น

2.2.2 การกระเจิงแบบคอมป์ตัน (Compton scattering)

การกระเจิงแบบคอมป์ตัน เป็นอันตรกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างโฟตอนกับอิเล็กตรอนในวงโคจร เมื่อโฟตอนเข้าชนกับอิเล็กตรอนดังกล่าว อิเล็กตรอนนั้นจะหลุดออกไปจากอะตอมพร้อมกับพลังงานบางส่วนของโฟตอนที่เข้าชนซึ่งอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปมีชื่อเรียกว่าคอมป์ตันอิเล็กตรอน (Compton electron) ส่วนโฟตอนที่กระเจิงออกไปนั้นจะมีพลังงานลดลงโดยผลรวมของพลังงานระหว่างคอมป์ตันอิเล็กตรอนกับโฟตอนที่กระเจิงออกไปจะมีค่าเท่ากับพลังงานของโฟตอนเริ่มต้นที่เข้าชน พลังงานของโฟตอนที่เกิดการกระเจิงมีความสัมพันธ์กับพลังงานของโฟตอนที่เข้าชน ดังสมการต่อไปนี้

$$E' = \frac{E}{[1+0.001957E(1-\cos\theta)]} \quad \dots\dots\dots (2.7)$$

- เมื่อ E' คือ พลังงานในหน่วย keV ของโฟตอนที่กระเจิงออกไป
 E คือ พลังงานในหน่วย keV ของโฟตอนที่เข้าชน
 θ คือ มุมที่โฟตอนกระเจิงออกไปจากแนวเดิม



รูปที่ 2.4 การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตัน

เมื่อมุมของการกระเจิงเปลี่ยนไปจะทำให้ค่าพลังงานของโฟตอนที่กระเจิงออกมามีค่าเปลี่ยนแปลงไปด้วยตามสมการที่ 2.7

โอกาสในการเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้นจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อโฟตอนที่เข้าชนมีพลังงานสูงขึ้นจนถึงช่วงพลังงานประมาณ 100 keV ตัวกลางที่ถูกชนมีเลขอะตอมต่ำลง และมุมที่ตก

กระทบมีค่ามากขึ้น นอกจากนี้การเกิดการกระเจิงแบบคอมป์ตันนั้นจะเกิดขึ้นเป็นอันตรกิริยาหลักก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนที่เข้าชนมีค่าสูงกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน การกระเจิงแบบคอมป์ตันนี้เป็นปรากฏการณ์ที่ไม่พึงประสงค์ในการวิเคราะห์ธาตุด้วยรังสีเอกซ์เนื่องจากจะก่อให้เกิดสเปกตรัมรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำมากกว่าว่ารังสีเอกซ์ปฐมภูมิรบกวนในสเปกตรัม

2.2.3 การกระเจิงแบบเรย์เลย์ (Rayleigh scattering)

เป็นอันตรกิริยาที่โฟตอนพลังงานต่ำทำอันตรกิริยากับอะตอมที่มีค่าเลขอะตอมสูงๆแล้วกระเจิงกลับออกไปโดยที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุหรือกระตุ้นระดับพลังงานภายในอะตอม ให้สูงขึ้น แต่จะมีผลเพียงทำให้อะตอมเกิดการสั่นภายในอะตอมเท่านั้น โฟตอนที่กระเจิงออกไปจะไม่เปลี่ยนทั้งความถี่ (Frequency) และเฟส (Phase) รวมทั้งไม่สูญเสียพลังงานเพียงแต่เปลี่ยนทิศทางไปเท่านั้น

2.3 ระบบวิเคราะห์แบบเรอริงรังสีเอกซ์^[4]

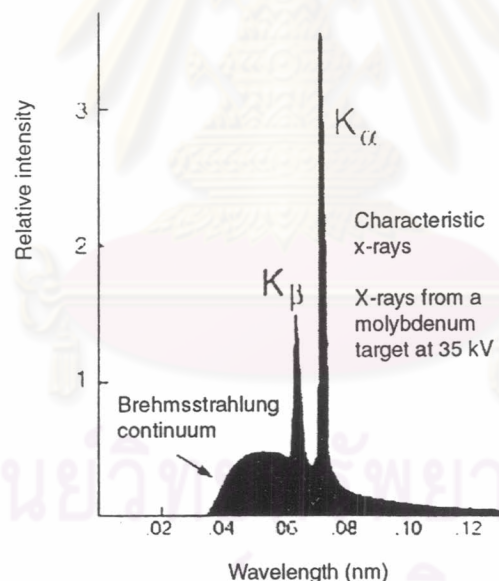
ระบบวิเคราะห์แบบเรอริงรังสีเอกซ์ แบ่งออกเป็นส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ (Primary X-ray source) ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ (Sample) และส่วนของระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ (X-ray Detection and analysing system)

2.3.1 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ

ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิที่นิยมใช้สำหรับระบบวิเคราะห์แบบเรอริงรังสีเอกซ์แบ่งออกได้เป็นสองแบบ ได้แก่ หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ (X-ray tube) และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไอโซโทปรังสี (X-ray isotopic source) การประยุกต์ใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิแต่ละแบบขึ้นอยู่กับความต้องการและความเหมาะสมในการใช้งาน ตัวอย่างเช่น ระบบวิเคราะห์แบบเรอริงรังสีเอกซ์ที่ต้องการให้สามารถปรับเปลี่ยนค่าพลังงานและความเข้มของรังสีเอกซ์ได้สำหรับการวิเคราะห์ก็จะใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์แบบหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ แต่ถ้าลักษณะของการวิเคราะห์ตัวอย่างที่ไม่ต้องการการเปลี่ยนแปลงพลังงานของรังสีเอกซ์และในขณะเดียวกันต้องการขนาดของเครื่องมือที่มีขนาดเล็กก็จะใช้ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไอโซโทปรังสีเป็นต้น

2.3.1.1 หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน มีลักษณะเป็นหลอดแก้วหรือเซรามิก ภายในเป็นสุญญากาศ (Vacuum) ประกอบด้วยขั้วอิเล็กโทรดสองชนิดได้แก่ คาโทดและแอโนด โดยที่คาโทด(ขั้วลบ)มีลักษณะคล้ายไส้หลอดไฟฟ้าทำด้วยโลหะที่มีค่าเวริกฟังก์ชันต่ำซึ่งได้แก่ โลหะทังสเตน (tungsten, W) โดยมีคุณสมบัติคือเมื่อให้ความร้อนแก่ไส้หลอดจะทำให้เกิดมี อิเล็กตรอนอิสระออกมาบริเวณไส้หลอด จากนั้นอิเล็กตรอนเหล่านี้จะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ไปหาขั้ว แอโนด (ขั้วบวก) หรือที่เรียกว่า “เป้า (target)” ทำจากโลหะที่ทนความร้อนสูง โดยอาศัยไฟฟ้า ศักดาสูงบวกที่ขั้วแอโนด อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากขั้วคาโทดที่วิ่งไปยังเป้าที่ขั้วแอโนดเมื่อผ่านเข้าไป ทำอันตรกิริยากับอะตอมของธาตุที่ทำเป็นขั้วแอโนดจะเกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่องหรือ Bremsstrahlung และถ้าอิเล็กตรอนยังมีพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่วงโคจรชั้นในของ ธาตุที่ทำเป็นขั้วแอโนดหลุดไปจะทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุนั้นขึ้น ในกรณีนี้สเปกตรัม ของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวที่เกิดขึ้นแสดงดังในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมรังสีเอกซ์ต่อเนื่องและรังสีเอกซ์เฉพาะตัวจากหลอดรังสีเอกซ์ ที่ใช้เป้าโมลิบดีนัม

พลังงานของอิเล็กตรอนที่วิ่งชนขั้วแอโนดบางส่วนจะสูญเสียไปในรูปของความร้อน จึงต้องมีระบบระบายความร้อนจากขั้วแอโนด ความเข้มของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง $I(\lambda)$ จะมีการกระจายความยาวคลื่นตามสูตรของ Kramer^[4] ดังนี้

$$I(\lambda)d\lambda = iKZ \left[\frac{\lambda}{\lambda_{\min}} - 1 \right] \frac{1}{\lambda^2} \cdot d\lambda \quad \dots\dots\dots (2.8)$$

- เมื่อ i คือ กระแสที่ให้แก่หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์
- K คือ ค่าคงที่
- Z คือ เลขอะตอมของเป้า (ขั้วบวก)
- λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง
- λ_{\min} คือ ความยาวคลื่นสั้นที่สุดของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง มีค่าเท่ากับ $\frac{hc}{E_{\max}}$

เมื่อ E_{\max} คือพลังงานสูงสุดของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องซึ่งจะมีค่าตัวเลขเท่ากับ
 ไฟฟ้าศักดาสูงที่จ่ายให้แก่ขั้วหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

จากสมการจะได้

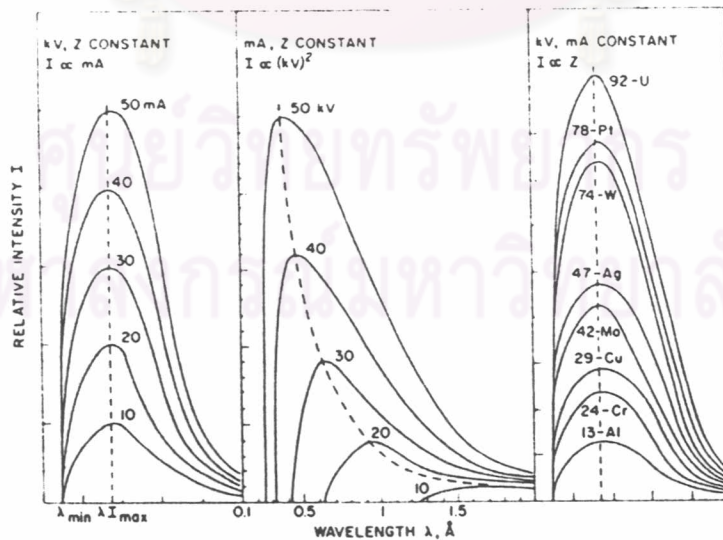
$$\frac{dI(\lambda)}{d\lambda} = \frac{KiZ}{\lambda^2} \left[\frac{2}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\min}} \right]$$

ที่ $I(\lambda)$ มีค่าสูงสุด $\frac{dI(\lambda)}{d\lambda}$ จะมีค่าเท่ากับ 0 ดังนั้น

$$\frac{2}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_{\min}} = 0$$

$$\lambda = 2\lambda_{\min}$$

นั่นคือ รังสีเอกซ์ต่อเนื่องจะมีความเข้มสูงที่สุดที่ความยาวคลื่นเป็นสองเท่าของ
 ความยาวคลื่นสั้นที่สุด หรือที่พลังงานเป็นครึ่งหนึ่งของพลังงานสูงสุด



รูปที่ 2.6 แสดงผลกระทบบของสเปกตรัมต่อเนื่องของหลอดรังสีเอกซ์เมื่อเปลี่ยนค่าของ
 กระแส, ไฟฟ้าศักดาสูงและเป้าที่มีเลขอะตอมต่างๆ^[7]

ความเข้มรวมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่องซึ่งขึ้นอยู่กับเลขอะตอม (Z) ของธาตุที่ใช้ทำขั้ว
อาโนด กระแส (I) และไฟฟ้าศักดาสูง (V) สามารถเขียนสมการแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

$$I_{\text{cont.spectrum}} \propto iZV^m \quad \dots\dots\dots (2.9)$$

เมื่อ $I_{\text{cont.spectrum}}$ คือ ความเข้มรวมของรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

m คือ ค่าคงที่มีค่าประมาณ 2

I คือ กระแสที่จ่ายให้แก่หลอด

Z คือ เลขอะตอมของธาตุที่ใช้ทำขั้วบวก

V คือ ไฟฟ้าศักดาสูงระหว่างขั้วบวกและลบ

ในการใช้หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์เป็นต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมินั้น ผู้ใช้สามารถที่จะ
ปรับความเข้มและพลังงานของรังสีเอกซ์ปฐมภูมิเพื่อไปกระตุ้นตัวอย่างได้โดยการปรับค่ากระแส
และไฟฟ้าศักดาสูงของหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ การปรับเพิ่มค่ากระแสเป็นการเพิ่มความเข้มของรังสี
เอกซ์เพียงอย่างเดียว แต่การปรับไฟฟ้าศักดาสูงเพิ่มขึ้นจะเป็นการเพิ่มทั้งพลังงานและความเข้ม
ของรังสีเอกซ์

เมื่อไฟฟ้าศักดาสูงที่ให้แก่หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์มีค่าสูงขึ้นจะทำให้อิเล็กตรอนมี
พลังงานจลน์สูงขึ้น ถ้าพลังงานของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่า Absorption edge ของธาตุที่ทำเป็น
เป้าก็สามารถที่จะทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุนั้นได้ สำหรับความเข้มของ K x-rays ของ
เป้าที่เกิดขึ้นสามารถหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$I_{\text{K line}} = Bi (V - V_k)^n \quad \dots\dots\dots (2.10)$$

เมื่อ $I_{\text{K line}}$ คือ ความเข้มของ K x-rays

V คือ ไฟฟ้าศักดาสูงที่ให้แก่หลอดกำเนิดรังสีเอกซ์

V_k คือ ไฟฟ้าศักดาสูงที่พอดีทำให้อิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K หลุดออกจากอะตอม

B คือ ค่าคงที่

n คือ ค่าคงที่มีค่าประมาณ 1.5 (ค่า n ขึ้นอยู่กับค่า V มีค่าอยู่ระหว่าง 1 ถึง 2)

2.3.1.2 ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ชนิดไอโซโทปรังสี

ต้นกำเนิดรังสีประเภทนี้สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด คือ ต้นกำเนิดรังสีที่ให้โฟตอนพลังงานต่ำ (Low energy photon source) ต้นกำเนิดรังสีประเภทอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (Electron capture source) และต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง (Continuous x-ray source หรือ Bremsstrahlung source)

ก. ต้นกำเนิดรังสีที่ให้โฟตอนพลังงานต่ำ

ต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้เป็นประเภทธาตุกัมมันตรังสีที่ให้รังสีเอกซ์และ/หรือรังสีแกมมา

