

บทที่ 2

ห้วงรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนลแบบไวต่อตำแหน่ง

2.1 ห้วงรังสีพรอพอร์ชันแนล

ห้วงรังสีพรอพอร์ชันแนลเป็นห้วงรังสีที่ออกแบบให้ทำงานในย่านพรอพอร์ชันแนล (proportional region) บนเส้นกราฟคุณลักษณะการทำงานของห้วงรังสีชนิดบรรจุก๊าซต่อจากย่านไอออไนเซชัน (ionization region) ดังในรูปที่ 2.1 ก.[2] การทำงานของห้วงรังสีในย่านนี้ สนามไฟฟ้าระหว่างแอโนดและแคโทดจะสูงกว่าย่านไอออไนเซชัน ดังนั้นหลังจากเกิดไอออไนซ์ปฐมภูมิในก๊าซซึ่งเป็นตัวกลางรับอันตรกิริยาในการวัดรังสีแล้วอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่สู่แอโนดจะมีพลังงานจลน์สูงพอที่จะทำให้ไอออไนซ์ครั้งใหม่อีก เกิดการไอออไนซ์ทุติยภูมิ (secondary ionization) ขึ้นดังการทำงานในรูปที่ 2.1.ค. ปรากฏการณ์ที่เกิดการไอออไนซ์ของกุ่มก๊าซเป็นคู่ไอออนมากขึ้นนี้เรียกว่า "Townsend avalanche" ปริมาณของไอออนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อปริมาณไอออนที่เกิดจากการไอออไนซ์ปฐมภูมิ คือค่าทวีคูณของก๊าซ (gas multiplication;M) เขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [2]

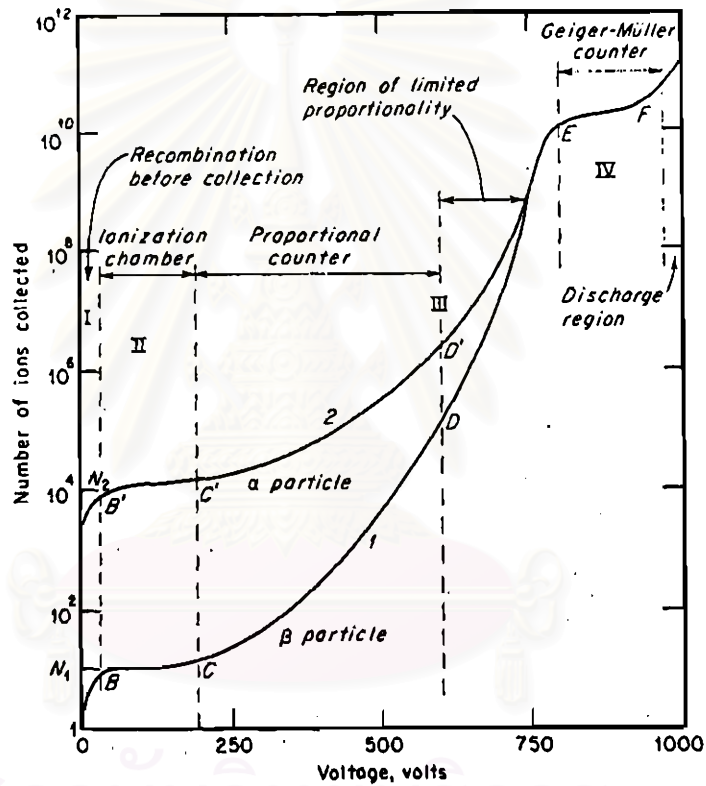
$$M = \frac{\text{ปริมาณ ไอออนที่เกิดขึ้นภายในห้วงรังสีทั้งหมด}}{\text{ปริมาณ ไอออนที่เกิดจากการไอออไนซ์ปฐมภูมิอย่างเดียว}} \dots\dots\dots(2.1)$$

ในรูปที่ 2.1.ค. แสดงลักษณะการทำงานของก๊าซในห้วงรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนลขณะวัดรังสี ปริมาณของประจุที่เกิดขึ้นในห้วงรังสีทั้งหมด (Q) สามารถคำนวณได้จากสมการ

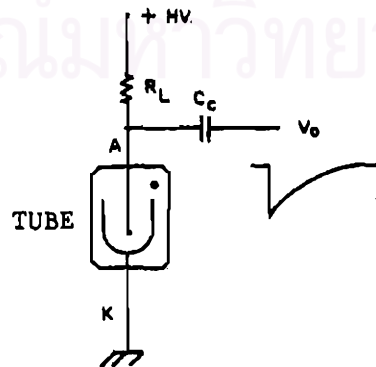
$$Q = M \cdot n_{av} \cdot q = \frac{ME}{W} \cdot q \dots\dots\dots(2.2)$$

- เมื่อ E คือ พลังงานของรังสีที่ผ่านเข้าไปในห้วงรังสี
- n_{av} คือ จำนวนไอออนเฉลี่ยที่เกิดขึ้น
- W คือ พลังงานที่ใช้ในการกำเนิดคู่ไอออน 1 คู่
- q คือ ประจุของอิเล็กตรอน

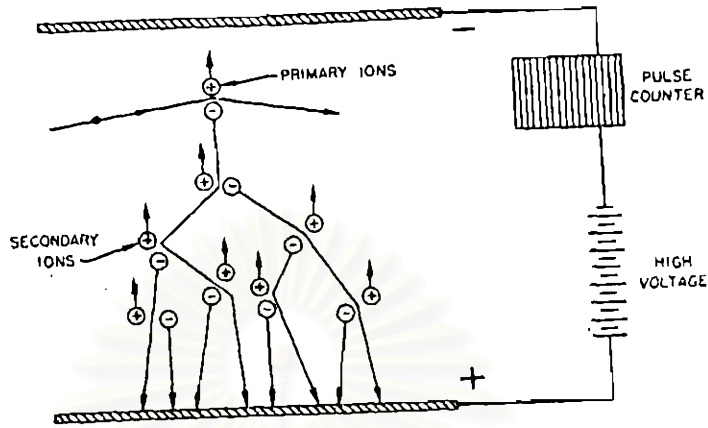
หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซที่ทำงานในย่านพรอพอร์ชันแนล ในทางปฏิบัติมักจะใช้ศักดาไฟฟ้าไบอัสประมาณ 1000-2000 V พบในการใช้งานที่มีการวัดพลังงานของรังสี เช่น การวัดรังสีเอกซ์พลังงานต่ำของเครื่องมือวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ทั้งแบบ EDX และ WDX เครื่องมือวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) และการวัดรังสีนิวตรอนโดยการผสมสารไวปฏิกิริยานิวตรอนกับก๊าซที่บรรจุในหัววัดรังสี รวมทั้งการวัดรังสีอัลฟาและเบตาในหัววัดรังสีประเภทก๊าซไหล (gas flow) เป็นต้น หัววัดรังสีชนิดนี้จะจัดวงจรหัววัดรังสีในรูปแบบของการวัดสัญญาณพัลส์ (pulse type) ในรูปที่ 2.1.ข.



ก. เห็นกราฟคุณลักษณะการทำงานของหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ [2]



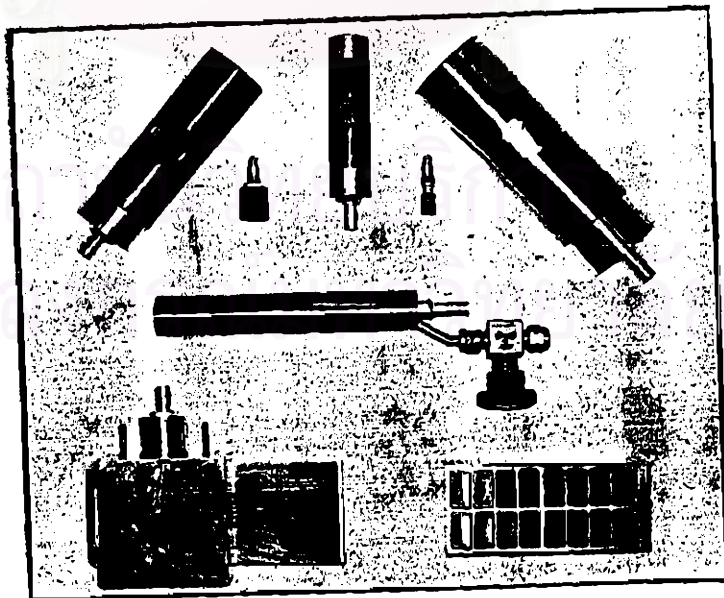
ข. รูปแบบวงจรวัดรังสีแบบวัดขนาดพัลส์



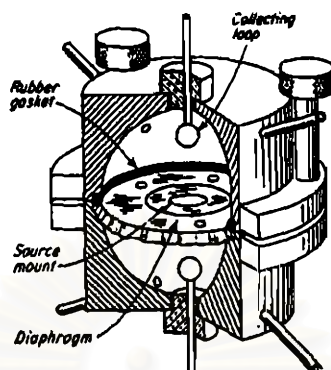
ค. การทำงานของก๊าซในย่านพรอพอร์ชันแนล

รูปที่ 2.1 การทำงานของหัววัดรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนล

โครงสร้างของหัววัดรังสีจะมีรูปร่างต่างกันไปตามลักษณะการใช้งาน และการเลือกใช้ก๊าซที่บรรจุแตกต่างกันไป เพื่อให้เหมาะกับคุณสมบัติของรังสี ในรูปที่ 2.2 แสดงกลุ่มหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดบรรจุก๊าซแบบผนึกสนิทและบรรจุก๊าซใหม่สำหรับวัดโปรตอน นิวตรอน และรังสีเอกซ์ ส่วนในรูปที่ 2.3 เป็นภาพตัดขวางของหัววัดพรอพอร์ชันแนลชนิดก๊าซไหลผ่านชนิดไม่มีหน้าต่าง (windowless) ซึ่งจัดรูปทรงการวัดแบบ 4π



รูปที่ 2.2 หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดบรรจุก๊าซ



รูปที่ 2.3 หัววัดรังสีพรอพรอร์ชันแนลชนิดก๊าซไหลผ่านแบบ4π [3]

2.1.1 การทวีปริมาณ ไอออนในก๊าซ (Gas multiplication)

จากลักษณะการทำงานของก๊าซในช่วงพรอพรอร์ชันแนลดังในรูปที่ 2.1 จะเห็นว่า อิเล็กตรอนจากไอออนคู่แรกถูกเร่งในสนามไฟฟ้าความเข้มสูงทำให้มีพลังงานจลน์สูงพอที่จะทำให้ อะตอมก๊าซเกิดการไอออไนซ์ขึ้นอีกหลายครั้งตามระยะทางที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่สู่อโนด เป็นการทวีปริมาณคู่ของไอออนในก๊าซ คุณลักษณะการเพิ่มขึ้นของปริมาณไอออนจะเป็นไปตาม สมการของ Townsend ดังนี้ [2]

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad \dots\dots\dots(2.3)$$

α = สัมประสิทธิ์ Townsend ตัวแรกของก๊าซ

x = ระยะทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน

ค่าของปริมาณไอออน (n) หาได้จาก

$$\int_{n_0}^{n_x} \frac{dn}{n} = \alpha \int dx$$

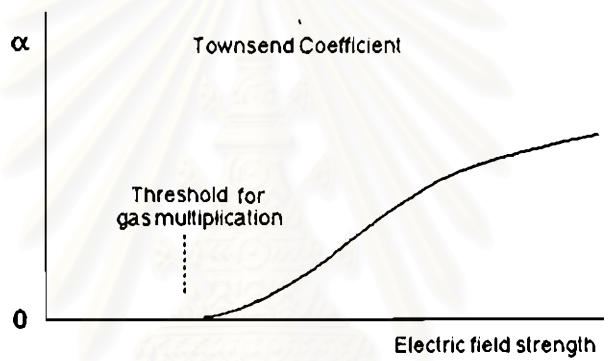
$$\ln n \Big|_{n_0}^{n_x} = \alpha x$$

$$\ln n(x) - \ln n(0) = \alpha x$$

$$\ln \frac{n(x)}{n(0)} = \alpha x$$

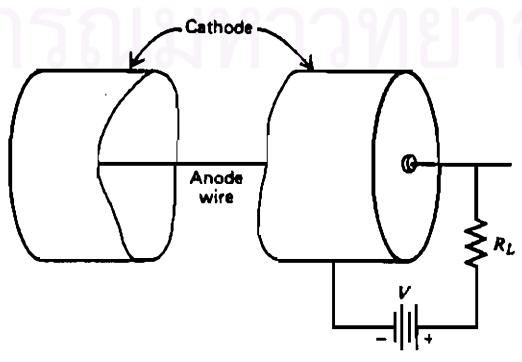
ดังนั้น $n(x) = n(0)e^{\alpha x}$ (2.4)

นั่นคือปริมาณของไอออนในภาวะอวสานจะเพิ่มขึ้นในลักษณะการเพิ่มขึ้นแบบเอกซ์โพเนนเชียลตามระยะทางเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ที่สำคัญค่าสัมประสิทธิ์ Townsend ของก๊าซตัวแรก (α) จะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มสนามไฟฟ้าเพิ่มขึ้นดังแสดงในเส้นกราฟรูปที่ 2.4 [1]



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ของสัมประสิทธิ์ Townsend กับความเข้มสนามไฟฟ้า

ได้มีการศึกษาค่าทวีคูณของก๊าซ (M) จากการทำงานของก๊าซที่บรรจุในหัววัดรังสีพรอเพอร์ชันแนลที่มีโครงสร้างรูปทรงกระบอกดังในรูปที่ 2.5 พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการทวีปริมาณไอออน เป็นไปตามสมการ 2.5



รูปที่ 2.5 โครงสร้างพื้นฐานของหัววัดรังสีพรอเพอร์ชันแนล

$$\ln M = \frac{V}{\ln(b/a)} \cdot \frac{\ln 2}{\Delta V} \left(\ln \frac{V}{pa \ln(b/a)} - \ln K \right) \dots\dots\dots(2.5)$$

- เมื่อ V = ศักลไฟฟ้าสูงที่จ่ายให้แอโนดและแคโทด
 a = รัศมีของเส้นทวดแอโนด
 b = รัศมีของแคโทด
 p = ความดันก๊าซที่บรรจุ
 K = ค่าต่ำสุดของอัตราความเข้มสนามไฟฟ้าต่อความดันก๊าซ (ϵ / p) ที่เป็นจุดก่อนเกิดการทวีปริมาณไอออน

ค่า ΔV และ K เป็นค่าคงที่สำหรับก๊าซชนิดนั้นๆที่ใช้บรรจุในหัววัดรังสี ตามปกติการทวีปริมาณไอออนเป็นผลจากการเกิดไอออนในซ์ทุติยภูมิ แต่มีบางโอกาสที่อิเล็กตรอนถ่ายพลังงานให้อะตอมก๊าซแต่ไม่เกิดไอออนในซ์ อะตอมนี้จะรับภาวะกระตุ้นและคืนสู่ภาวะกราวนด์ พร้อมทั้งปลดปล่อยโฟตอนที่มีความยาวคลื่นในช่วงตามองเห็นถึงช่วงรังสีเหนือม่วงและมีพลังงานสูงพอที่จะทำให้เกิดไอออนในซ์ชั้นในอะตอมที่มีแรงยึดเหนี่ยวของชั้นโคจรต่ำลง รวมทั้งโฟตอนจะไปกระตุ้นผนังของแคโทดให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนทำให้ปริมาณไอออนที่เกิดโดยรวมไม่เป็นสัดส่วนกับพลังงานมีผลให้สูญเสียความเป็นเชิงเส้นในช่วงการทำงานของหัววัดชนิดพรอพอร์ชันแนล จึงจำเป็นต้องมีการระงับการเกิดภาวะดังกล่าวด้วยการผสมก๊าซที่มีองค์ประกอบโมเลกุลแบบหลายอะตอม (polyatomic gas) เข้าไปในก๊าซหลักเล็กน้อย ได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4) หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นต้น ก๊าซที่เติมเพิ่มไปจะช่วยลดผลการเหนี่ยวนำของโฟตอน (photon induced effect) ด้วยการดูดกลืนพลังงานโฟตอนที่เกิดขึ้น ก๊าซที่ผสมเพิ่มเข้ามานี้เรียกว่า "quench gas" ในทางปฏิบัติก๊าซที่ใช้ในหัววัดบรรจุก๊าซชนิดพรอพอร์ชันแนล จะมีค่าองค์ประกอบของการทวีปริมาณไอออน (M) ต่ำกว่า 10^2 เท่า นอกจากนี้การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนที่รวดเร็วกว่าไปยังแอโนด เมื่อเทียบกับการเคลื่อนที่ของไอออนบวกที่ช้ากว่าและค่อยๆแพร่ผ่านก๊าซในหัววัดรังสีไปยังผนังแคโทด จะทำให้เกิดภาวะ space charge รอบแอโนดขึ้น ปรัชญาการนี้จะทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าเปลี่ยนแปลงก่อให้เกิดความไม่เป็นเชิงเส้นของค่าทวีปริมาณก๊าซอันมีผลกระทบต่อความสามารถในการแจกแจงพลังงานของหัววัดรังสีด้วย ทั้งนี้ขึ้นกับคุณสมบัติของก๊าซแต่ละชนิด ดังตารางที่ 2.1 แสดงค่าคงที่ของก๊าซชนิดต่างๆ ที่ใช้ในหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล

ตารางที่ 2.1 ค่าคงที่ซึ่งเกี่ยวข้องกับความสามารถในการแจกแจงพลังงานของก๊าซต่างๆ [1]

Gas	W (eV/ion pair)	Fano Factor F		Multiplication Variance <i>b</i>	Energy Resolution at 5.9 keV	
		Calculated ^a	Measured		Calculated ^b	Measured
Ne	36.2	0.17		0.45	14.5%	
Ar	26.2	0.17		0.50	12.8%	
Xe	21.5		≤ 0.17			
Ne + 0.5% Ar	25.3	0.05		0.38	10.1%	11.6%
Ar + 0.5% C ₂ H ₂	20.3	0.075	≤ 0.09	0.43	9.8%	12.2%
Ar + 0.8% CH ₄	26.0	0.17	≤ 0.19			
Ar + 10% CH ₄	26 ^c			0.50	12.8%	13.2%

^aFrom Alkharov et al.¹⁵

^bGiven by $2.35[W(F + b)/5900 \text{ eV}]^{1/2}$ [see Eq. (6-22)].