ข. ต้นกำเนิดรังสีประเภทอิเล็กตรอน แคปเจอร์

ต้นกำเนิดรังสีประเภทนี้เป็นธาตุกัมมันตรังสีที่นิวเคลียสของอะตอมมีโปรตอนมากเกินไป (Proton excess) จึงมีการลดจำนวนโปรตอนลงโดยการจับเอาอิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้น K เข้าไป (เรียกว่า "K-capture) เพื่อไปรวมกับโปรตอนแล้วกลายเป็นนิวตรอน ภายหลังการเกิดอิเล็กตรอนแคปเจอร์ (electron capture, E.C) จะได้นิวไคลด์ใหม่ซึ่งเป็นไอโซบาร์ (isobar) กับนิวไคลด์เดิม คือมีเลขมวลเท่าเดิม แต่มีจำนวนโปรตอนลดลงไป 1 ตัว (เลขอะตอมลดลง 1) เมื่อมีอิเล็กตรอนในวงโคจรชั้น K ขาดหายไป อิเล็กตรอนจากวงโคจรชั้นนอก จะเข้าไปแทนที่ทำให้เกิดรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของนิวไคลด์ตัวใหม่ขึ้น เช่น



จากสมการข้างบนนี้จะได้รังสีเอกซ์เฉพาะตัวของแมงกานีส

ค. ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง

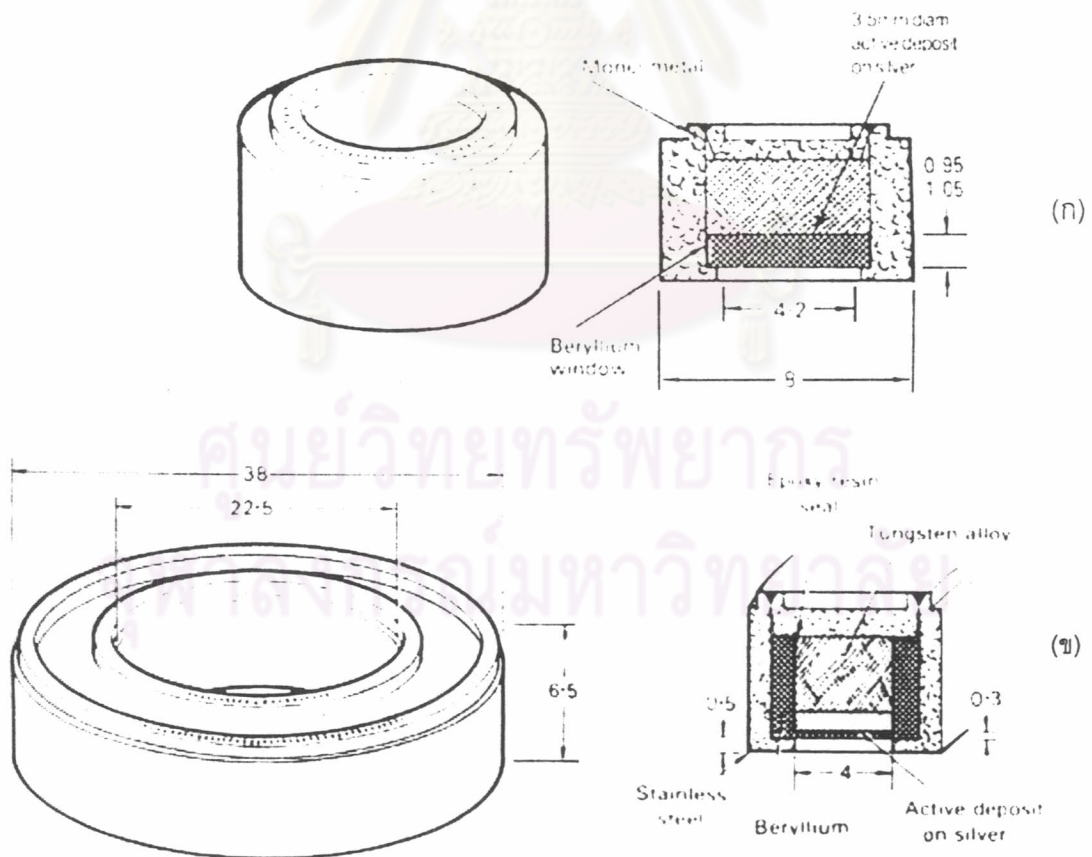
ต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ประเภทนี้เป็นต้นกำเนิดรังสีที่สร้างขึ้นด้วยการผสมระหว่างต้นกำเนิดรังสีเบตากับธาตุคงตัว (Stable) ชนิดหนึ่งซึ่งทำหน้าที่เป็นเป้าเพื่อให้เกิดรังสีเอกซ์ต่อเนื่อง ตัวอย่างเช่น ไรตรีเทียม (tritium, H) เป็นต้นกำเนิดรังสีเบตาผสมกับเซอร์โคเนียม (Zirconium, Zr) ซึ่งจะเขียนสัญลักษณ์ของต้นกำเนิดรังสีชนิดนี้เป็น H/Zr ต้นกำเนิดรังสีประเภทนี้เรียกอีกชื่อหนึ่งว่า "beta-excited x-ray source"

ความเข้มรังสีที่ได้จากต้นกำเนิดรังสีประเภทไอโซโทปรังสีนั้นขึ้นอยู่กับกัมมันตภาพ (Activity) หรือความเข้มรังสี ซึ่งโดยทั่วไปขึ้นอยู่กับความเข้มรังสีเป็นมิลลิคูรี (mCi) ความเข้มรังสีจะมีค่าลดลงตามค่าครึ่งชีวิต (Half-life) ส่วนพลังงานของรังสีที่ปลดปล่อยออกมาเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวของธาตุกัมมันตรังสีแต่ละชนิด การเปลี่ยนแปลงพลังงานของรังสีปฐมภูมิทำได้โดยการเปลี่ยนชนิดของธาตุกัมมันตรังสี

ลักษณะของต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทปรังสีที่นิยมใช้กันอยู่ในปัจจุบันมีการออกแบบรูปร่างอยู่ 2 ลักษณะ คือ

ก. Point or Disc source เป็นทรงกระบอกขนาดเล็กหรือแบบคล้ายเหรียญ มีรังสีแผ่ผ่านออกได้ด้านเดียว

ข. Annular or Ring source เป็นแบบวงแหวน มีสารกัมมันตรังสีฉาบอยู่ด้านหนึ่งของวงแหวน



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะต้นกำเนิดรังสีแบบไอโซโทป (ก) Point Source (ข) Annular Source

2.3.2 ตัวอย่าง (Specimen)

เมื่อตัวอย่างถูกกระตุ้นด้วยเอกซเรย์โฟตอน ความเข้มของรังสีเอกซ์เรือง (I_f) ที่เกิดขึ้นจะเป็นดังนี้^[3]

$$dI_f = \frac{kA_0\omega\tau C\rho}{\sin\alpha} \exp\left[\frac{-\mu_e\rho x}{\sin\alpha}\right] \exp\left[\frac{-\mu_f\rho x}{\sin\beta}\right] dx \quad \dots\dots\dots (2.11)$$

- เมื่อ
- k คือ ประสิทธิภาพรวมในการวัดรังสี
 - A_0 คือ ความเข้มรังสีของต้นกำเนิดรังสีเอกซ์ปฐมภูมิ
 - ω คือ อัตราการปลดปล่อยรังสีเอกซ์เรือง
 - τ คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวล (Mass absorption coefficient) เนื่องจากอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคท์ของธาตุที่สนใจ ต่อพลังงานของโฟตอนปฐมภูมิ
 - C คือ ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในตัวอย่าง
 - ρ คือ ความหนาแน่นของสารตัวอย่าง
 - μ_e คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อโฟตอนปฐมภูมิ
 - μ_f คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนเชิงมวลของสารตัวอย่างต่อรังสีเอกซ์เรือง
 - α คือ มุมระหว่างโฟตอนปฐมภูมิกับตัวอย่าง
 - β คือ มุมระหว่างรังสีเอกซ์เรืองกับตัวอย่าง
 - X คือ ความหนาของตัวอย่าง

ถ้าอินทิเกรต สมการที่ (2.11) สำหรับตัวอย่างที่มีความหนาเท่ากับ d จะได้

$$I_f = \frac{kA_0\omega\tau C}{\mu_e + \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\mu_f} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\mu_e}{\sin\alpha} + \frac{\mu_f}{\sin\beta}\right)\rho d\right) \right] \quad \dots\dots\dots (2.12)$$

ค่า $kA_0\omega\tau$ จะคงที่สำหรับต้นกำเนิดรังสีปฐมภูมิ ธาตุที่สนใจและระบบวัดรังสีชุดเดียวกัน ถ้าให้ $K = kA_0\omega\tau$ จะได้

$$I_f = \frac{kC}{\mu_e + \frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\mu_f} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\mu_e}{\sin\alpha} + \frac{\mu_f}{\sin\beta}\right)\rho d\right) \right] \quad \dots\dots\dots (2.13)$$

จากสมการ 2.13 จะเห็นได้ว่าการวัดความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่สนใจ นั้นขึ้นอยู่กับ C , μ_e , μ_r , ρ และ d (ส่วนมุม α กับ β นั้นก็จะคงที่สำหรับระบบวิเคราะห์ชุดเดียวกัน) ซึ่งสรุปได้ว่าความเข้มของรังสีเอกซ์เฉพาะตัวของธาตุที่สนใจขึ้นอยู่กับ

- ก. ความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ
- ข. ส่วนประกอบของตัวอย่าง
- ค. ความหนาแน่นของตัวอย่าง
- ง. ความหนาของตัวอย่าง

ในการวิเคราะห์ปริมาณแบบเปรียบเทียบโดยตรงของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐานที่ใช้จะต้องมีความหนาแน่นและส่วนประกอบใกล้เคียงกันมากที่สุด (เพื่อที่จะทำให้ค่า μ_e และ μ_r ใกล้เคียงกัน) ดังนั้นความเข้มของรังสีเอกซ์เรื่องจึงขึ้นอยู่กับค่า C และ d เท่านั้น

ในการวิเคราะห์แบบใช้ตัวอย่างหนา (Thick sample) ความหนาของตัวอย่างจะต้องมีความหนาเกินกว่าความหนาคritical (Critical thickness, d_c) ถ้าให้ d_c เป็นความหนาของตัวอย่างที่ทำให้ความเข้มของรังสีเอกซ์เรื่องมีค่าเท่ากับ 95% ของความเข้มสูงสุด (คือที่ความหนา = ∞) จะได้

$$d_c = \frac{1}{\rho} \frac{3}{\frac{\mu_e}{\sin \alpha} + \frac{\mu_r}{\sin \beta}} \quad \dots\dots\dots (2.14)$$

ในกรณีความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอกซ์เรื่องที่สนใจในตัวอย่าง ($I_{f,u}$) กับในสารมาตรฐาน ($I_{f,s}$) จะเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของธาตุที่สนใจ กล่าวคือ

$$\frac{I_{f,u}}{I_{f,s}} = \frac{C_{x,u}}{C_{x,s}} \quad \dots\dots\dots (2.15)$$

เมื่อ $C_{x,u}$ และ $C_{x,s}$ เป็นความเข้มข้นของธาตุที่สนใจในสารตัวอย่างและสารมาตรฐานตามลำดับ

2.3.3 ส่วนของระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์

ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีเรืองรังสีเอกซ์ แบ่งออกเป็นได้เป็น 2 แบบ คือ แบบ Non-dispersion และแบบ Dispersion ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไปนี้

2.3.3.1 Non-dispersion

ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์แบบนี้ประกอบด้วย

- ก. หัววัดรังสีเอกซ์ (x-ray detector)
- ข. ภาคขยายส่วนหน้า (preamplifier)
- ค. ภาคขยายหลัก (amplifier)
- ง. เครื่องวิเคราะห์สัญญาณ (analyzer)

หัววัดรังสีเอกซ์ทำหน้าที่วัดรังสีเอกซ์เรืองจากตัวอย่างโดยตรง ความสามารถในการแยกพลังงาน (Energy resolution) จึงขึ้นอยู่กับชนิดของหัววัดที่ใช้ สัญญาณจากหัววัดรังสีเอกซ์จะถูกแต่งรูป และขยายโดยภาคขยายส่วนหน้าและภาคขยายหลัก เพื่อส่งผ่านไปยังเครื่องวิเคราะห์ เครื่องวิเคราะห์จะทำหน้าที่แยกนับรังสีเอกซ์ในแต่ละช่วงพลังงาน จากสเปกตรัมของรังสีเอกซ์เรืองจะทำให้สามารถทราบถึงชนิดและปริมาณของธาตุในตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้

หัววัดรังสีเอกซ์ที่ใช้มี 3 ชนิด คือ หัววัดชนิดเรืองแสง (Scintillation detector) หัววัดชนิดบรรจุก๊าซ (Gas-filled detector) และหัววัดชนิดกึ่งตัวนำ (Semiconductor detector)

หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดเรืองแสง หัววัดชนิดนี้จะอาศัยอันตรกิริยาระหว่างรังสีเอกซ์กับอะตอมของตัวกลางทำให้เกิดการเรืองแสงของตัวกลางขึ้นโดยอันตรกิริยาจากปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกที่เกิดจากรังสีเอกซ์ชนกับอิเล็กตรอนของอะตอมของตัวกลางแล้วทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้น ซึ่งโฟโตอิเล็กตรอนนี้จะไปทำอันตรกิริยากับอะตอมของสารเรืองแสง (Phosphor Atom) และให้โฟตอนแสงออกมา ความเข้มของโฟตอนแสงที่ปล่อยออกมาจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้าทำอันตรกิริยาด้วย หัววัดที่ใช้งานได้แก่หัววัด NaI(Tl) ซึ่งโดยทั่วไปมีความสามารถในการแยกวัดพลังงานได้ไม่ดัดนัก คือจะมีค่า resolution ประมาณ 52 % ที่ 5.9 keV

หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดบรจูก๊าซ หัววัดชนิดนี้ใช้ก๊าซเป็นตัวกลางในการทำอันตรกิริยากับรังสีโดยอาศัยหลักการแตกตัวเป็นประจุ (Ionization) ของก๊าซ เมื่อโฟตอนเข้าชนกับอะตอมของก๊าซโฟตอนนั้นจะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในชั้นวงโคจรทำให้อิเล็กตรอนนั้นหลุดออกจากวงโคจรพร้อมกับพลังงานจลน์ที่ได้รับจากโฟตอนและเคลื่อนที่ชนกับอะตอมของก๊าซอื่นๆ ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นคู่ประจุ (Electron-hole Pair) ซึ่งจำนวนคู่ประจุที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสี คู่ประจุที่เกิดขึ้นจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทดและแอโนดของหัววัดรังสี เกิดเป็นสัญญาณทาง ไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปใช้วิเคราะห์หาพลังงานและความเข้มของรังสีได้ หัววัดที่นิยมใช้ได้แก่ gas proportional counter ที่บรจูก๊าซอาร์กอน (Argon, Ar) ซีโนน (Xenon, Xe) คริปตอน (Krypton, Kr) หรือมีเทน (methane, CH₄) หัววัดชนิดนี้มีความสามารถในการแยกวัดพลังงานปานกลาง คือ มีค่า resolution ประมาณ 16 % ที่ 5.9 keV

หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดกึ่งตัวนำ หัววัดชนิดนี้จะใช้คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำในการทำอันตรกิริยากับรังสีโดยอาศัยหลักการแตกตัวเป็นประจุภายในบริเวณดีพลีทชัน (Depletion region) หรือที่เรียกว่าบริเวณแอคทีฟโวลุ่ม (Active Volume) เมื่อโฟตอนผ่านเข้าสู่บริเวณแอคทีฟโวลุ่มของผลึกจะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกับอะตอมของสารกึ่งตัวนำ พลังงานของโฟตอนจะถ่ายเทให้กับโฟโตอิเล็กตรอนซึ่งจะไปไอออไนซ์อะตอมอื่นๆ ทำให้เกิดคู่ประจุ ขึ้นตลอดทางที่โฟโตอิเล็กตรอนวิ่งไปจนหมดพลังงาน คู่ประจุที่ถูกสร้างขึ้นมาจะถูกดึงไปที่ขั้วแคโทดและแอโนดจากสนามไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นจากการไบอัสที่หัววัด จำนวนประจุที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามาทำอันตรกิริยาภายในหัววัดความสามารถในการแยกวัดพลังงานของหัววัดชนิดนี้จะดีที่สุด คือ มีค่า resolution ประมาณ 2.7 % ที่ 5.9 keV หัววัดชนิดกึ่งตัวนำที่ใช้วัดรังสีเอกซ์ มี 3 ชนิด คือ Si(Li) และ HPGe (High purity germanium or Hyperpure germanium) ชนิดหลังนี้ใช้สำหรับวัดรังสีเอกซ์พลังงานสูง

เครื่องวิเคราะห์สัญญาณโดยทั่วไปเป็นเครื่องวิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel analyzer, MCA) บางกรณีอาจใช้เครื่องวิเคราะห์แบบช่องเดียว (Single channel analyzer; SCA)

วิธีวิเคราะห์ธาตุด้วยวิธีเรืองรังสีเอกซ์แบบ Non-dispersion เรียกอีกอย่างว่า "Energy Dispersive X-ray Fluorescence Analysis" หรือเรียกว่า "EDX" หรือ "EDXRF" หรือ "EDXRA"

2.3.3.2 Dispersion

ระบบวัดและวิเคราะห์รังสีเอกซ์ประกอบด้วย

- ก. ผลึกเดี่ยว (single crystal)
- ข. หัววัดรังสีเอกซ์
- ค. ภาคขยายส่วนหน้า
- ง. ภาคขยายหลัก
- จ. เครื่องนับสัญญาณ (counter)

ผลึกเดี่ยวเป็นผลึกชนิด Simple crystal เช่น ผลึก LiF (lithium fluoride) NaCl (sodium chloride) ทำหน้าที่สะท้อนแยกพลังงานของรังสีเอกซ์เรื่องที่ตกกระทบผลึก ตามหลักการของคลื่นสร้างเสริมและคลื่นหักล้าง (Constructive and destructive interference) คลื่นที่สะท้อนออกจากผลึกจะเสริมกันเมื่อค่าความยาวคลื่น (λ) รังสีเอกซ์มีความสัมพันธ์กับมุมตกกระทบหรือมุมสะท้อนตามกฎของ Bragg ดังนี้

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad \dots\dots\dots (2.16)$$

เมื่อ d คือ ระยะห่างระหว่างอะตอมของผลึก

θ คือ มุมตกกระทบของรังสีเอกซ์

n คือ ค่าตัวเลขจำนวนเต็มบวก 1,2,3,....

ความยาวคลื่นสูงสุดที่จะเป็นไปได้ตามสมการ คือ มีค่าเท่ากับ $2d$ นั่นก็หมายความว่าในการวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมต่ำจะต้องใช้ผลึก ซึ่งมีค่า d มาก และในการวิเคราะห์ธาตุที่มีเลขอะตอมสูงๆ จะต้องใช้ผลึกที่มีค่า d น้อย

จากความสัมพันธ์ของ λ และ θ ตามสมการ 2.16 จะเห็นได้ว่ารังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นเป็น 2,3,4,.... เท่าของ λ จะเกิดคลื่นเสริมที่มุม θ เดียวกันได้ เรียกว่า "Harmonic overlap" ตัวอย่างเช่น P K_{α} มี $\lambda = 6.16 \text{ \AA}$ และ Ca K_{β} มี $\lambda = 3.09 \text{ \AA}$ จะเกิดคลื่นเสริมที่มุมใกล้เคียงกันได้

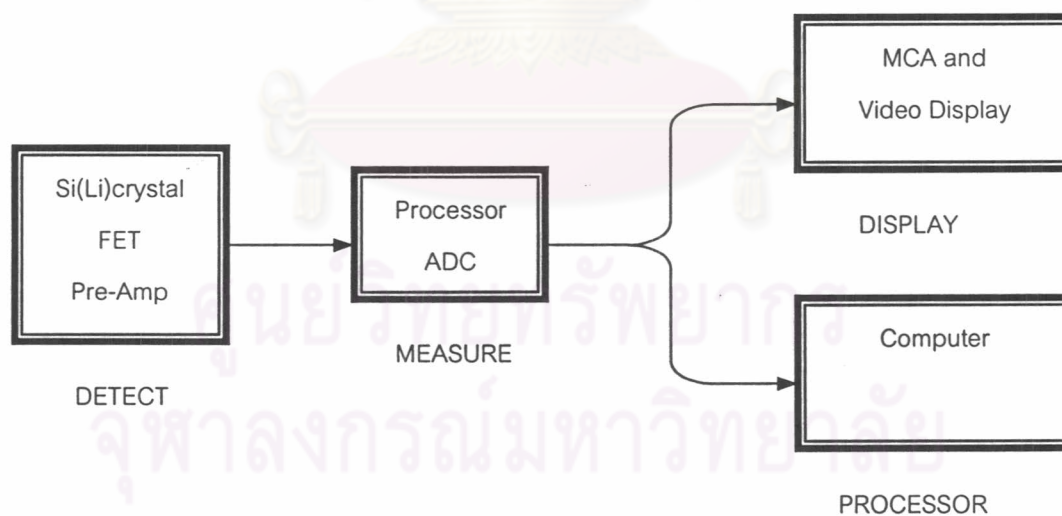
หัววัดรังสีมีหน้าที่เคลื่อนที่ไปรับรังสีเอกซ์ที่แยกความยาวคลื่นโดยผลึกแล้ว ผลึกจะหมุนเพื่อเปลี่ยนมุมที่รังสีเอกซ์เรื่องตกกระทบ โดยมีหัววัดหมุนตามไปรับรังสีตามมุมที่สอดคล้องกัน

คล้ายกัน ดังนั้นหัววัดรังสีที่ใช้จึงไม่มีความจำเป็นที่จะต้องมีความสามารถในการแยกพลังงานได้อย่างเช่นที่ใช้ในแบบ non-dispersion หัววัดรังสีที่ใช้ส่วนใหญ่จึงเป็นชนิด NaI(Tl) แบบบาง และ gas proportional counter เท่านั้น ดังนั้นจึงไม่มีความจำเป็นต้องใช้หัววัดรังสีที่มีความสามารถในการแยกพลังงานได้ดีมากอย่างหัววัดรังสีชนิดกึ่งตัวนำ

ในเมื่อผลึกเป็นตัวแยกพลังงานให้หัววัดรังสี ดังนั้นสัญญาณจากหัววัดรังสีที่ผ่านภาคขยายส่วนหน้าและภาคขยายหลัก แล้วจึงถูกส่งไปยังเครื่องนับได้โดยไม่ต้องใช้เครื่องวิเคราะห์สัญญาณแยกพลังงาน วิธีวิเคราะห์ด้วยวิธีเรอรังสีเอกซ์แบบ Dispersion นี้มักเรียกว่า "Wavelength Dispersion X-ray Fluorescence Analysis" เรียกว่า "WDX" หรือ WDXRF หรือ "WDXRA"

2.4 การทำงานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรอรังสีเอกซ์ชนิดแจกแจงพลังงาน^[14]

ในระบบการทำงานของเครื่องวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรอรังสีเอกซ์ชนิดแจกแจงพลังงาน (EDX System) สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนด้วยกัน อันประกอบไปด้วย หัววัดรังสีเอกซ์ ส่วนจัดการสัญญาณ ส่วนประมวลผลและส่วนแสดงผลข้อมูลด้วยคอมพิวเตอร์



รูปที่ 2.8 แสดงไดอะแกรมของ Energy Dispersive System

การทำงานของระบบ EDX สามารถสรุปได้ดังนี้

1. เมื่อรังสีเอกซ์วิ่งผ่านหน้าต่างของหัววัด (Beryllium Window) ไปสู่ผลึกวัดรังสีเอกซ์ (Lithium drifted silicon crystal) พลังงานของรังสีเอกซ์จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบของสัญญาณที่

เป็นประจุไฟฟ้า ซึ่งแต่ละพลังงานของรังสีเอกซ์สามารถสร้างประจุให้เกิดขึ้นบนหัววัดได้ประมาณ 10^{-16} คูลอมป์

2. สัญญาณจากประจุไฟฟ้า (Charge pulse) ถูกเปลี่ยนเป็นปริมาณสัญญาณไฟฟ้า (Voltage pulse) ที่บริเวณภาคขยายส่วนหน้า (PREAMP) ซึ่งอยู่ถัดจากหัววัด โดยประจุไฟฟ้าจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยฟิลด์เอฟเฟกต์ทรานซิสเตอร์ (Field Effect Transistor, FET) นอกจากนี้ FET ยังทำหน้าที่เป็นตัวขยายสัญญาณในขั้นแรกเพื่อจะส่งไปยังภาคขยายหลัก (Amplifier) ขยายสัญญาณให้มีความสูงของสัญญาณโตเพียงพอที่จะส่งไปที่พัลส์โพรเซสเซอร์ (Pulse Processor) ตามสายสัญญาณ (Cable) โดยไม่ถูกลดทอน
3. เมื่อสัญญาณถูกส่งผ่านจากหัววัดรังสีเอกซ์ไปที่พัลส์โพรเซสเซอร์แล้ว สัญญาณไฟฟ้าซึ่งเป็นสัญญาณอนาล็อกนี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณดิจิทัลเพื่อประมวลผลและแสดงออกมาทางจอภาพ ซึ่งขั้นตอนนี้จะถูกจัดการโดยตัวแปลงสัญญาณอนาล็อกเป็นดิจิทัล (Analogue to Digital Converter, ADC) แล้วสัญญาณดิจิทัลจะถูกส่งไปที่อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multi-Channel Analyser, MCA) เพื่อแสดงสเปกตรัมพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามาในหัววัดรังสีเอกซ์

2.4.1 หัววัดรังสีเอกซ์

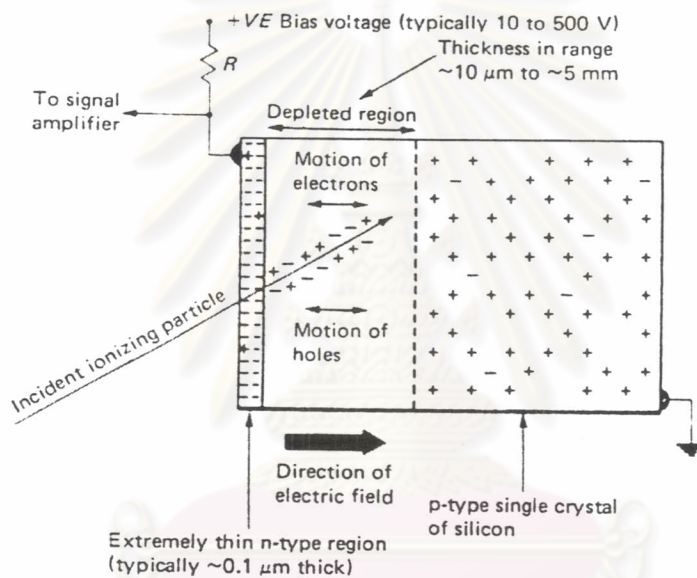
หัววัดรังสีเอกซ์ชนิดกึ่งตัวนำแบบ Si(Li) จะใช้หลักการของ "Photoelectric effect" โดยเมื่อรังสีเอกซ์ผ่านเข้าไปในผลึกจะทำให้ระดับพลังงานอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นจาก valence band ไปสู่ระดับ conduction band ส่งผลให้เกิดการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล จำนวนของคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกสร้างขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามาในหัววัด

หัววัดรังสีเอกซ์ประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ 3 อย่างคือ ผลึก, FET และพรีแอมป์ โดยมี Cryostat ที่ใช้ในการหล่อเย็นให้กับผลึกและ FET เพื่อลดสัญญาณรบกวนต่างๆ

2.4.1.1 ผลึกวิเคราะห์ (Crystal Analyser)

ผลึกของหัววัดรังสีเอกซ์เป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P type โดยมีกระบวนการผลิตจากการนำเอาผลึกซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูงมาผ่านกระบวนการ Drift ด้วยตัว impurity ที่มี valence electron เท่ากับ 3 เช่น Indium เพียงเล็กน้อยเพื่อให้เกิด "Holes" ส่วนเกินขึ้นภายในผลึกกลายเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด P type จากนั้นจะผ่านกระบวนการ Drift อีกครั้งด้วย Lithium (Li) ให้ลงไป

ดึกเพียงเล็กน้อยเพื่อสร้างเป็น n-p junction ภายในผลึก และโดยปกติแล้วจะมี Lithium ion (Li^+) บางส่วนเคลื่อนที่ไปมาระหว่างพื้นที่ว่างภายในแลตทิซอะตอมของผลึกทำให้เกิดเป็นกระแสรั่วไหล (leakage current) ขึ้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของไอออนเหล่านั้นเกิดได้ 2 วิธี วิธีแรกเกิดในสภาวะเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานจาก valence band ไปสู่ conduction band โดยการเหนี่ยวนำของ Thermal activity เพื่อเพิ่ม mobility ของ lithium ions และวิธีที่สองเกิดจากการใส่สนามไฟฟ้า (Electric field) เข้าไปภายในผลึกโดยการไบอัส n-p junction ในทิศทาง reverse โดยในสารกึ่งตัวนำชนิด P type จะมีค่ากระแสรั่วไหลน้อยกว่าที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำชนิด N type ซึ่งการลดจำนวนกระแสรั่วไหลจะเป็นส่วนสำคัญที่นำไปสู่ขั้นตอนในการสร้างหัววัดรังสีที่มี Resolution สูง เราจึงเลือกหัววัดรังสีโดยทำจากสารกึ่งตัวนำชนิด P type เป็นหลัก



รูปที่ 2.9 ผลึกของหัววัดแบบกึ่งตัวนำ

จากรูปจะเห็นว่าเมื่อรังสีเอกซ์วิ่งเข้าไปสู่ผลึกจะไปไอออไนซ์ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นมาจำนวนหนึ่ง ในการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลหนึ่งคู่หนึ่งจะต้องใช้พลังงานของรังสีเอกซ์ประมาณ 3.8 eV ดังนั้นจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เข้ามา การไบอัสไฟฟ้าศักดาประมาณ 500 V ตกคร่อมตัวผลึกจะทำให้เกิดการดึงอิเล็กตรอนที่เป็นประจุลบและโฮลที่เป็นประจุบวกให้แยกออกจากกัน เกิดเป็นประจุไฟฟ้าอิสระและป้องกันการรวมตัวกันอีกครั้งของอิเล็กตรอนกับโฮล

ความสูงของประจุไฟฟ้าที่ถูกสร้างขึ้นมาจากผลึกจะมีขนาดเล็กมาก ตัวอย่างเช่น โฟตอนรังสีเอกซ์พลังงาน 5.9 keV จะสร้างจำนวนอิเล็กตรอนขึ้นมาทั้งหมดรวม 1300 ตัว ซึ่งเทียบเท่ากับประจุจำนวน 2.45×10^{-16} คูลอมป์ ซึ่งหาได้จากสมการดังนี้

$$Q = E / 3.86 \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ คูลอมป์} \quad \dots\dots\dots (2.17)$$

สำหรับ Mn K_{α} พลังงาน 5.9 keV (Fe 55 radioactive source)

$$Q = 2.45 \times 10^{-16} \text{ คูลอมป์}$$

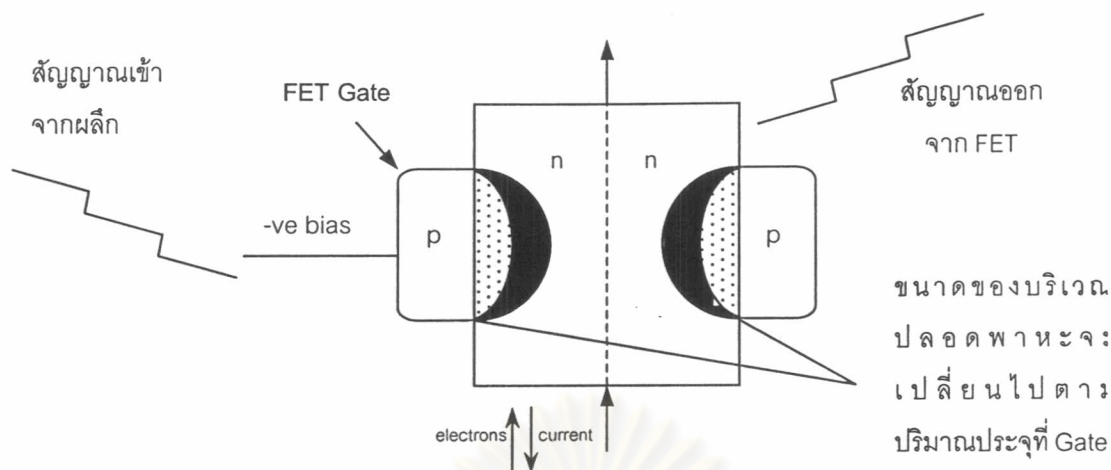
ปริมาณประจุที่ได้จากพลังงานของรังสีเอกซ์จะมีปริมาณน้อยมากและจำเป็นต้องเก็บประจุทั้งหมดที่เกิดขึ้นให้ได้มากที่สุดถ้าต้องการความแม่นยำในการวัดรังสีเอกซ์ สมมติว่าพื้นที่ของหัววัดรังสีมีมากเพียงพอที่จะทำให้ความเร็วเฉลี่ยการเคลื่อนที่ของพาหะอยู่ที่ 10^7 cm/s ดังนั้นเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บจะมีค่าเท่ากับ 10^7 cm/s \times 0.3 cm หรือเท่ากับ 30 nsec สำหรับหัววัดขนาด 3 mm ดังนั้นกระแสของสัญญาณมีค่าเท่ากับ

$$I = Q/t = 2.45 \times 10^{-16} / 30 \times 10^{-9} \text{ Amps} \\ = 8.2 \text{ nanoamps}$$

เพื่อให้การขยายสัญญาณและการวัดสัญญาณมีความเที่ยงตรงเราจำเป็นต้องเปลี่ยนสัญญาณประจุไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าโดยการใช้ FET เปลี่ยนแปลงสัญญาณ

2.4.1.2 ฟิลด์เอฟเฟกต์ทรานซิสเตอร์ (FET)

ลักษณะการทำงานของ FET จะทำหน้าที่ในการเปลี่ยนปริมาณประจุไฟฟ้าไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยจะทำงานเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านผลึกซิลิกอนมาที่ขั้ว GATE ของ FET ซึ่งมีการก่อดัชนีของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion layer) (ทำหน้าที่คล้ายเส้นยางรัดท่อ) ในการควบคุมปริมาณกระแสที่ไหลผ่าน FET จาก Source ไป Drain อยู่รอบๆ p-n junction ที่ขั้ว GATE ทำให้กระแสที่ไหลจาก Source ไป Drain เกิดการเปลี่ยนแปลงตามสัญญาณที่ขั้ว GATE ก่อให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าออกมา



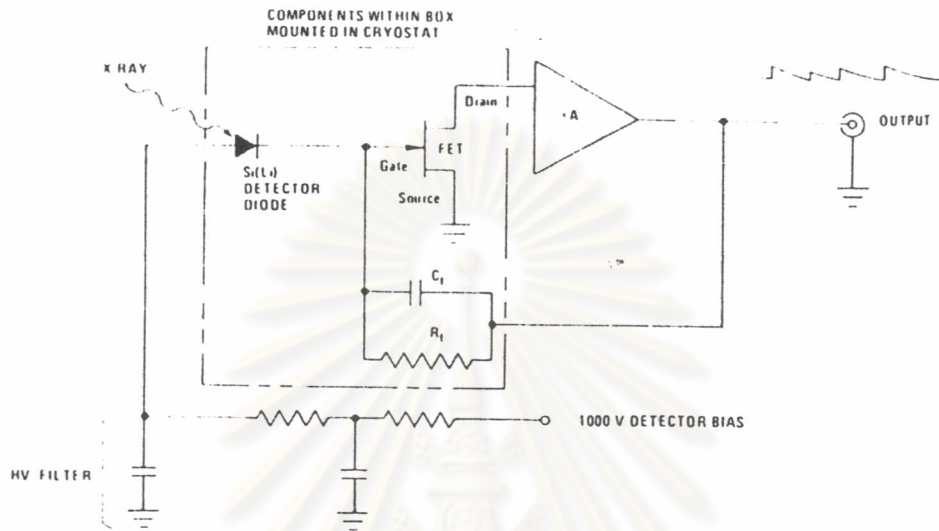
รูปที่ 2.10 แผนภาพการทำงานของ FET

การเกิดประจุไฟฟ้าขึ้นอย่างฉับพลันภายในผลึกซิลิกอน (ถูกปล่อยออกมาจากการเข้ามาของรังสีเอกซ์) จะทำให้เกิดการก่อดั้วของบริเวณหลอดพาหะที่ FET ซึ่งเป็นการควบคุมการไหลของอิเล็กตรอนภายใน FET ลักษณะสัญญาณทางด้านขาเข้าและขาออกไปจาก FET จะแสดงให้เห็นในรูป 2.10 ในกรณีที่มีประจุไฟฟ้าปริมาณมากถูกปล่อยออกมาจากผลึกอย่างฉับพลัน ยกตัวอย่างเช่น กลุ่มของอิเล็กตรอนพลังงานสูงวิ่งเข้ามาภายในหัววัดแล้วก่อให้เกิดการแตกตัวของประจุเป็นจำนวนมหาศาล เมื่อประจุเหล่านั้นวิ่งมาที่ขั้ว GATE ของ FET จะทำให้เกิดการก่อดั้วของบริเวณหลอดพาหะขึ้นมาทีละเล็กละน้อยจนมีขนาดใหญ่พอที่จะขัดขวางการไหลของอิเล็กตรอนได้อย่างสมบูรณ์ เป็นผลให้เกิด dead time เป็น 100 % และต้องเสียเวลาอีกหลายชั่วโมงที่จะทำให้บริเวณหลอดพาหะสลายตัวไป

2.4.1.3 วงจรขยายสัญญาณส่วนหน้า (Preamplifier) ^[10]

เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าของหัววัดมีค่าน้อยมาก ความเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยที่ไฟฟ้าศักดาที่จ่ายให้หัววัดจะทำให้สัญญาณประจุเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย ซึ่งค่าไฟฟ้าศักดาจะเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อยเมื่ออัตรานับรังสีมีค่าสูงดังนั้นการเลือกใช้พรีแอมป์แบบ Charge sensitive preamplifier จึงเป็นวิธีที่ดีที่สุดที่ทำให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่าง พลังงานรังสีเอกซ์ กับสัญญาณเอาต์พุตที่ดีที่สุด

โดยทั่วไปพรีแอมป์ที่ใช้กับหัววัด X-ray fluorescence spectrometer จะแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ (ก) Continuous feedback preamplifier และ (ข) Pulse feedback preamplifier ซึ่ง preamp ชนิด continuous feedback จะแยกออกได้เป็น Resistive feedback กับ Dynamic charge restoration feedback ซึ่งจะกล่าวถึงต่อไป



รูปที่ 2.11 พรีแอมป์ฟายเออร์ชนิด Resistive Feedback

พรีแอมป์แบบ resistive feedback ประกอบไปด้วย field-effect transistor (FET) ที่อินพุตส่วนหน้า ส่วนต่อมาก็คือส่วนของออปแอมป์ (A) แบบ open loop gain จะทำหน้าที่ขยายสัญญาณจาก FET ให้มีความสูงของสัญญาณเพียงพอ ส่วนสุดท้ายคือ R_f และ C_f ดังในรูป 2.11 ส่วนประกอบที่อยู่ภายในเส้นประจะประกอบรวมกันอยู่กับ Cryostat ภายในสุญญากาศและทำงานภายใต้อุณหภูมิใกล้จุดเดือดของไนโตรเจนเหลวเพื่อลดสัญญาณรบกวนที่เกิดจาก Thermal noise และลดการเคลื่อนที่ของ Lithium ที่จะก่อให้เกิดกระแสไฟรั่วไหล (Leakage current) ขึ้นภายในผลึก Si(Li) นอกจากนี้ในบริเวณ GATE ของ FET จะมีความต่างศักย์เข้าใกล้ศูนย์ทั้งนี้เนื่องมาจากการทำงานของส่วนประกอบ Feedback เป็นผลให้เกิด open loop gain ขนาดใหญ่ ดังนั้นประจุที่เกิดขึ้นจากหัววัดจะถูกผลักคืนเคลื่อนที่มาสะสมที่ C_f เพื่อก่อตัวเป็นสัญญาณไฟฟ้า (Voltage pulse) ที่เอาต์พุตโดยมีความสูงเท่ากับสมการดังนี้

$$V = \frac{Q}{C_f} = \frac{E q_e}{\epsilon C_f} \dots\dots\dots(2.18)$$

เมื่อ V คือ ความสูงของสัญญาณไฟฟ้า

Q คือ ประจุที่เกิดขึ้นภายในหัววัด

C_f คือ ตัวเก็บประจุ Feedback

ถ้าตัวเก็บประจุ C_f คายประจุที่สะสมเอาไว้ไม่ทันเอาต์พุตของสัญญาณไฟฟ้าก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆทุกครั้งที่โฟตอนถ่ายเทให้กับหัววัดจนกระทั่งไปถึงระดับเดียวกับความต่างศักย์ของเพาเวอร์ซัพพลายก็จะเป็นผลให้พรีแอมป์หยุดการทำงานไป การคายประจุที่สะสมไว้จะกระทำอย่างช้าๆ ผ่านตัว Resistive feedback กับทุกๆสัญญาณที่เข้ามา สมมติว่าเราไม่สนใจเรื่องของช่วงเวลาในการสะสมประจุของหัววัด เมื่อโฟตอนพลังงาน E เข้ามาชนหัววัดที่เวลา $t = 0$ เป็นผลให้ลักษณะสัญญาณไฟฟ้าที่ออกมาจากพรีแอมป์มีรูปร่างตามสมการดังนี้

$$V = \frac{Eq_e}{\epsilon C_f} \exp\left(-\frac{t}{R_f C_f}\right)$$

เมื่อ $t \geq 0$ และ $q_e = 1.6 \times 10^{-19}$ C ช่วงเวลาการคายประจุจะเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล (Exponential decay time, $R_f C_f$) ซึ่งมีช่วงอยู่ระหว่าง 1 ถึง 10 ms.