^cFrom Wolff.³³

Source: Adapted from Sipila.⁴⁰

2.1.2 การออกแบบหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล

การออกแบบหัววัดรังสีต้องกำหนดสัดส่วนทางกลเช่น ขนาดของแคโทด แอโนด ความหนาของหัววัดรังสีและหน้าด่างรับรังสี รวมทั้งชนิดของก๊าซที่ใช้และก๊าซผสมที่ทำหน้าที่ระงับการแตกตัว ความดันก๊าซซึ่งเกี่ยวข้องกับศักดาไฟฟ้าที่ใช้และค่าทวิคูณของก๊าซ วัสดุที่ใช้ทำหน้าด่างส่วนใหญ่จะใช้ เบอริลเลียม อะลูมิเนียม ฟิสิกส์โพสิทีฟไอออนบางๆและไมถาร์ เป็นต้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพลังงานและคุณสมบัติของรังสี ก๊าซที่ใช้บรรจุในหัววัดได้แก่ อาร์กอน (Ar) ซีซีนอน (Xe) และ คริปทอน (Kr) ที่บริสุทธิ์ เคมีด้วยก๊าซแควนซิ่งซึ่งเป็นมีเทน (CH₄) หรือ คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในช่วง 1-10% การเลือกก๊าซที่ใช้กับหัววัดขึ้นอยู่กับช่วงพลังงานที่ต้องการวัด ค่าแอมป์ชอปชันแอนด์ของก๊าซต่อบริเวณพลังงานที่วัดและขนาดของสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N) เป็นต้น ซึ่งพอสรุปได้ว่าพารามิเตอร์ที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของหัววัดรังสีได้แก่ [3]

- ก. ขนาดของหัววัดรังสี (Size of counter)
- ข. ขนาดของเส้นลวดแอโนด (Size of anode wire)
- ค. ชนิดของก๊าซ (Gas type)
- ง. ความดันของก๊าซ (Gas pressure)
- จ. ขนาดของไฟฟ้าศักดาสูง (High voltage level)

รูปทรงของหัววัดรังสีสามารถออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งานได้ 3 แบบคือ แบบทรงกระบอกกลมและทรงกระบอกเหลี่ยมหรือแบบทรงกลม การที่รูปทรงของหัววัดรังสี

แตกต่างกันไปจะทำให้ความเข้มไฟฟ้าของขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่สร้างภาวะการรวบรวมประจุไฟฟ้าบนแอโนดแตกต่างกันไป ความเข้มสนามไฟฟ้า (\mathcal{E}) สามารถคำนวณได้จาก [3]

รูปทรงกระบอก

$$\mathcal{E}_r = \frac{V_0}{\ln(b/a)} \frac{1}{r} \dots\dots\dots(2.6)$$

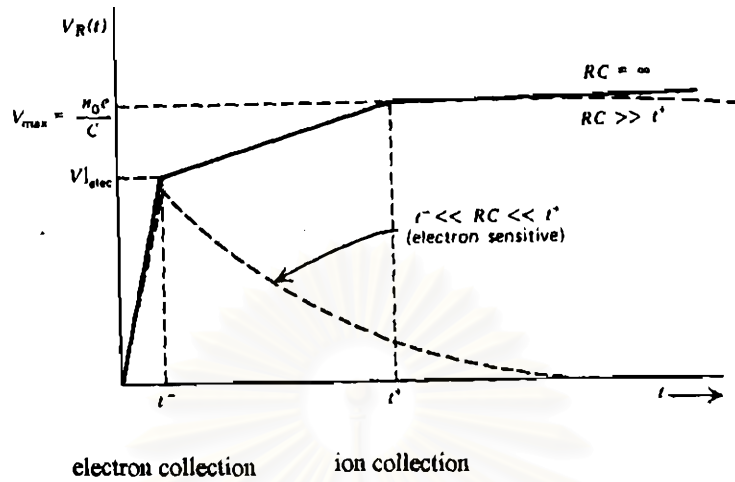
รูปทรงกลม

$$\mathcal{E}_r = V_0 \frac{ab}{b-a} \frac{1}{r^2} \dots\dots\dots(2.7)$$

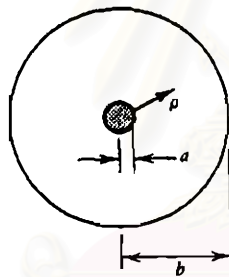
- เมื่อ a = รัศมีของเส้นลวดแอโนด
- b = รัศมีของกระบอกหัววัดรังสี
- r = ระยะห่างจากศูนย์กลางของหัววัดรังสี
- V_0 = ไฟฟ้าศักดาสูงที่ขั้วไฟฟ้า

2.1.3 สัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสี

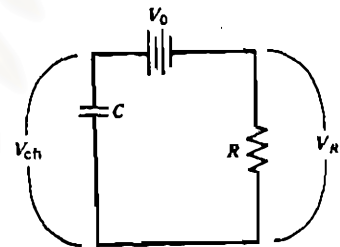
ขณะเกิดอันตรกิริยาในหัววัดรังสีทั้งอิเล็กตรอนและไอออนบวกจะเกิดบริเวณรอบๆเส้นลวดแอโนด ขนาดของสัญญาณที่เกิดขึ้นในช่วงที่มีการรวบรวมประจุเกือบทั้งหมดเกิดจากการเคลื่อนที่ของไอออน มีเพียงประมาณ 2% เท่านั้น [1]ที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน ดังแสดงรูปสัญญาณในรูปที่ 2.6 ดังนั้นการหาขนาดของพัลส์จะคิดจากผลของไอออนที่เริ่มเคลื่อนที่จากผิวของแอโนดและความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน (ion mobility) ยังมีผลต่อเวลาขาขึ้น (rise time) ของสัญญาณพัลส์ด้วย ในรูปที่ 2.7 แสดงภาคตัดขวางของหัววัดรังสีทรอพอร์ชันแบบรูปทรงกระบอกที่มีขนาดรัศมีของเส้นลวดแอโนดและกระบอกแคโทดเท่ากับ a และ b ตามลำดับ สามารถวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของเวลาในการเคลื่อนที่ของไอออนและขนาดของสัญญาณพัลส์เมื่อการรับอันตรกิริยาจากรังสีเกิดที่บริเวณแอโนดได้ดังนี้ [1]



รูปที่ 2.6 รูปสัญญาณพัลส์จากหัววัดรังสี



ก. ภาคตัดขวางของหัววัดรังสี



ข. วงจรสมมูลของหัววัดรังสี

รูปที่ 2.7 การเกิดสัญญาณพัลส์เนื่องจากไอออน

ก. ความเร็วของไอออนสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$v = \frac{dr}{dt} = \frac{\mu E}{p} \dots\dots\dots(2.8)$$

v = ความเร็วครีฟ (drift velocity)

p = ความดันก๊าซวัดรังสี

μ = ความสามารถในการเคลื่อนที่ของไอออน

r = รัศมีที่ตำแหน่งใดๆ

ความเข้มของสนามไฟฟ้าที่ระยะห่างจากแอดโนด r มีค่าเป็น

$$\epsilon_r = \frac{V_0}{r \ln(b/a)} \quad \text{.....(2.9)}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 2.8 ความเร็วของไอออนจะมีค่า

$$\frac{dr}{dt} = \frac{\mu V_0}{pr \ln(b/a)} \quad \text{.....(2.10)}$$

อินทิเกรต สมการที่ 2.10 โดยคิดว่าไอออนบวกทุกตัวเริ่มจากระยะทาง a ที่ $t = 0$

$$r = \left(2 \frac{\mu}{p} \frac{V_0}{\ln(b/a)} t + a^2 \right)^{1/2} \quad \text{.....(2.11)}$$