สำหรับพรีแอมป์ฟลายเออร์ทุกชนิดจะมีการจำกัดค่า Energy rate ไว้สูงสุดค่าหนึ่งเนื่องจากถ้าจำนวนโฟตอนที่เข้ามาทำอันตรกิริยากับหัววัดสูงเกินค่าดังกล่าวจะทำให้ระดับศักย์ไฟฟ้าที่พรีแอมป์เข้าสู่ภาวะอิ่มตัวซึ่งสัญญาณจะไม่สามารถผ่านไปได้อีก ซึ่งเป็นไปตามกระบวนการดังต่อไปนี้คือ เมื่อโฟตอนที่มียพลังงาน E มาถึงที่หัววัดจะมีอัตราเฉลี่ยของจำนวนโฟตอนที่เข้ามาที่หัววัดเท่ากับ I ต่อวินาทีซึ่งทำให้เกิดกระแสเฉลี่ยเท่ากับ

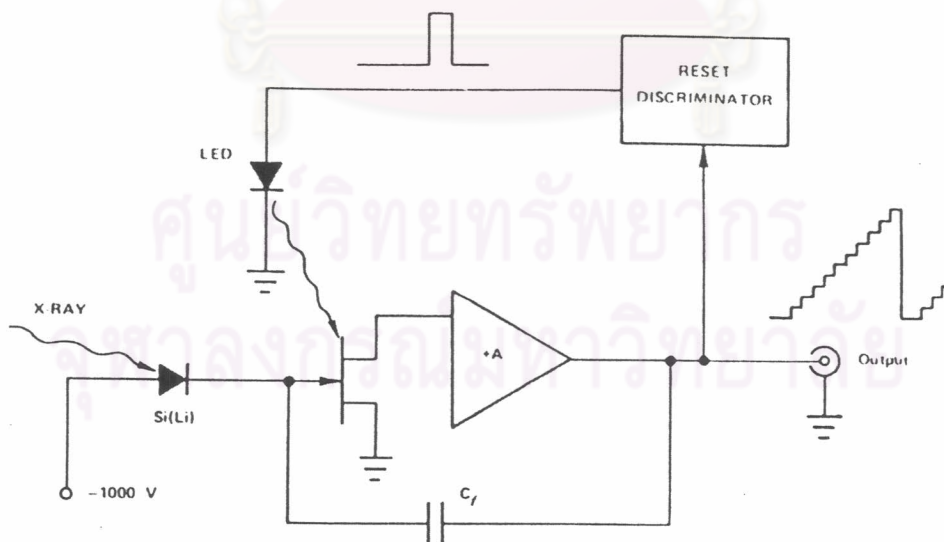
$$\bar{i} = \frac{E}{\epsilon} q_e I \quad \dots\dots(2.19)$$

กระแสเฉลี่ยนี้จะจ่ายให้แก่ R_f ซึ่งจะทำให้เกิดความต่างศักย์ออฟเซตขึ้นที่เอาต์พุตของพรีแอมป์ดังนี้

$$\bar{V} = (EI) \frac{q_e R_f}{\epsilon} \quad \dots\dots(2.20)$$

ถ้า Energy rate (EI) สูงเพียงพอจะทำให้ความต่างศักย์ออฟเซตเพิ่มขึ้นจนถึงระดับเดียวกับเพาเวอร์ซัพพลายซึ่งจะทำให้เกิดการอิ่มตัวของความต่างศักย์และไม่มีสัญญาณออกมาจากพรีแอมป์อีก ค่า energy rate สูงสุดสำหรับ resistive feedback จะมีค่าประมาณ 5×10^6 keV/s ค่าสูงสุดของ energy rate นี้จะมีความสำคัญมากสำหรับสเปกโตรมิเตอร์แบบพลังงานสูงและอัตรานับรังสีสูงๆ การปรับปรุง energy rate ของ resistive feedback ให้มีประสิทธิภาพ อาจทำได้โดยการลดขนาดของ feedback resistor ลงแต่ก็จะไปเพิ่มสัญญาณรบกวนในพรีแอมป์ให้เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อ shaping time ยาว

Dynamic charge restoration feedback มีโครงสร้างโดยส่วนใหญ่เหมือนกับ resistive feedback จะแตกต่างกันในแง่ของความซับซ้อนที่มากกว่า โดยการนำเอา active feedback มาต่อแบบ network แทนที่การต่อแบบ resistive feedback การจัดรูปแบบของ feedback แบบ network นั้นจะเป็นประโยชน์ในการช่วยลดสัญญาณรบกวนให้น้อยลงที่ค่า shaping time ยาวๆ แต่ยังคงรักษา Energy rate ที่ค่า shaping time สั้นๆ เหมือนกับในระบบแบบ resistive feedback ลักษณะสัญญาณเมื่อออกจาก dynamic charge restoration preamplifier จะมีรูปร่างคล้ายกับสัญญาณที่ออกมาจาก resistive feedback preamplifier ทุกประการ คุณลักษณะพิเศษอีกอย่างสำหรับพรีแอมป์แบบ continuous feedback ทั้งสองแบบคือ จะไม่มี deadtime หรือ deadtime เป็นศูนย์นั่นเอง



รูปที่ 2.12 พรีแอมป์ฟลายเออร์ชนิด Pulsed Optical feedback

จากรูปที่ 2.12 จะแสดงพรีแอมพลิฟายเออร์แบบ pulsed optical feedback ซึ่งมี การจัดรูปแบบเหมือนกับพรีแอมพลิฟายเออร์แบบ resistive feedback ยกเว้นในส่วนของตัวรีเซต FET จะเปลี่ยนเป็นใช้ LED ในการรีเซต ซึ่งจะเป็นการลดสัญญาณรบกวนในระบบที่ shaping time มีค่ายาวให้น้อยลง

การทำงานของพรีแอมป์ชนิดนี้จะเกิดขึ้นเมื่อประจุที่เกิดจากโฟตอนของรังสีเอกซ์ มาสะสมที่ feedback capacitor เพื่อสร้างเป็นสัญญาณรูปซันบันไดที่เอาต์พุตของพรีแอมป์ ซึ่ง ความสูง (amplitude) ของแต่ละซันบันไดจะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของโฟตอนที่ถ่ายเทให้กับ ผลึก เมื่อความสูงของสัญญาณเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดของค่าที่กำหนดไว้สำหรับเอาต์พุต สัญญาณ ตัว Discriminator จะถูกทริกให้ทำงานเพื่อส่งสัญญาณไปที่ LED ซึ่งคัปปลิง (Coupling) อยู่กับ FET ใน Cryostat ให้รีเซตตัว FET โดยแสงจาก LED จะส่องสว่างที่ขั้วต่อ ระหว่าง Gate กับ Drain เพื่อไปคายประจุที่ตัวเก็บประจุ C_f เมื่อเอาต์พุตของพรีแอมป์กลับสู่ค่า ความต่างศักย์เริ่มต้นของซันบันไดแล้ว LED ก็หยุดทำงาน จากนั้นพรีแอมป์ก็จะเริ่มจัดการกับ สัญญาณใหม่ที่เข้ามา

แม้ว่าการรีเซตตัวพรีแอมป์จะเสร็จสิ้นภายในช่วงเวลา 10 ถึง 100 μ s ซึ่งเป็นช่วง เวลาสั้นๆ แต่ตัว spectrometer เองก็ต้องเสียเวลาช่วงนี้ไปหลังการรีเซตซึ่งจะเรียกว่าช่วงเวลา deadtime โดยระยะทางในการรีเซตนั้นปกติจะเท่ากับ ความสูงของสัญญาณจากโฟตอนพลังงาน ประมาณ 3000 keV แต่มีทิศตรงกันข้ามการเกิดสัญญาณแบบซันบันได ในขณะที่แอมพลิฟาย เออร์ทำการรีเซตนั้นจะเกิดโอเวอร์โวลด์ขึ้นเล็กน้อย ซึ่งการคืนกลับไปอยู่ระดับสภาวะปกติสำหรับ เตรียมพร้อมจัดการสัญญาณลูกต่อไปจะต้องเสียเวลาอย่างน้อย 0.5 ถึง 2 ms เพื่อให้รูปร่างของ สัญญาณเป็นปกติซึ่งจะมีผลมากเมื่อต้องผ่านไปสู่ขั้นตอนของการวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ (Pulse Height Analysis) ช่วงเวลาของการฟื้นสภาพกลับไปสู่สภาวะปกติจะเป็นการเพิ่มช่วงเวลา deadtime ของระบบ เปอร์เซ็นต์ dead time ที่เกิดขึ้นจากการรีเซตสามารถคำนวณได้โดย สมมติ ให้โฟตอนพลังงาน (E) วิ่งผ่านเข้ามาภายในหัววัดด้วยอัตรา (I) counts/s ดังสมการ

$$\text{Percent reset deadtime} = \frac{EIT_r}{E_r} \times 100\% \quad \dots\dots(2.21)$$

เมื่อ E_r คือ ค่าพลังงานที่ตั้งไว้ที่ทำให้เกิดการรีเซต

I_r คือ ช่วงเวลาการรีเซตและฟื้นคืนสภาพ

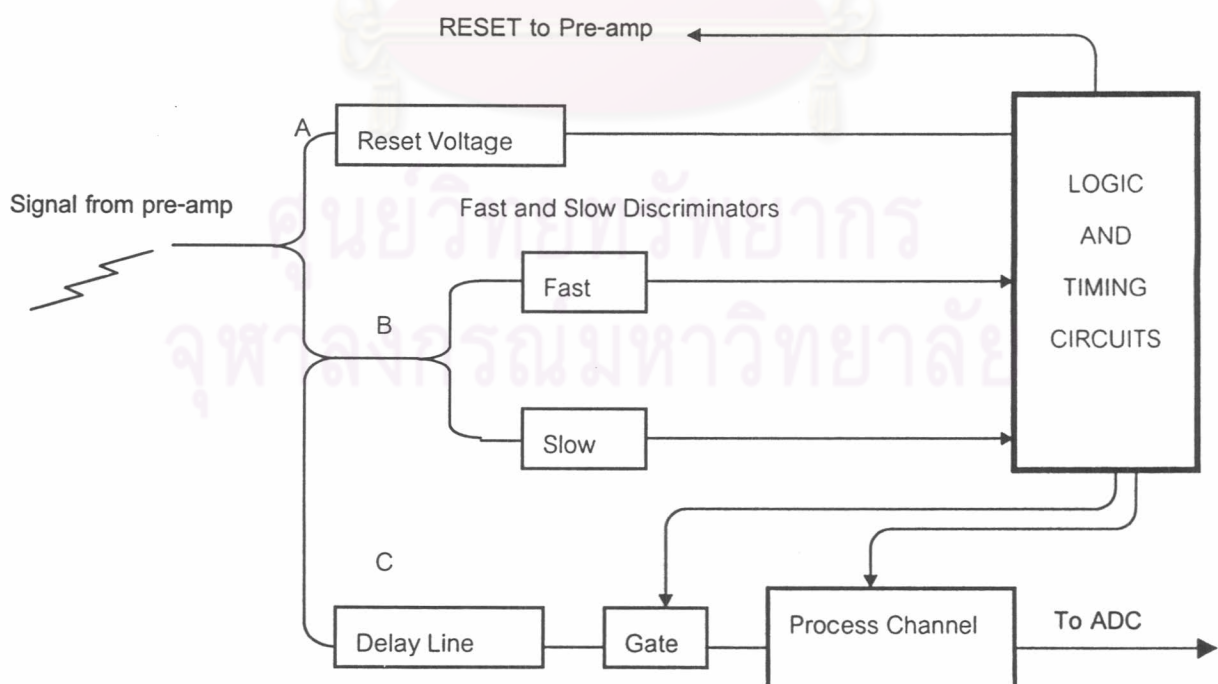
เมื่อ $E=30$ keV, $I = 10^4$ counts/s, $E_r = 3000$ keV และ $T_r = 10^{-3}$ s จะได้ percent reset deadtime เท่ากับ 10% สำหรับใน Pulse optical feedback preamplifier ค่า resetting deadtime จะเป็นตัวกำหนดค่า energy rate สำหรับระบบวัด

2.4.2 พัลส์โพรเซสเซอร์^[14]

สัญญาณที่เกิดขึ้นจากหัววัดจะถูกส่งผ่านตามสายเคเบิลมาที่พัลส์โพรเซสเซอร์เพื่อเริ่มต้นการขยายและวัดขนาดสัญญาณ โดยพัลส์โพรเซสเซอร์จะทำหน้าที่ดังต่อไปนี้

- กำเนิดสัญญาณรีเซ็ตไปที่ส่วนวงจร Pulsed Optical Feedback ภายในพรีแอมป์
- เพื่อรับประกันว่าจะมีพัลส์สัญญาณเพียงลูกเดียวที่ได้รับการขยายสัญญาณอยู่ในขณะนั้น (กระบวนการ Pile-up Rejection)
- ทำการขยายสัญญาณ แต่งรูปสัญญาณ และ อินทิเกรตพัลส์สัญญาณ เพื่อเตรียมพร้อมสำหรับการวัดโดย ADC

จากไดอะแกรมในรูปที่ 2.13 แสดงการทำงานของโพรเซสเซอร์ โดยเริ่มต้นเมื่อสัญญาณพัลส์เข้ามาที่โพรเซสเซอร์จะถูกแบ่งออกเป็นสามส่วนเพื่อที่จะทำงานทั้งสามกระบวนการดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้นไปพร้อมๆกันซึ่งแทนด้วยตัวอักษร A, B และ C ตามลำดับ



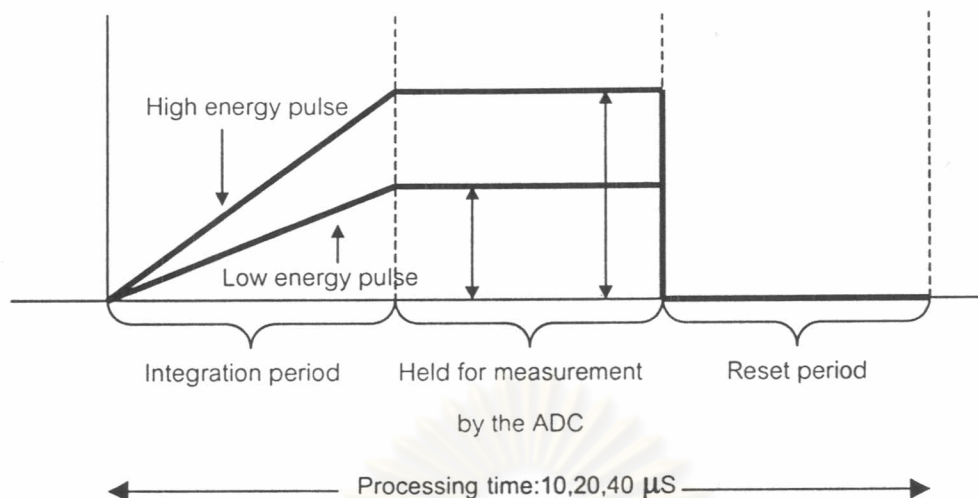
รูปที่ 2.13 ไดอะแกรมการทำงานของ Pulse Processor

ณ ตำแหน่ง "A" วงจรควบคุมการรีเซตจะส่งสัญญาณไปรีเซตที่ pulsed optical feedback โดยจะตรวจสอบดูว่าความต่างศักย์จาก FET ได้เพิ่มมาถึงระดับที่ตั้งไว้แล้วหรือยัง ถ้ามาถึงแล้วจะทำการส่งสัญญาณกลับไปพีริออดมัลติพลายเออร์เพื่อเปิดสวิตช์ให้ LED ทำงาน เป็นผลให้ประจุเกิดการถ่ายเทออกไปจนหมด

ณ ตำแหน่ง "B" จะแทนช่วงที่สัญญาณพัลส์เข้ามาที่ส่วน Fast และ Slow Discriminators ทุกๆสัญญาณพัลส์ที่เข้ามาจะต้องผ่านไปที่วงจรทั้งสองนี้เสมอ โดยที่ Fast channel สามารถปรับค่าได้เพื่อทำหน้าที่ในการแยกแยะระหว่างสัญญาณสองสัญญาณที่มาถึงใกล้ชิดกันเกินกว่า $1 \mu\text{s}$ ออกจากกัน ซึ่งรูปแบบการทำงานแบบนี้เป็นพื้นฐานของวงจร pile-up rejection ส่วน Slow channel จะถูกปรับแต่งเพื่อใช้ในการแยกสัญญาณระหว่างสัญญาณรบกวนกับสัญญาณที่เข้ามาจริงๆ

ณ ตำแหน่ง "C" คือส่วนของ Processor channel สัญญาณพัลส์จะถูกโฮลด์ค่าไว้ที่ดีเลย์ไลน์และรอจนกระทั่งได้รับ "คำสั่ง" จาก Fast และ Slow Discriminators จึงปล่อยสัญญาณออก สัญญาณที่ผ่านเข้ามาในส่วนของ Process Channel นั้นจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนอื่นๆก็ต่อเมื่อสัญญาณที่เข้ามาเป็นสัญญาณเดียว หรือไม่เช่นนั้นก็จะถูกคัดทิ้งไปในกรณีที่สัญญาณนั้นเป็นสัญญาณรบกวนหรือสัญญาณที่เข้ามา มีมากกว่าหนึ่งสัญญาณขึ้นไป เมื่อ Process channel รับสัญญาณเข้ามาแล้วสัญญาณที่เข้ามาหลังจากนี้จะถูกคัดทิ้งไป จนกว่าสัญญาณขณะนี้ จะได้รับการแต่งรูปสัญญาณและทำการวัดเสียก่อน โดยที่ process channel จะทำการอินทิเกรตสัญญาณด้วยคาบเวลาคงที่ซึ่งกำหนดโดยการตั้งค่าที่หน้าปัทม์ด้านหน้าโมดูลโปรเซสเซอร์ (คือค่า 10, 20 และ 40 μs)

เมื่อสัญญาณได้รับการอินทิเกรตค่าขึ้นไป จะถูกโฮลด์ค่าไว้ที่ระดับคงที่ค่าหนึ่งเพื่อให้ ADC แปลงสัญญาณไปเป็นสัญญาณดิจิตอล หลังจากแปลงค่าเสร็จ Channel ก็จะถูกรีเซตค่าเพื่อรับสัญญาณใหม่ต่อไป โครงสร้างการทำงานของ process channel แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 โครงสร้างการทำงานของ process channel

2.4.3 วงจรแปลงผันสัญญาณ (Analog to Digital Converter, ADC) ^[10]

วงจรแปลงผันสัญญาณพัลส์อะนาล็อกให้เป็นสัญญาณเชิงตัวเลข Analog-to-Digital (ADC) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญทำหน้าที่ในการวัดขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์อะนาล็อกแล้วเปลี่ยนค่าดังกล่าวไปเป็นสัญญาณเชิงตัวเลขในระบบดิจิทัล หลังจากนั้นจะถูกส่งไปยังหน่วยความจำหรือคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บสะสมข้อมูลการกระจายความสูงของพัลส์ในรูปฮิสโตแกรม (Histogram) หรือสเปกตรัมของพลังงาน

ปัจจุบัน ADC ที่นิยมใช้สำหรับเครื่องมือวัดรังสีมีอยู่สองชนิด ประกอบไปด้วย

- ก. แบบ Wilkinson type
- ข. แบบ Fixed conversion time ได้แก่ Flash ADC และ Successive-approximation

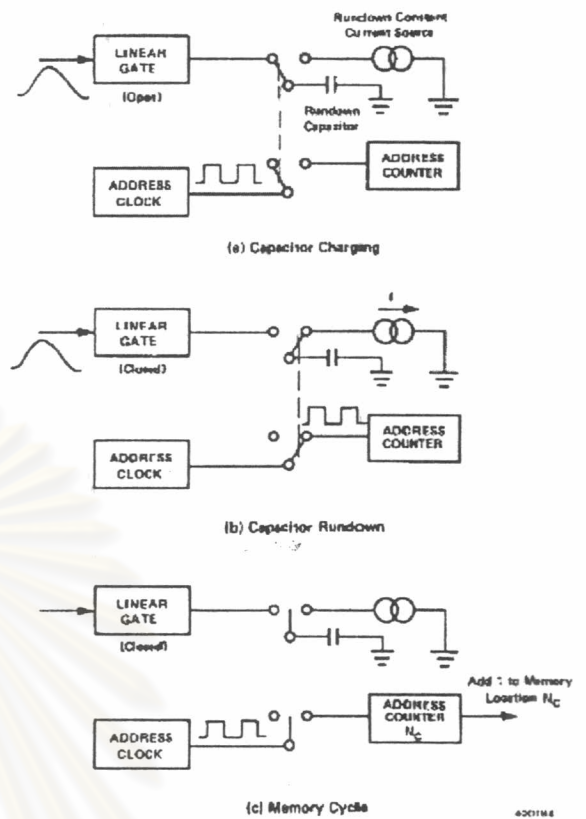
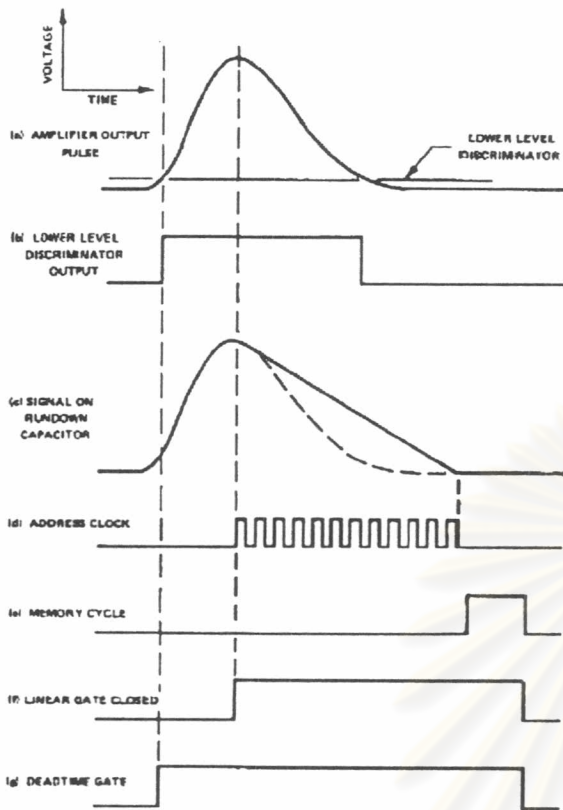
โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.4.3.1 ตัวแปลงผันสัญญาณแบบวิลคินสัน (Wilkinson ADC)

ตัวแปลงผันสัญญาณแบบวิลคินสันเป็นวงจรแปลงความสูงของสัญญาณพัลส์ โดยใช้หลักการเก็บประจุบนตัวเก็บประจุที่มีความต่างศักย์เท่ากับความสูงของพีคสัญญาณ แล้วจึงคายประจุออกมาในอัตราคงที่ด้วยวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ เพื่อสร้างช่วงเวลาในการเปิด/ปิด เกตของวงจรมับสัญญาณนาฬิกา (Clock) ความถี่สูง ช่วงเวลานี้จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความ

สูงของสัญญาณพัลส์ที่เข้ามา จำนวนสัญญาณนาฬิกาที่ได้จากวงจรคายประจุจะเป็นตัวกำหนดแอดเดรสในหน่วยความจำเพื่อจะนับค่าเพิ่มในตำแหน่งนั้น ดังแสดงในภาพที่ 2.15 และ 2.16 ขั้นตอนการทำงานของวงจรแปลงผันสัญญาณแบบวิลคินสันจะเริ่มจากวงจรเปรียบเทียบกับศักย์ไฟฟ้าอ้างอิงระดับล่างเรียกว่า "Lower-level discriminator :(LLD)" จะทำการตรวจสอบว่ามีสัญญาณพัลส์เข้ามาที่ตัว ADC หรือไม่ ปกติแล้วค่าเทรซโฮลด์ของ LLD จะถูกตั้งไว้เหนือระดับสัญญาณรบกวนเพื่อไม่ให้ ADC เสียเวลาในการวิเคราะห์สัญญาณรบกวน เมื่อสัญญาณอินพุตที่เข้ามาเพิ่มขึ้นเหนือระดับ LLD เทรซโฮลด์จะทำให้ Linear gate เปิดออกและตัวเก็บประจุ (rundown capacitor) จะต่อเข้ากับอินพุต ดังรูป 2.16a หลังจากนั้นตัวเก็บประจุจะเริ่มต้นการประจุไฟและเพิ่มค่าขึ้นตามความสูงของสัญญาณที่เข้ามา ดังรูปที่ 2.15c เมื่อสัญญาณอินพุตเพิ่มขึ้นจนถึงระดับสูงสุดและเริ่มจะตกลง Linear gate จะถูกปิดและตัวเก็บประจุจะถูกตัดออกจากอินพุต ดังรูปที่ 2.16b ณ จุดนี้ค่าศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุจะเท่ากับแอมพลิจูดสูงสุดของสัญญาณอินพุต หลังจากนั้นแหล่งจ่ายกระแสไฟคงที่ (constant current source) จะต่อกับตัวเก็บประจุเพื่อเริ่มการคายประจุด้วยอัตราคงที่แบบเชิงเส้น (Linear discharge or rundown) ดังในรูปที่ 2.15c และ 2.16b ขณะเดียวกันสัญญาณนาฬิกาแอดเดรส (address clock) จะต่อเข้ากับแอดเดรสเคาน์เตอร์ (address counter) ในรูปที่ 2.15d และ 2.16b และ สัญญาณนาฬิกาความถี่สูง (clock pulses) จะถูกนับในช่วงที่มีการคายประจุ เมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุลดลงจนถึงระดับฐานของสัญญาณ วงจรตรวจระดับสัญญาณศูนย์ (zero crossing detector) จะสร้างสัญญาณเปิดเกตทำให้สัญญาณนาฬิกาหยุดนับ ดังนั้นจำนวนสัญญาณที่นับได้ในแอดเดรสเคาน์เตอร์ (N_c) ในช่วงเวลาการคายประจุแบบเชิงเส้นก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับแอมพลิจูดของสัญญาณที่เข้ามา ระหว่างการ memory cycle (รูปที่ 2.15e และ 2.16c) จำนวนคล็อก N_c ของแต่ละสัญญาณพัลส์จะทำหน้าที่กำหนดแอดเดรสในหน่วยความจำเพื่อนับค่าเพิ่ม ณ ตำแหน่งนั้น

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.15 สัญญาณใน Wilkinson ระหว่างการทำ Pulse Measurement Process

รูปที่ 2.16 หลักการทำงานของ Wilkinson

ADC ระหว่างการทำงาน 3 ขั้นตอนของ Pulse Amplitude Measurement (a) การชาร์จไฟลงในตัวเก็บประจุ (b) การคายประจุเชิงเส้นและ (c) การทำ memory cycle

สำหรับเวลาที่สูญเสียไปขณะทำการแปลงสัญญาณหรือที่เรียกว่าเดดไทม์ (Dead time) นั้นจะคำนวณได้จาก สมการ

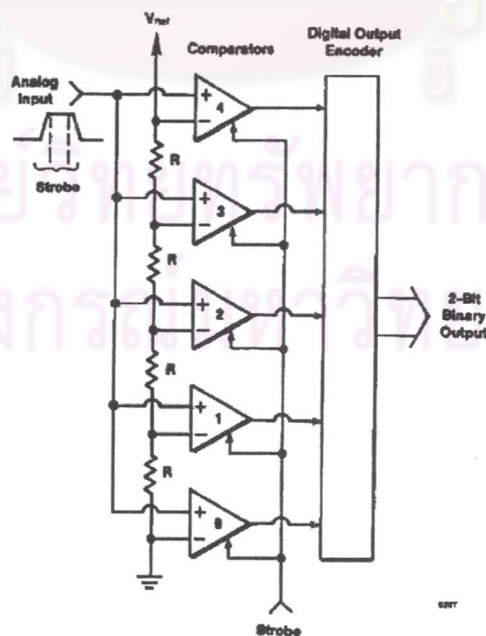
$$T_M = (N_C / f_c) + T_{MC} \quad \dots\dots\dots (2.22)$$

ใน MCA นั้นค่าเดดไทม์จะขึ้นอยู่กับความถี่ของสัญญาณคล็อก f_c จำนวนแชนแนล N_C และ เวลาที่ใช้ใน memory cycle (T_{MC}) ความถี่สัญญาณนาฬิกาจะมีช่วงตั้งแต่ 50 ถึง

400 MHz และเวลาที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลลงในหน่วยความจำจะอยู่ระหว่าง 0.5 ถึง 2 μs ดังนั้นเวลาในการแปลงผันสัญญาณ Wilkinson ที่มี 8192 แชนแนลจะอยู่ที่ประมาณ 20 ถึง 165 μs สำหรับข้อดีจากการใช้ ADC Wilkinson คือ Differential nonlinearity จะมีค่าต่ำ แต่จะมีข้อเสียคือจะใช้เวลานานในการแปลงผันสัญญาณแต่ละตัวขึ้นอยู่กับแอมพลิจูดของสัญญาณพัลส์ที่เข้ามา

2.4.3.2 ตัวแปลงผันสัญญาณแบบแฟลช (Flash ADC)