เมื่อแทนค่า $r(t) = b$ หรือระยะเคลื่อนที่ถึงผนังแคโทดจะได้เวลาที่ไอออนบวกใช้ในการเคลื่อนที่จากรัศมี a ถึง b คือ t^+ จะได้

$$t^+ = \frac{(b^2 - a^2) p \ln(b/a)}{2 \mu V_0} \quad \text{.....(2.12)}$$

ข. การดูคลื่นพลังงานในตัวกลางของหัววัดรังสีขณะประจุบวกเคลื่อนผ่านความต่างศักย์ไฟฟ้าหาได้จาก

$$dE = -Q \Delta V \quad \text{.....(2.13)}$$

และความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณความต่างศักย์ไฟฟ้า ΔV มีค่า

$$\epsilon_r = - \frac{d\Delta V}{dr} \quad \text{.....(2.14)}$$

จากสมการที่ 2.9, 2.13 และ 2.14 จะได้ความสัมพันธ์ของ

$$\frac{dE}{dr} = Q\epsilon_r = Q \frac{V_0}{r \ln(b/a)} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

ดังนั้นพลังงานที่ถูกใช้ไปสำหรับการเคลื่อนที่ของไอออนในสนามไฟฟ้าจะเท่ากับ

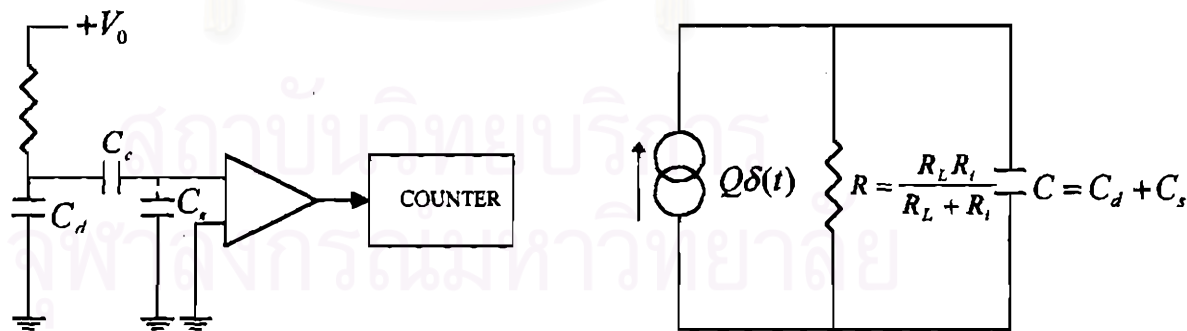
$$E^+(t) = \frac{QV_0}{\ln(b/a)} \int_a^{r(t)} \frac{dr}{r} = \frac{QV_0}{\ln(b/a)} \ln \frac{r(t)}{a} \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

จากสมการที่ 2.11 และความสัมพันธ์ของศักดาไฟฟ้าและประจุที่เกิดขึ้นจะได้

$$V_R(t) = \frac{E^+(t)}{CV_0}$$

หรือ
$$V_R(t) = \frac{Q}{2C \ln(b/a)} \ln \left(1 + \frac{b^2}{a^2} \frac{t}{t^+} \right) \quad \dots\dots\dots(2.17)$$

จากสมการที่ 2.17 สามารถหาขนาดสัญญาณที่เวลาใดๆและเมื่อเวลา t ผ่านไปถึง t^+ ขนาดของสัญญาณพัลส์จะเท่ากับ Q/C ดังนั้นการคำนวณสัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสีจึงสามารถแทนหัววัดรังสีด้วยแหล่งจ่ายกระแสที่ให้กระแสในรูปพัลส์ของดิเรกเดลตาฟังก์ชัน (Dirac Delta Function) $Q\delta(t)$ ไหลผ่านความจุ C และความต้านทาน R ต่อขนานดังในวงจรรูปที่ 2.8



ก. วงจรหัววัดรังสีแบบพัลส์

ข. วงจรสมมูลของหัววัดรังสี

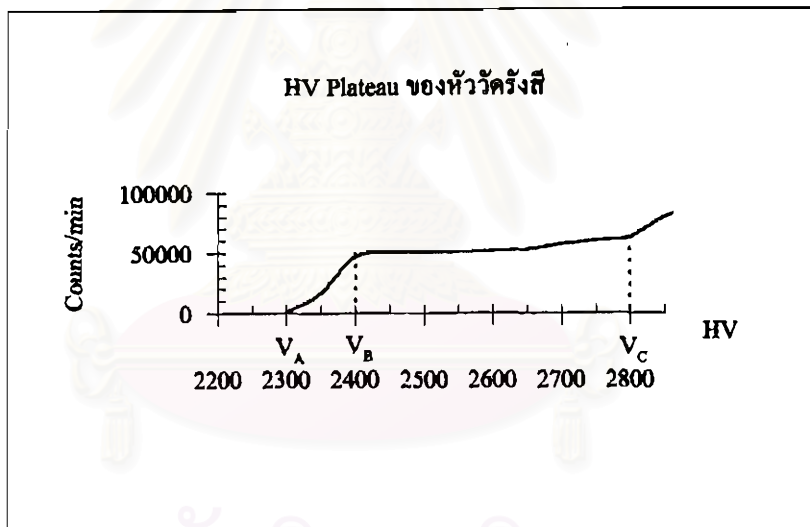
รูปที่ 2.8 วงจรสมมูลของหัววัดรังสีและระบบวัดรังสี

จากรูปที่ 2.8.ข. สักคาไฟฟ้าที่ปรากฏบนความจุ C ซึ่งขนานกับความต้านทานรวม R เขียนตามทฤษฎีวิเคราะห์วงจรไฟฟ้า จะให้สักคาไฟฟ้าของสัญญาณพัลส์ดังนี้

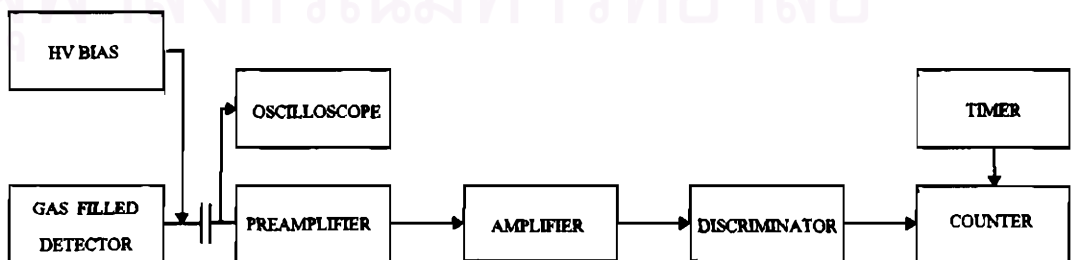
$$v(t) = \frac{Q}{C} e^{-t/RC} \quad \dots\dots\dots(2.18)$$

2.1.4 ความสัมพันธ์ของอัตรานับรังสีกับไบอัสของหัววัดรังสี

จากที่กล่าวมาแล้วว่าหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซจะกำเนิดสัญญาณพัลส์ได้นั้น ต้องจ่ายไฟฟ้าสักคาสูงให้กับแอโนดและแคโทด ซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 300-3000 V ขึ้นกับขบวนการทำงานของหัววัดรังสี การที่จะทราบค่าสักคาไฟฟ้าที่เหมาะสมกับการทำงานของหัววัดรังสีนั้นจะต้องหาความสัมพันธ์ระหว่างอัตรานับรังสีและค่าไฟฟ้าสักคาสูงซึ่งเป็นเส้นกราฟแสดงคุณลักษณะของหัววัดรังสี เรียกว่า “ HV plateau curve ” ดังในรูปที่ 2.9 โดยจัดระบบวัดรังสีแบบนับรวม ดังในรูปที่ 2.10 เพื่อนับปริมาณรังสีที่มีค่าคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 2.9 เส้นกราฟ HV Plateau ของหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ



รูปที่ 2.10 การจัดระบบวัดเพื่อหาเส้นกราฟคุณลักษณะของหัววัดรังสีบรรจุก๊าซ

คุณลักษณะของการทำงานจะเริ่มจากไบอัสที่ V_A เป็นจุดเริ่มทำงานของหัววัดรังสี (starting voltage) เมื่อเพิ่มศักดาไฟฟ้าสูงขึ้นจำนวนนับรังสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและ จะเริ่มค่อนข้างคงที่ระหว่างศักดาไฟฟ้า V_B ถึง V_C มีความชันเล็กน้อยเรียกว่า “ ช่วงพลาโต ” เมื่อเพิ่มศักดาไฟฟ้ามากกว่า V_C อีกเล็กน้อยจะเกิดการดิซชาร์จ ค่าศักดาไฟฟ้าที่ใช้กับหัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซ จะเริ่มใช้จาก 25% - 50% ของช่วงพลาโต และเส้นกราฟนี้จะบ่งบอกสมรรถนะของหัววัดรังสีจากความชันช่วงพลาโตในหน่วยเปอร์เซ็นต์ต่อ 100 V ดังสมการ [3]

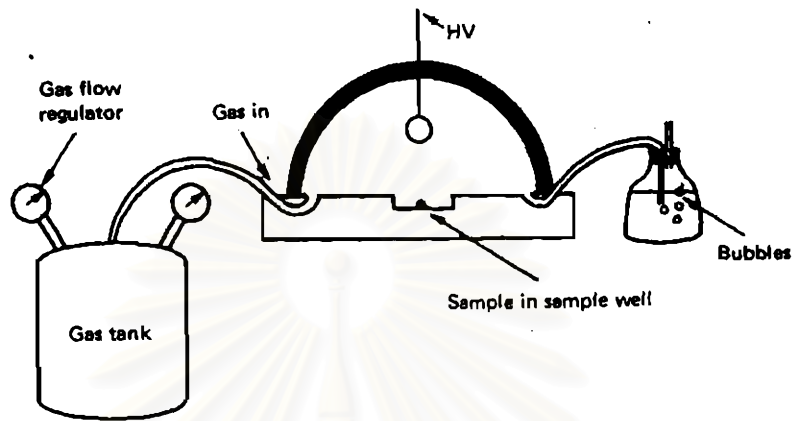
$$\% \text{ ความชันพลาโต} = \left(\frac{\Delta N \times 100}{\Delta V \times N} \right) (100) \dots\dots\dots(2.19)$$

เมื่อ $\Delta N/N =$ อัตราการเปลี่ยนแปลงของค่านับรังสีสัมพัทธ์
 $\Delta V =$ ค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างการเปลี่ยนแปลงอัตรานับ

2.1.5 หัววัดรังสีแบบก๊าซไหล (Gas-flow Counters)

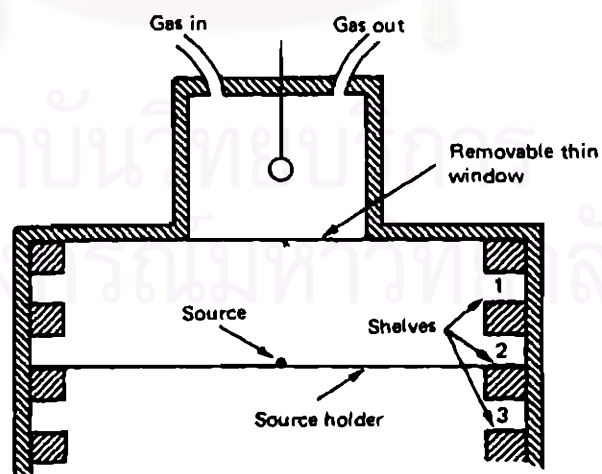
หัววัดรังสีชนิดบรรจุก๊าซทั่วไปจะมีโครงสร้างเป็นหัววัดบรรจุก๊าซแบบปิดสนิท เพื่อรักษาความดันก๊าซภายในหัววัดรังสีและจัดช่องหน้าต่างสำหรับรับรังสีไว้ การวัดรังสีนั้น แหล่งกำเนิดรังสีจะต้องวางอยู่ภายนอกหัววัดรังสี อนุภาคจากแหล่งกำเนิดรังสีดังกล่าวจะต้องทะลุผ่านหน้าต่างของหัววัดรังสีก่อนจะถูกนับ ซึ่งจะเห็นว่ามีการสูญเสียพลังงานบางส่วนของอนุภาคไปจากการดูดกลืนหรือกระเจิงกลับที่หน้าต่างของหัววัดรังสีโดยเฉพาะอนุภาคที่มีประจุ ในกรณีของอนุภาคอัลฟาและเบตาพลังงานต่ำ หน้าต่างจึงเป็นอุปสรรคต่อการวัด ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการพัฒนาหัววัดรังสีให้มีความสามารถที่จะวัดรังสีจากสารตัวอย่างที่วางไว้ภายในหัววัดได้ หัววัดรังสีแบบนี้จะจัดช่องทางเข้าทางออกของก๊าซไว้เรียกว่า “หัววัดรังสีแบบก๊าซไหล”

หัววัดรังสีแบบก๊าซไหลสามารถสร้างได้ในหลายรูปแบบที่ใช้งานมากที่สุดคือแบบครึ่งวงกลมดังในรูปที่ 2.11 โดยที่ความต่างศักย์จะจ่ายให้กับห่วงลวดที่ติดอยู่ด้านบนของครึ่งวงกลม ก๊าซจะไหลอย่างช้าๆผ่านหัววัด โดยที่อัตราการไหลของก๊าซถูกควบคุมโดยตัวควบคุม (regulator) ที่ด้านทางออกก๊าซจะไหลผ่านของเหลว เช่น น้ำมันหรือน้ำจะทำให้เกิดฟองอากาศ ซึ่งอัตราเกิดฟองอากาศนั้นจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการไหลของก๊าซ หัววัดรูปทรงครึ่งวงกลมนั้นวัดรังสีเพียงด้านเดียวจึงเรียกหัววัดรังสีแบบ 2π ในขณะที่หัววัดทรงกลมที่มีแหล่งกำเนิดรังสีวางอยู่ภายในที่กึ่งกลางและมีห่วงลวดแวนไดค 2 ด้านจะเรียกว่าหัววัดแบบ 4π รูปที่ 2.3



รูปที่ 2.11 หัววัดรังสีแบบก๊าซไหลชนิดครึ่งวงกลม 2π [3]

นอกจากนี้ยังมีการออกแบบหัววัดรังสีชนิดก๊าซไหลที่มีหน้าต่างปิดรูปทรงกระบอกหรือเหลี่ยมทั้งหน้าต่างข้าง (side window) และหน้าต่างหน้า (end window) สามารถเปลี่ยนหน้าต่างได้ตามความเหมาะสมของการวัดรังสีดังในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 หัววัดรังสีแบบก๊าซไหลชนิดหน้าต่างด้านหน้าที่สามารถเปลี่ยนหน้าต่างได้ [3]

หัววัดแบบก๊าซไหลอาจจะจัดให้ทำงานแบบพรอพอร์ชันแนลหรือแบบ GM ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ การไบอัสที่จ่ายให้แอนโอดและแคโทดรวมทั้งชนิดของก๊าซที่ใช้ กล่าวคือถ้าจะให้หัววัดทำงานแบบหัววัดพรอพอร์ชันแนลใช้ก๊าซมีเทนหรือก๊าซผสมระหว่างอาร์กอนและมีเทน ส่วนในบริเวณ GM ก๊าซที่ใช้จะเป็นผสมระหว่างอาร์กอนและไอโซบิวเทน [3]

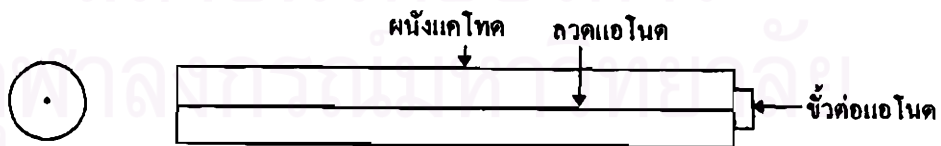
2.2 หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่ง (Position-Sensitive Proportional Counter)

2.2.1 โครงสร้างของหัววัดรังสี

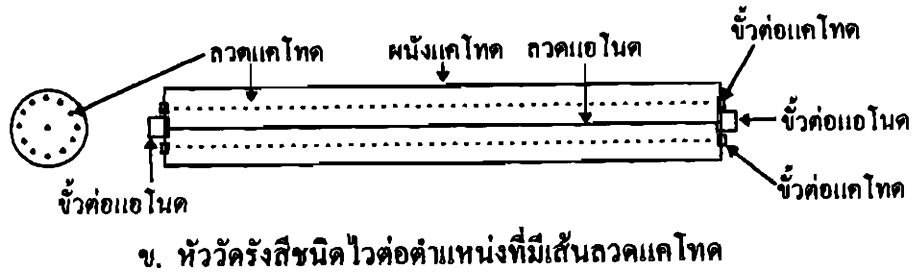
หัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลแบบก๊าซไหลผ่านชนิดไวต่อตำแหน่ง มีโครงสร้างคล้ายกับหัววัดพรอพอร์ชันแนลก๊าซไหลรูปทรงกระบอกหรือทรงกลมหรือทรงกระบอกเหลี่ยมแบบหน้าต่างด้านข้างทั่วไป ต่างกันที่เส้นลวดแอนโอดจะมีความต้านทานต่อระยะทางสูงมากตั้งแต่ $8 \text{ k}\Omega/\text{mm}$ ขึ้นไป ทำด้วยเส้นไฟเบอร์ควอตซ์เคลือบด้วยไพโรไลติกคาร์บอน (pyrolytic carbon) และมีขั้วสัญญาณทางออกที่ปลายสองด้านเพื่อวัดความแตกต่างของสัญญาณจากตำแหน่งของการไอออไนซ์ของรังสีบนความยาวของเส้นลวดแอนโอด ดังภาพเปรียบเทียบในรูปที่ 2.13 ก. และ ข. การทำงานของหัววัดรังสีในการบ่งบอกตำแหน่งของรังสีที่ตกกระทบบนตำแหน่งของเส้นลวดแอนโอดอาศัยกระบวนการหลัก 2 ชนิดคือ

ก. การวัดสัดส่วนประจุ (Charge division method) พิจารณาจากความแตกต่างของปริมาณประจุ Q_L และ Q_R ที่ระยะต่างกันดังแผนภาพในรูปที่ 2.14 ก.