วงจรแปลงผันสัญญาณแบบแฟลชคอนเวอร์เตอร์จะแสดงในรูปที่ 2.17 ซึ่งสร้างจากชุดคอมพาราเรเตอร์ (Series comparators) โดยแต่ละตัวจะมีค่าเทรชโวลต์คงที่ค่าหนึ่งใช้ในการเปรียบเทียบระดับความสูงของสัญญาณที่เข้ามาและจะเพิ่มขนาดขึ้น ΔV ในทุกระดับขั้นขึ้นไป จุดสำคัญของหลักการทำงานของ flash ADC อยู่ที่ การใช้ช่องสัญญาณเดี่ยว (single-channel) ทำหน้าที่เป็นวินโดวส์ขนาดเล็กเพื่อวิเคราะห์ความสูงแต่ละช่วงของสัญญาณโดยจะแปลงสัญญาณพร้อมๆ กัน บางครั้งจึงเรียกวงจรนี้ว่าวงจรแปลงสัญญาณแบบขนาน (Parallel ADC) โดยจะรับสัญญาณอะนาล็อกอินพุตเข้ามาและรอนกระทั่งความสูงสัญญาณมีค่าสูงสุด คอมพาราเรเตอร์แต่ละตัวก็จะทำการแปลงค่าส่งไปยังส่วนถอดรหัสสัญญาณดิจิทัล (Digital output encode) แต่เนื่องจากวงจรถนิตนี้ต้องใช้คอมพาราเรเตอร์จำนวนมากในการแปลงสัญญาณชนิด เช่น ถ้าต้องการความละเอียด 10 บิตจะต้องมีวงจรเปรียบเทียบสัญญาณทั้งหมด 1023 วงจร ($2^N - 1$ วงจร โดยที่ n เท่ากับจำนวนบิตที่ต้องการ) ทำให้วงจรถนิตนี้มีราคาแพงกว่าชนิดอื่นๆ

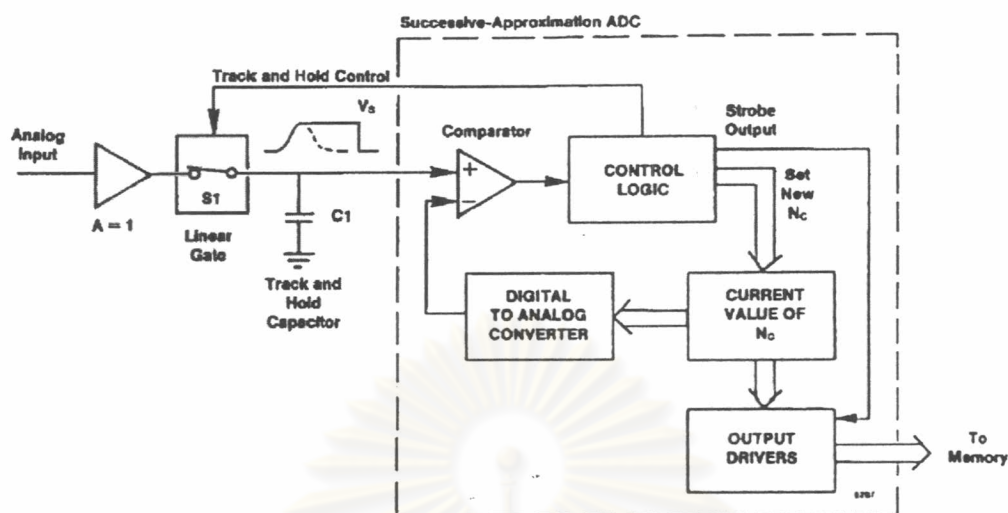


รูปที่ 2.17 หลักการของ Flash ADC

ข้อดีของ Flash ADC คือ ความเร็วในการแปลงสัญญาณจะเร็วที่สุด อยู่ในช่วงนาโนวินาที แต่มีข้อเสียคือจะเกิด Differential nonlinearity ขนาดสูงมาก ซึ่งทำให้เกิดข้อจำกัดในเรื่อง resolution ที่คอนเวอร์ชันเกน (conversion gain) น้อยกว่าแปดบิต ดังนั้น flash ADC จึงไม่เหมาะนำมาประยุกต์ใช้กับงานทางด้าน pulse-height spectroscopy ที่ต้องการ high-resolution

2.4.3.3 ตัวแปลงผันสัญญาณแบบซัคเซสซีฟแอพรอกซิเมชัน (Successive-Approximation ADC, SA)

หลักการการทำงานของ Successive-approximation ADC จะประกอบด้วย ซัคเซสซีฟแอพรอกซิเมชันรีจิสเตอร์ (SAR) ซึ่งภายในมีสัญญาณลอจิกควบคุม (Control Logic) ชิฟรีจิสเตอร์ (Shift Register) รวมทั้งชุดของเอาต์พุตแลตช์ (output latches) วงจรแปลงสัญญาณเชิงตัวเลขเป็นสัญญาณอะนาล็อก (Digital to Analog Converter, DAC) และวงจรเปรียบเทียบ ศักย์ไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 2.18 เมื่อสัญญาณอะนาล็อกอินพุตผ่านเข้ามาและเพิ่มสูงขึ้น สวิตช์ S1 จะปิดลงและความต่างศักย์ที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุ C1 จะค่อยๆเพิ่มตามขนาดของสัญญาณอินพุตที่เข้ามา เมื่อสัญญาณอินพุตเพิ่มขึ้นจนถึงระดับการเปรียบเทียบจาก DAC สวิตช์ S1 จะเปิดออกแต่ C1 ยังคงโวลต์ค่าความต่างศักย์สูงสุดของสัญญาณอินพุตไว้อยู่ หลังจากนั้นวงจรตรวจค่าพีคของสัญญาณ อินพุตจะส่งสัญญาณ start เพื่อเริ่มต้นการวัดและแปลงผันสัญญาณเป็นเลขดิจิตอล ในขั้นแรก บิต 1 ของชิฟรีจิสเตอร์จะถูกเซตค่าเป็น 1 ซึ่งจะตรงกับค่า most significant bit (MSB) ของ Digital-to-analog converter (DAC) จากนั้น DAC จะแปลงค่าที่ได้ไปเป็นความต่างศักย์ คอมพารเตอ์จะตรวจดูว่าค่าความต่างศักย์ที่ได้จาก DAC สูงเกินกว่าสัญญาณอินพุต V_s หรือไม่ ถ้าสูงกว่าค่า MSB จะถูกรีเซตให้เป็น 0 แต่ถ้าค่าเอาต์พุต DAC น้อยกว่าค่า V_s ค่า MSB จะยังคงเซตค่าให้เป็น 1 อยู่เหมือนเดิม หลังจากนั้นก็จะทำการทดสอบ MSB ถัดไปและทำซ้ำจนกระทั่งทุกๆบิตได้รับการตรวจสอบหมดก็จะหยุดการทำงาน รหัสเชิงตัวเลขที่ค้างในรีจิสเตอร์เมื่อทดสอบเสร็จจะแทนค่าความสูงของอะนาล็อกอินพุต ค่าไบนารี N_c ที่ได้ออกมาคือแอดเดรสของตำแหน่งในหน่วยความจำซึ่งจะนำไปบวกค่านับเพิ่มขึ้น ณ ตำแหน่งนั้นในแต่ละครั้งเพื่อสร้างเป็นรูปของ ฮิสโตรแกรมแทนสเปกตรัมของสัญญาณ ถ้า ADC มี n บิต (2^n channels) จำนวนรอบในการทดสอบจะเท่ากับ n ครั้ง



รูปที่ 2.18 วงจรพื้นฐานที่ใช้กับ Successive-approximation ADC

จำนวนรอบของการทดสอบสามารถลดลงได้โดยการแทนที่คอมพารเตอ์ตัวเดียว (Single comparator) ด้วย flash ADC ตัวอย่างเช่น ใน 16 บิต successive approximation ADC เราจะใช้ flash ADC ขนาด 6 บิต ในการทดสอบ 5 บิต ในไซเคิลแรก และ 5 บิตต่อมาในไซเคิลที่สอง ส่วน 6 บิตที่เหลือจะอยู่ในไซเคิลที่สาม ด้วยวิธีการนี้จะปรับปรุงเวลาในการแปลงสัญญาณ (conversion time) ให้น้อยลง โดยการลดจำนวนไซเคิลจาก 16 เหลือเพียง 3 รอบเท่านั้น ข้อดีของ successive-approximation คือช่วงเวลาในการแปลงผันสัญญาณจะสั้น อยู่ระหว่าง 2 ถึง 20 μs และมี resolution ระหว่าง 1,000 ถึง 16,000 channel

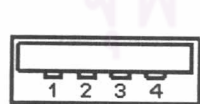
2.5 การสื่อสารข้อมูลอนุกรม USB ^[6]

ระบบบัสสื่อสารข้อมูลอนุกรม USB (Universal Serial Bus) เป็นระบบบัสที่เชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ ด้วยจุดเด่นในหลายๆด้านที่เหนือกว่ามาตรฐานระบบบัสแบบดั้งเดิมในแบบ RS-232 อยู่มาก ไม่ว่าจะเป็นเรื่องอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่สูงกว่าหรือวิธีการต่อใช้งานที่ทำได้สะดวกกว่า ทำให้ปัจจุบันอุปกรณ์หรือโมดูลต่างๆทางนิวเคลียร์เริ่มมีการออกแบบให้สามารถเชื่อมต่อในแบบ USB ได้ทั้งนี้ก็เพื่อความสะดวกในการใช้งาน

2.5.1 พื้นฐานของ USB พอร์ต

USB เป็นระบบบัสที่อุปกรณ์ภายในระบบทั้งหมดจะสื่อสารกันในแบบอนุกรมด้วยวิธีการแบ่งช่วงเวลา (Time Shared Serial Data Stream) โดยมีศูนย์กลางการควบคุมอยู่ที่อุปกรณ์มาสเตอร์ (Master Device) ซึ่งจะทำหน้าที่ควบคุมจังหวะในการรับส่งข้อมูลของอุปกรณ์ทั้งหมดบนบัส โดยการรับส่งข้อมูลระหว่างอุปกรณ์จะถูกกำหนดให้ต้องทำภายในเฟรมของเวลา (Time Frame) วิธีการนี้เองทำให้บัสสามารถต่อพ่วงกับอุปกรณ์ได้มากถึง 127 ตัว ที่อัตราเร็วในการรับส่งข้อมูล 2 ระดับด้วยกัน คือ 12 เมกะบิตต่อวินาที (Full Speed) และ 1.5 เมกะบิตต่อวินาที (Low Speed) การระบุอัตราเร็วของอุปกรณ์ต่อพ่วงว่าเป็นระดับใด (Full Speed หรือว่า Low Speed) เมื่อต่อเข้ากับอุปกรณ์มาสเตอร์ก็จะทำได้โดยการต่อตัวต้านทานคร่อมเข้าไปที่ระหว่างขั้วสัญญาณชั่วคราวใดขั้วหนึ่งของพอร์ตกับแหล่งจ่ายไฟ

สายเคเบิลและคอนเน็กเตอร์ที่ใช้ในการเชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ บนระบบบัส USB มีลักษณะเฉพาะตัวที่ถูกกำหนดขึ้นเป็นมาตรฐาน สายเคเบิลที่ใช้กับระบบบัสชนิดนี้ประกอบด้วยสายไฟทั้งหมด 4 เส้น โดยสายไฟ 2 เส้น เป็นสายแรงดันไฟเลี้ยง 5 โวลต์ และกราวด์ ส่วนสายไฟที่เหลืออีก 2 เส้น เป็นสายนำสัญญาณซึ่งจะรับ/ส่งกันในลักษณะ สัญญาณผลต่าง (Differential Signal) การรับ/ส่งด้วยวิธีนี้ช่วยลดผลของสัญญาณรบกวนที่มีจากภายนอกลงจึงทำให้ข้อมูลสามารถถูกส่งออกไปได้ในระยะไกลโดยไม่เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณ ในส่วนของคอนเน็กเตอร์นั้นมีอยู่ 2 ชนิด ซึ่งมีรูปร่างแตกต่างกันไป ได้แก่ คอนเน็กเตอร์ชนิด A (Type A) และ ชนิด B (Type B) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 สาเหตุของการมีคอนเน็กเตอร์ที่แตกต่างกันนี้ก็เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดความสับสนเมื่อนำไปต่อใช้งาน รวมทั้งยังเป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการต่อแบบวงลูปย้อนกลับ (Loopback) ขึ้นในระบบบัสอีกด้วย โดยทั่วไปคอนเน็กเตอร์ชนิด A จะมีติดตั้งอยู่ในอุปกรณ์ที่ทำงานเป็นโฮสต์ (Host) หรือ ฮับ (Hub) เท่านั้น ส่วนคอนเน็กเตอร์ชนิด B จะมีติดตั้งในอุปกรณ์ต่อพ่วง (Devices)



Type A



Type B

Pin Number	Cable Color	Function
1	Red	V _{BUS} (5 volts)
2	White	D-
3	Green	D+
4	Black	Ground

รูปที่ 2.19 แสดงคอนเน็กเตอร์ USB แบบ A และ B

การเชื่อมต่ออุปกรณ์บนระบบบัส USB ไม่อาจใช้เพียงการเดินสายไฟเชื่อมต่อระหว่างแต่ละอุปกรณ์ได้ แต่จะใช้วิธีการต่อผ่านอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางเรียกว่า ฮับ (Hub) ในคอมพิวเตอร์รุ่นใหม่ ๆ ทั่วไปจะมีฮับอยู่ภายในตัว (หรือที่เรียกอีกอย่างว่ารูตฮับ (Root Hub)) ซึ่งสามารถรองรับอุปกรณ์ต่อพ่วงได้ทั้งสิ้น 2 ตัว โดยอุปกรณ์จะถูกนำมาต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ที่พอร์ต USB ซึ่งมีอยู่ทั้งหมด 2 ช่อง ทางด้านหลังของตัวเครื่อง แต่ถ้าหากต้องการต่ออุปกรณ์มากกว่านี้ ก็จำเป็นต้องต่อฮับแบบต่อภายนอกเพิ่มเข้าไปยังพอร์ตใดพอร์ตหนึ่งเสียก่อน จากนั้นจึงค่อยนำอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ต้องการมาต่อเข้ากับฮับที่ว่างอีกที

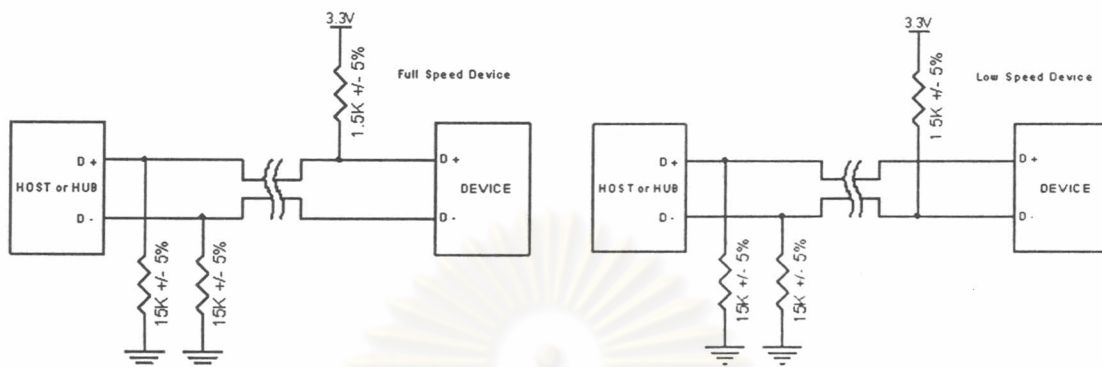
2.5.2 การติดต่อระหว่างอุปกรณ์และโฮสต์

รูปแบบการรับส่งข้อมูล (Transfer type) ในการติดต่อกันระหว่างโฮสต์และอุปกรณ์ต่อพ่วงบนระบบบัส USB แบ่งออกได้เป็น 4 ชนิด ตามขนาดของข้อมูล ชนิดของข้อมูล และจังหวะในการส่งข้อมูล ดังนี้

- คอนโทรลทรานสเฟอร์ (Control Transfer) ใช้ในการส่งสัญญาณเพื่อไปควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่อพ่วง รูปแบบการรับส่งข้อมูลนี้ถูกกำหนดให้มีค่าระดับความสำคัญ (Priority) และมีฟังก์ชันตรวจสอบและป้องกันความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นด้วย มักถูกใช้กับการกำหนดค่าเริ่มต้นเพื่อเตรียมความพร้อมของอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทำงาน อุปกรณ์บนบัส USB ทั้งหมดจะสามารถรองรับรูปแบบการรับส่งข้อมูลแบบนี้ได้
- บัลก์ทรานสเฟอร์ (Bulk Transfer) ใช้ในการรับส่งข้อมูลจำนวนมากๆ ที่ความต่อเนื่องไม่ใช่เรื่องจำเป็นมากนัก อย่างไรก็ตามรูปแบบการรับส่งข้อมูลแบบนี้ถูกกำหนดให้มีระดับความสำคัญต่ำ
- อินเตอร์รัพท์ทรานสเฟอร์ (Interrupt Transfer) ใช้กับการรับส่งข้อมูลจำนวนน้อยที่นานๆถึงจะรับส่งกันสักครั้งหนึ่ง โดยมากใช้กับอุปกรณ์ต่อพ่วงอัตราเร็วต่ำ
- ไอโซโครนัสทรานสเฟอร์ (Isochronous Transfer) ใช้กับการรับส่งข้อมูลจำนวนมากๆ ที่ต้องการความต่อเนื่องด้วยอัตราเร็วคงที่ค่าหนึ่ง การรับส่งข้อมูลแบบนี้จะไม่มีการป้องกันความผิดพลาดในระหว่างรับส่งข้อมูลรวมอยู่ด้วยจึงทำให้โอกาสที่ข้อมูลจะสูญหายหรือมีความผิดพลาดอาจเกิดขึ้นได้

อย่างไรก็ตามแม้ว่าระบบบัส USB จะถูกออกแบบมาให้สามารถรับส่งข้อมูลได้ที่อัตราเร็วสูงสุดถึง 12 เมกะบิตต่อวินาที แต่ในทางปฏิบัติแล้วอัตราเร็วในการรับส่งข้อมูลที่แท้จริงอาจลดต่ำ

ลงจากตัวเลขดังกล่าวมากในบางกรณี ยกตัวอย่างเช่น การเชื่อมต่อด้วยอัตราเร็วต่ำที่เพิ่มส่วนป้องกันความผิดพลาดรวมอยู่ด้วย อัตราเร็วของบัสที่มีเสถียรภาพจะถูกจำกัดอยู่ที่เพียงอัตรา 800 ไบต์ต่อวินาที เท่านั้น



รูปที่ 2.20 แสดงการกำหนดอัตราเร็วในการส่งข้อมูลในระบบบัส USB

2.5.3 การอินเตอร์เฟสกับระบบคอมพิวเตอร์

ในเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่นใหม่ ๆ ส่วนใหญ่จะมีพอร์ต USB ติดตั้งมาด้วยและในระบบปฏิบัติการ (Operating System) ก็จะมีไดรเวอร์ระดับเคอร์เนล (Kernel-level) ที่รองรับการทำงานของบัส USB ไว้ให้แล้ว แต่นอกเหนือจากไดรเวอร์ในระดับเคอร์เนลแล้ว ในระบบปฏิบัติการก็ยังคงต้องมีไดรเวอร์ตามแต่ชนิดของอุปกรณ์ที่ต่อพ่วงติดตั้งเพิ่มเข้าไปด้วย

อุปกรณ์ต่อพ่วงแต่ละชิ้นจะถูกจดจำโดยระบบปฏิบัติการแบบขั้นต่อขั้นในระหว่างขั้นตอนการบูตเครื่อง ซึ่งในขณะนั้นเองที่จะมีการเรียกไดรเวอร์ของอุปกรณ์แต่ละตัวขึ้นมา หลังจากนั้นเครื่องคอมพิวเตอร์ก็จะสามารถรับรู้ถึงการต่อเข้าเพิ่มหรือการถอดอุปกรณ์ออกจากบัส USB ได้อย่างอัตโนมัติ ทำให้ผู้ใช้สามารถต่ออุปกรณ์เข้ากับพอร์ตและใช้งานได้ทันทีโดยไม่ต้องมีการรีบูตเครื่องคอมพิวเตอร์อีก นอกจากนี้คอมพิวเตอร์ก็จะปิดการทำงานของไดรเวอร์สำหรับอุปกรณ์ที่ถูกถอดออกไปให้อย่างอัตโนมัติด้วยเช่นกัน

สาเหตุที่ทำให้การต่อใช้งานอุปกรณ์เข้ากับพอร์ต USB ทำได้สะดวกมาก ก็เพราะเมื่อต่ออุปกรณ์เข้ากับพอร์ต USB บนคอมพิวเตอร์ รูทฮับจะส่งสัญญาณแจ้งไปยังระบบปฏิบัติการในทันที เพื่อให้ทำการตรวจสอบชนิดและสถานะของอุปกรณ์ที่ถูกต่อเข้ามา จากนั้นอุปกรณ์ดังกล่าวก็จะส่งข้อมูลโต้ตอบกลับโดยข้อมูลดังกล่าวจะเป็น ชื่อและรหัสประจำตัวของผลิตภัณฑ์ (Product Identification;PID) รวมทั้งชื่อบริษัทผู้ผลิต (Vendor Identification;VID) ของอุปกรณ์นั้นๆ ให้

คอมพิวเตอร์ทราบ เพื่อจะได้นำไปค้นหาและเรียกไดรเวอร์ของอุปกรณ์นั้นๆ ได้อย่างถูกต้อง แต่ถ้าหากค้นหาไม่พบหรือพบว่าไดรเวอร์ที่ต้องการไม่มีติดตั้งอยู่ คอมพิวเตอร์ก็จะแจ้งให้ผู้ใช้ทราบเพื่อให้ติดตั้งไดรเวอร์ของอุปกรณ์เสียก่อน หลังจากนั้นผู้ใช้จึงจะสามารถใช้งานอุปกรณ์นั้นได้

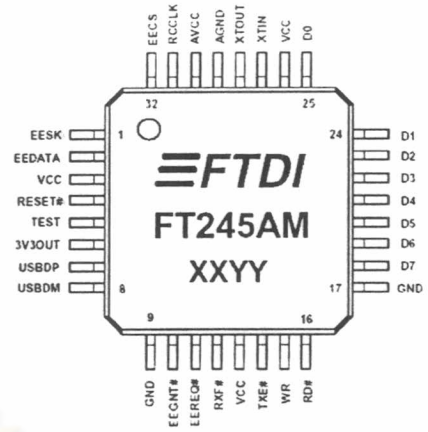
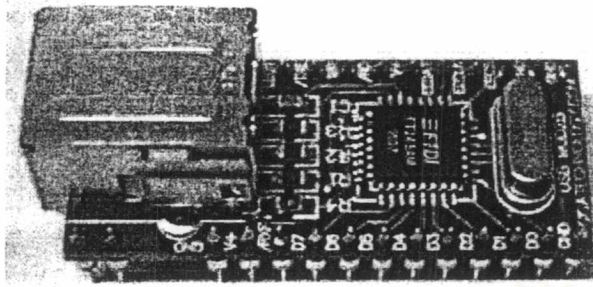
2.5.4 การอินเตอร์เฟสกับอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้น

ในการอินเตอร์เฟสอุปกรณ์ที่เราได้พัฒนาขึ้นผ่านทางพอร์ต USB เราจำเป็นต้องเขียนโปรแกรมเพื่อสื่อสารระหว่างกัน และกำหนดโปรโตคอลในการรับส่งข้อมูล ซึ่งอาจใช้ไอซีที่มีพอร์ต USB อยู่ในตัว ที่มีโครงสร้างทางฮาร์ดแวร์และชุดคำสั่งสำหรับการติดต่อกับระบบบัสแบบ USB ให้เราใช้งานได้ทันทีมาใช้ในการอินเตอร์เฟสระหว่างอุปกรณ์ที่พัฒนากับคอมพิวเตอร์ ในที่นี่เราจะใช้ไอซี FT8U245AM มาใช้ในการออกแบบอินเตอร์เฟส

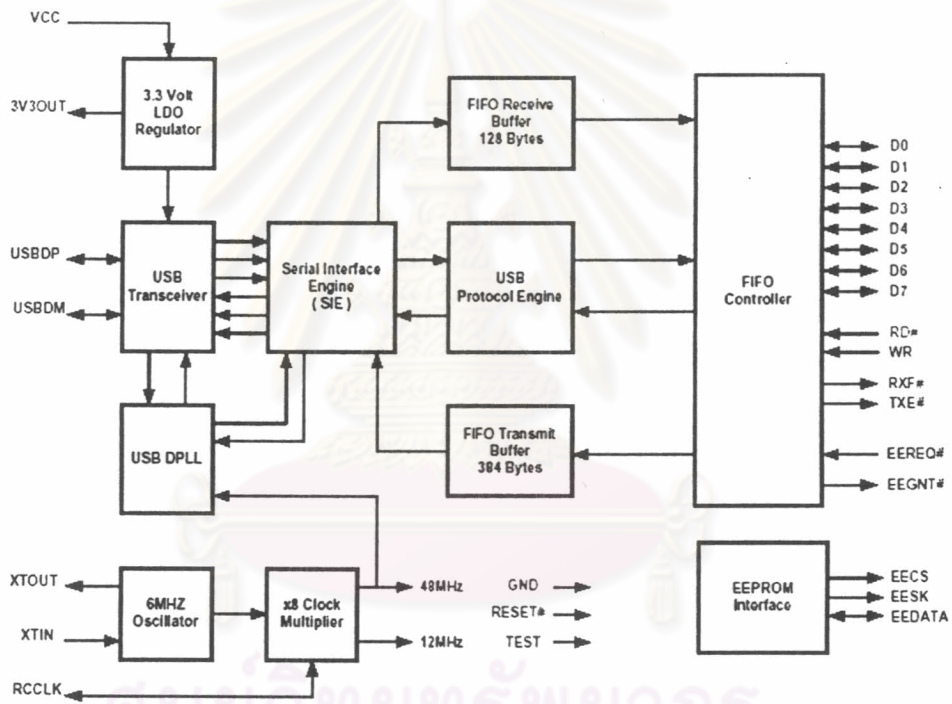
2.5.5 คุณสมบัติทั่วไปของ FT8U245AM

FT8U245AM เป็นไอซีที่ผลิตขึ้นโดย Future Technology Devices International Limited หรือ FTDI ไอซี FT8U245AM เป็นไอซีที่ทางผู้ผลิตเรียกว่า USB FIFO เพราะถูกออกแบบมาเพื่อใช้อินเตอร์เฟสกับอุปกรณ์ด้วยการใช้ข้อมูลแบบขนานขนาด 8 บิต โดยสามารถจะรับส่งข้อมูลด้วยอัตราเร็วได้สูงสุด 1 เมกะบิตต่อวินาที เนื่องจากโครงสร้างที่ถูกออกแบบมาให้คล้ายคลึงกับบัฟเฟอร์ FIFO จึงทำให้การต่อเข้ากับไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์ง่ายขึ้น โดยการต่อใช้งานก็จะใช้วิธีเดียวกับการต่อหน่วยความจำหรืออุปกรณ์อินพุต/เอาต์พุตเข้ากับไมโครโปรเซสเซอร์หรือไมโครคอนโทรลเลอร์นั่นเอง

การส่งข้อมูลจากอุปกรณ์ต่อพ่วงที่ใช้ FT8U245AM ไปยังเครื่องไมโครคอมพิวเตอร์ ก็เพียงแค่เขียนข้อมูล (ครั้งละ 1 ไบต์) ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ที่เชื่อมอยู่ที่ขา D0-D7 และตรวจสอบสัญญาณพร้อมให้ส่งข้อมูลจากขา /TXE เมื่อพบว่ามีสถานะเป็นลอจิกต่ำก็ให้ส่งสัญญาณกระตุ้นไปยังขาควบคุมการเขียนข้อมูล (Write control line) หรือขา WR เพื่อให้ไอซีอ่านข้อมูลจากพอร์ตของไมโครคอนโทรลเลอร์ไปเก็บไว้ยังบัฟเฟอร์ FIFO เพื่อรอขั้นตอนในการส่งออกไปยังบัส USB สำหรับการรับข้อมูลก็ทำได้โดยการตรวจสอบสัญญาณความพร้อมของข้อมูลที่ขา RXF ก่อนเมื่อสัญญาณดังกล่าวมีสถานะเป็นลอจิกต่ำก็ให้ส่งสัญญาณกระตุ้นไปให้กับขาสัญญาณควบคุมการอ่านข้อมูล (Read control line) ที่ขา RD เพียงเท่านั้น ข้อมูลก็จะถูกอ่านมาแสดงยังขา D0-D7 รอให้อุปกรณ์นำข้อมูลไปใช้งานต่อไป



รูปที่ 2.21 แสดงรูปไอซี FT8U245AM



รูปที่ 2.22 ไดอะแกรมแสดงส่วนการทำงานภายในไอซี FT8U245AM