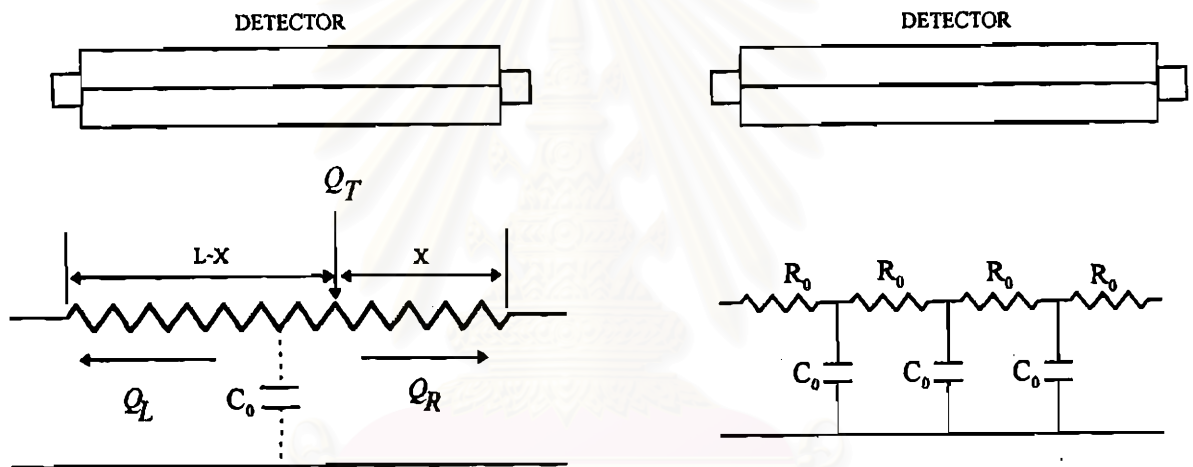
ข. การวัดไรส์ไทม์ (Rise time method) หรือวัดเวลาขาขึ้นพิจารณาจากสมมูลของวงจรไฟฟ้าที่เสมือนมีการเคลื่อนที่ของประจุบนสายส่งสัญญาณ ดังแผนภาพในรูปที่ 2.14 ข.



ก. หัววัดรังสีชนิดพรอพอร์ชันแนลแบบธรรมดา



รูปที่ 2.13 เปรียบเทียบโครงสร้างของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนล



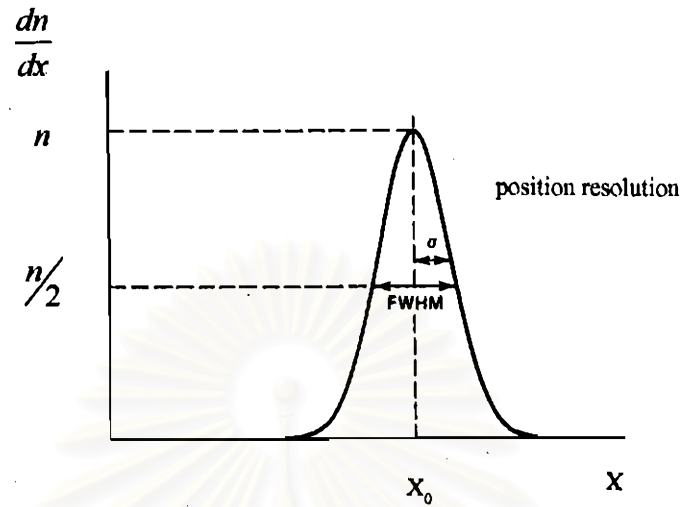
ก. สมมุติของวงจรไฟฟ้าสำหรับวัดสัดส่วนประจุ

ข. การวัดโรตีโอม

รูปที่ 2.14 สมมุติทางวงจรไฟฟ้าของหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง

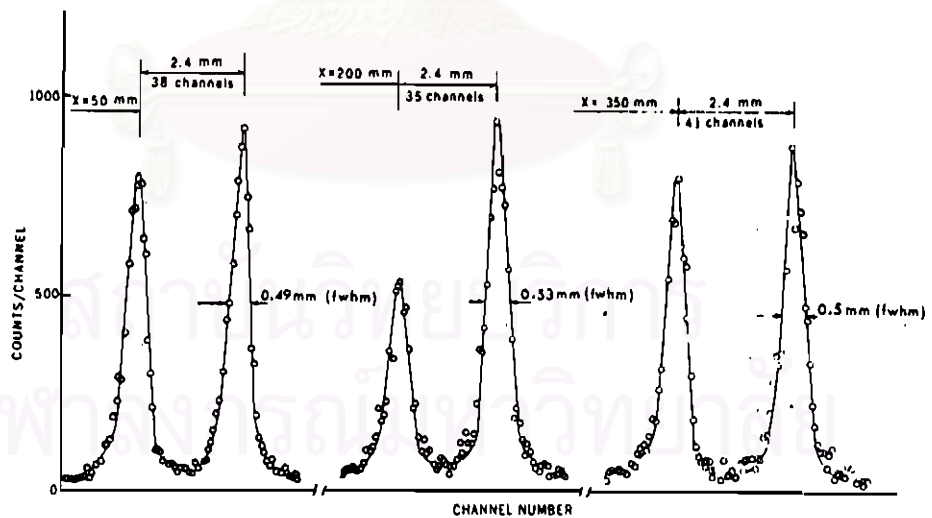
2.2.2 ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง

การบ่งบอกความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง (position resolution) โดยทั่วไปจะใช้หลักการเดียวกับการบ่งบอกความสามารถในการแจกแจงพลังงานของหัววัดรังสี โดยแปลงช่องวิเคราะห์บนอุปกรณ์วิเคราะห์พลังงานเป็นตำแหน่งที่สอดคล้องกับตำแหน่งวัดรังสีและอ่านค่า FWHM (Full Width at Half Maximum) ณ ตำแหน่งของรังสีที่ตกกระทบบนเส้นกวดแคโทดดังแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 นิยามการวัดความสามารถในการแจกแจงตำแหน่ง

ในรูปที่ 2.16 แสดงการวัดพิกัดตำแหน่งที่ระยะต่าง ๆ และใช้ความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งบ่งชี้ความไม่แน่นอนของระยะห่างระหว่างพิกัดตำแหน่งที่ระยะต่างๆ (spatial uncertainty) หรือ spatial resolution



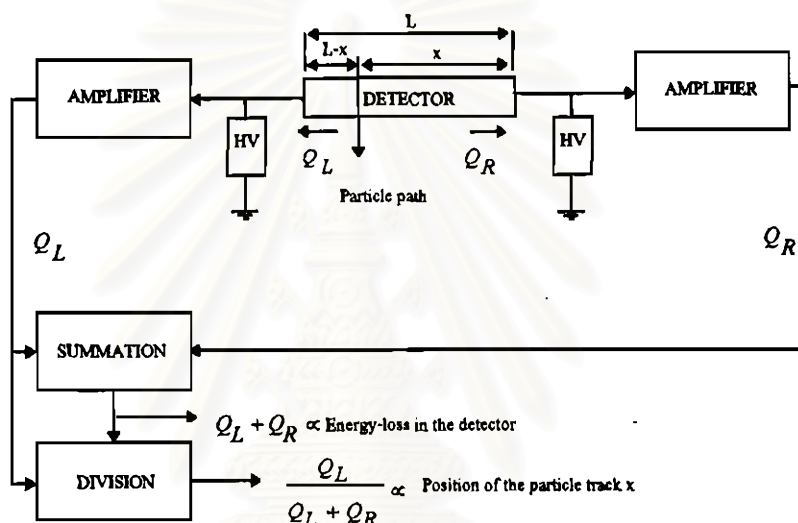
รูปที่ 2.16 แสดงความสามารถในการแจกแจงตำแหน่งของหัววัด [4]

2.3 ระบบวัดรังสีสำหรับการวัดตำแหน่งรังสี

ระบบวัดรังสีสำหรับวัดตำแหน่งรังสีสามารถจัดอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์นิวเคลียร์ได้ 2 ระบบ คือระบบวัดรังสีที่ใช้กับวิธีวัดสัดส่วนประจุ และระบบวัดรังสีที่ใช้กับวิธีโรสโทม

2.3.1 ระบบวัดรังสีแบบวัดสัดส่วนประจุ

2.3.1.1 หลักการวัดสัดส่วนประจุ



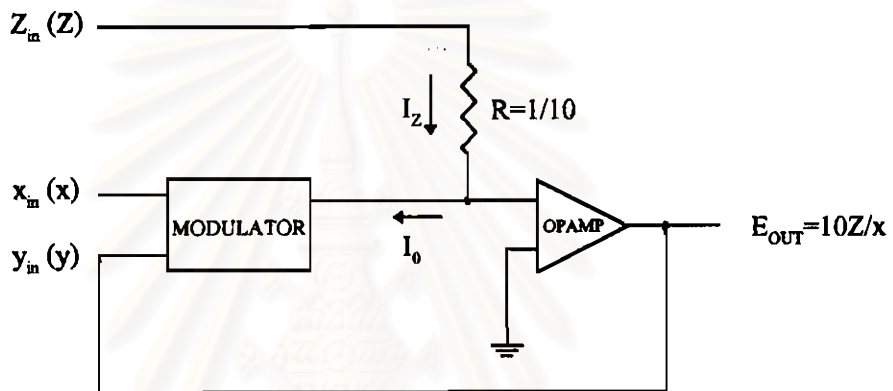
รูปที่ 2.17 หลักการแจกแจงตำแหน่งโดยวิธีวัดสัดส่วนประจุ

จากแผนภาพในรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าปริมาณประจุที่เกิดจากการถ่ายโอนพลังงาน ณ ตำแหน่ง x เสมือนจุดเริ่มต้นแหล่งกำเนิดสัญญาณและจะกระจายบนเส้นลวดแอนโนด โดยที่ Q_R (ประจุทางด้านขวามือ) เป็นปริมาณประจุบนระยะทางของเส้นลวดแอนโนดเท่ากับ x และ Q_L (ประจุทางด้านซ้ายมือ) ปริมาณประจุบนระยะทางเท่ากับ $L - x$ ผลรวมประจุ $Q_L + Q_R$ จะเป็นประจุทั้งหมดที่เกิดขึ้นบนความยาวของเส้นลวดทั้งหมดเท่ากับระยะ L ซึ่งหมายถึงปริมาณของพลังงานที่สูญเสียในหัววัดรังสี และเมื่อทำการหารสัดส่วนของ Q_L ต่อปริมาณประจุที่เกิดขึ้นตลอดความยาวเส้นลวดแอนโนดจะได้ $\frac{Q_L}{Q_L + Q_R}$ สัดส่วนของตำแหน่งของอนุภาคที่รังสีตกกระทบบนเส้นลวดแอนโนดของหัววัดรังสีจะเป็นไปตามสมการ [1]

$$\frac{X}{L} = \frac{Q_L}{Q_L + Q_R} \dots\dots\dots(2.20)$$

2.3.1.2 วงจรหารอนาลอก

วงจรที่สำคัญของการวัดตำแหน่งรังสีด้วยวิธีวัดสัดส่วนประจุคือ วงจรหารสัญญาณอนาลอก (analog division circuit) ซึ่งประกอบด้วย การทำงานของวงจรหลัก 2 ส่วนคือ วงจรผสมสัญญาณ (modulation) และวงจรรวมสัญญาณด้วยออปแอมป์ ดังแผนภาพที่ 2.18



รูปที่ 2.18 แผนภาพของวงจรหารอนาลอก

การทำงานของวงจรหารแบบอิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 2.18 เมื่อ Z และ x คือขนาดสัญญาณศักดาไฟฟ้าป้อนให้กับวงจร กระแสของวงจรผสมสัญญาณ I_o จะมีค่าเป็นผลคูณของ x และ y ดังนี้

$$I_o = x \cdot y \dots\dots\dots(2.21.ก)$$

จากคุณสมบัติของออปแอมป์ $I_o = I_z$

โดยที่ $I_z = \frac{Z}{R} = 10Z$

เอาต์พุตของออปแอมป์คืออินพุต (y) ของวงจรผสมสัญญาณ (modulator)

$$E_{out} = y$$

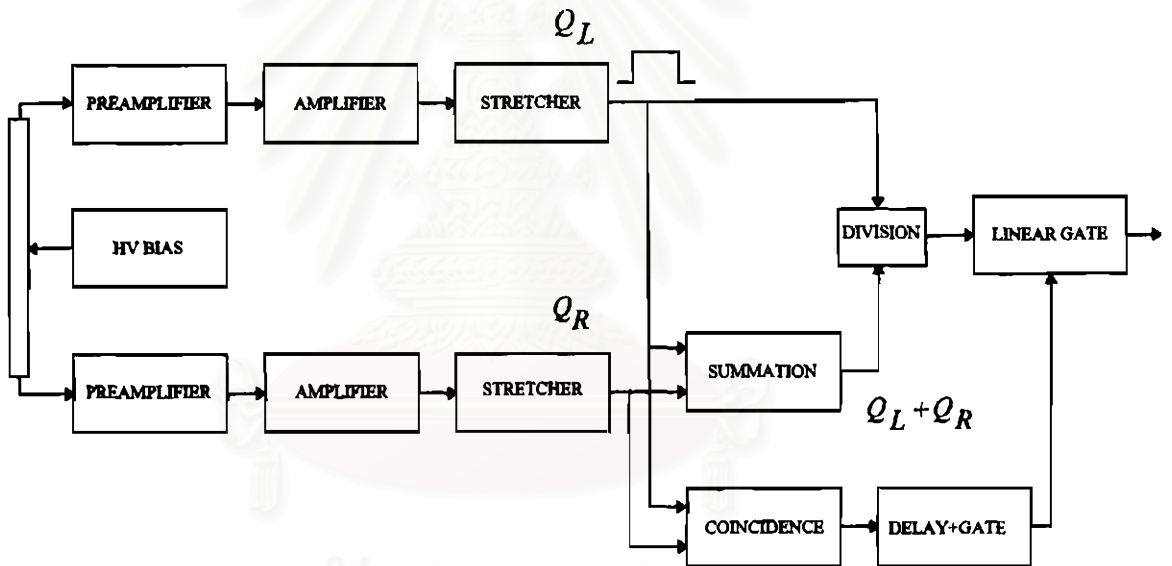
จากสมการที่ 2.21.ก. แทนค่า I_0 ด้วย I_z ตามสมการที่ 2.21.ข. และแทนค่า y ด้วย E_{out} จะได้

$$10Z = xE_{out}$$

$$E_{out} = \frac{10Z}{x} \quad \dots\dots\dots(2.21.จ)$$

นั่นคือสัญญาณทางออกจะเท่ากับสัญญาณ Z/x มีอัตราขยาย 10 เท่า

2.3.1.3 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบวิธีวัดสัดส่วนประจุ



รูปที่ 2.19 ระบบวัดตำแหน่งรังสีชนิดวัดสัดส่วนประจุ [5]

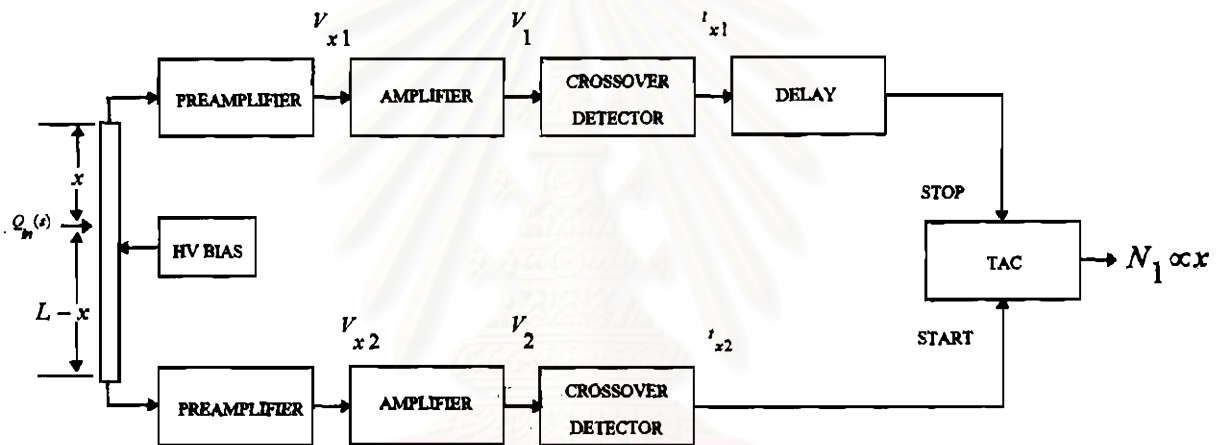
ระบบวัดนี้จะประกอบด้วยหัววัดรังสีชนิดไวต่อตำแหน่ง แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงทำหน้าที่ไบอัสหัววัดรังสี อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ 2 ชุด ทำหน้าที่ขยายสัญญาณพัลส์และปรับคุณภาพของสัญญาณ สัญญาณพัลส์จากอุปกรณ์ขยายสัญญาณทั้ง 2 ชุด จะถูกส่งให้กับอุปกรณ์ยืดเวลา (Stretcher) ทั้ง 2 ชุด เพื่อทำหน้าที่ยืดขอบพัลส์ไว้ชั่วขณะ จากนั้นสัญญาณที่ออกจากอุปกรณ์ Stretcher จะถูกส่งเข้าอุปกรณ์รวมสัญญาณพัลส์ (summing) ทำให้ได้สัญญาณเท่ากับผลรวมของสัญญาณ $Q_R + Q_L$ สัญญาณ $Q_R + Q_L$ จากอุปกรณ์รวมสัญญาณจะถูกส่งไปยังอุปกรณ์หารเพื่อหาสัดส่วนสัญญาณกับ Q_L และสัญญาณจากอุปกรณ์หารจะถูกส่งต่อไปยังอุปกรณ์ตีเนียร์เกดซึ่งทำ

หน้าที่เลือกสัญญาณพัลส์ตำแหน่งด้วยการควบคุมของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่จะเปิดสัญญาณพัลส์เฉพาะตำแหน่งออกทางเอาต์พุตโดยการคัดเลือกของอุปกรณ์โคอินซิเดนซ์ และเกตหน่วงเวลา (delay gate) เมื่อสัญญาณ Q_L และ Q_R เกิดขึ้นจากรังสีตกกระทบ ณ เวลานั้น ชุดทำสัญญาณที่คัดเลือกผ่านอิเล็กทรอนิกส์จะได้รับการวิเคราะห์ตำแหน่งด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA)

2.3.2 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทรม์

การจัดระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทรม์สามารถกระทำได้ 2 รูปแบบคือ การวัดสัญญาณจากหัววัดรังสีทั้ง 2 ทางและการวัดสัญญาณจากหัววัดรังสีเพียงทางเดียว

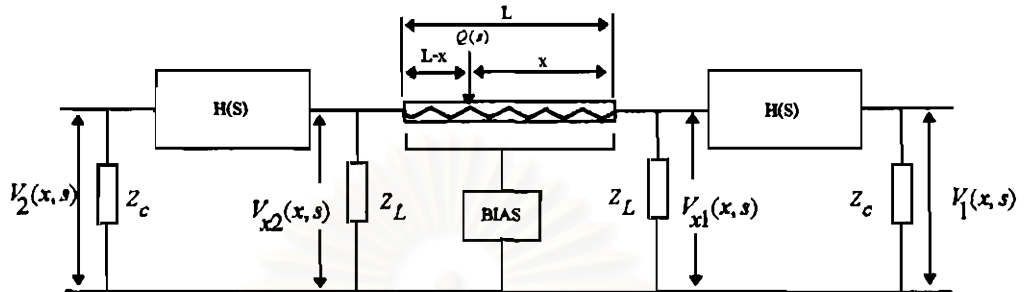
2.3.2.1 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทรม์ชนิดวัดสัญญาณ 2 ทาง



รูป 2.20 แผนภาพระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทรม์ ชนิดวัดสัญญาณ 2 ทาง [5]

ระบบวัดนี้จะประกอบด้วย หัววัดแบบไวต่อตำแหน่ง (Position-Sensitive Detector) แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูง (HV bias) ทำหน้าที่ไบอัสหัววัดรังสี อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ 2 ชุดทำหน้าที่ขยายสัญญาณพัลส์และปรับคุณภาพสัญญาณ สัญญาณพัลส์ที่มีเวลาในการเคลื่อนที่บนเส้นลวดแอนโนดต่างเวลากัน หลังการวัดรังสีแต่ละครั้งจะนำมาผ่านวงจร timing trigger เพื่อให้กำเนิดสัญญาณ ณ ตำแหน่งเวลาที่แน่นอน ส่งไปยังอุปกรณ์แปลงผันเวลาเป็นความสูงของพัลส์ (Time to Amplitude Converter; TAC) โดยสัญญาณเวลา t_{x2} เป็นตัวเริ่มต้นการแปลงผันเวลา สัญญาณ t_{x1} จะผ่านอุปกรณ์ดีเลย์กลายเป็น $t_{x1} + t_d$ เป็นตัวหยุดการแปลงผันเวลาได้ค่าความสูงของพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับคาบเวลาซึ่งขึ้นอยู่กับตำแหน่งของรังสีที่ตกกระทบหัววัดรังสี

ส่งให้อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (Multichannel Analyzer ; MCA) ทำการวิเคราะห์ความสูงของพัลส์ซึ่งเป็นสัดส่วนกับเวลาและแสดงผลต่อไป



รูปที่ 2.21 แสดงหลักการแจกแจงตำแหน่งโดยวิธีการวัดสัญญาณ 2 ด้าน

จากรูปที่ 2.14.ข. เป็นวงจรสมมูลของหัววัดครึ่งแบบไวต่อตำแหน่ง R_0 คือ ค่าความต้านทานที่ใช้ในการรวบรวมประจุต่อหน่วยความยาว C_0 คือค่าความจุของแคโทดต่อหน่วยความยาว เมื่อจัดวงจรในรูปที่ 2.21 ที่หัววัดครึ่งจะมีค่าคงที่เวลา RC กระดาษถอดความยาว L และ Z_c คือค่าของโหลดอิมพีแดนซ์ (load impedance) ต่ออยู่ที่ปลายของหัววัดทั้ง 2 ด้าน จากวงจรดังกล่าวสามารถหาความสัมพันธ์ของตัวแปรในวงจรได้ดังในภาคผนวก ก. ซึ่งจะทำให้ค่า $V_{x1}(s, x)$ และ $V_{x2}(s, x)$ เป็นไปตามสมการ [5]

$$V_{x1}(s, x) = Q(s)Z_c \frac{\cosh n(L-x) + Z_0 Y_c \sinh n(L-x)}{(Y_c Z_0 + Y_0 Z_c) \sinh nL + 2 \cosh nL} \dots\dots\dots(2.22)$$

$$V_{x2}(s, x) = Q(s)Z_c \frac{\cosh nx + Z_0 Y_c \sinh nx}{(Y_c Z_0 + Y_0 Z_c) \sinh nL + 2 \cosh nL} \dots\dots\dots(2.23)$$

$$n = (R_0 s C_c)^{\frac{1}{2}} \quad Z_c = \frac{1}{Y_c} \quad Z_0 = \frac{1}{Y_0} = \left[\left(\frac{R_0}{s C_0} \right) \right]^{\frac{1}{2}}$$

$Q(s)$ = ประจุที่ตกกระทบบนหัววัด
 x = ตำแหน่งที่ประจุตกกระทบบนหัววัด

จากรูปที่ 2.20 ค่าของ t_{x1} และ t_{x2} คือค่าความแตกต่างของเวลาที่ผ่านมาจากอุปกรณ์ตรวจจับ ซีโร-ครอสซิง (zero crossing detector) เป็นไปตามสมการดังนี้

$$t_{x1} \cong k - \frac{1}{2} R_0 C_0 (L - x)^2 - C_c R_0 (L - x) + t_0 \quad \dots\dots\dots(2.24)$$

$$t_{x2} \cong k - \frac{1}{2} R_0 C_0 x^2 - C_c R_0 x + t_0 \quad \dots\dots\dots(2.25)$$

k = ค่าคงที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณและความยาวของหัววัด

รังสี

t_0 = เวลารวบรวมประจุในหัววัด

ค่าความแตกต่างของเวลา (Δt_x) ระหว่าง t_{x1} หลังจากผ่านดีเลย์ (t_d)

และ t_{x2} หาได้จาก

$$\Delta t_x = t_{x1} - t_{x2} \cong Sx - A + t_d \quad \dots\dots\dots(2.26)$$

เมื่อ

$$S = R_0 (C_0 L + 2C_c)$$

$$A = \frac{1}{2} R_0 C_0 L^2 + R_0 C_c L$$

จากสมการที่ 2.26 ถ้า $t_d = A$ จะได้

$$\Delta t_x \cong Sx$$

C_c = ความจุของโหลด

C_0 = ความจุที่กระจายบนหัววัด

L = ความยาวของหัววัดรังสี

R_0 = ความต้านทานของแอมโอมิเตอร์

S = ความไวในการแจกแจงตำแหน่ง

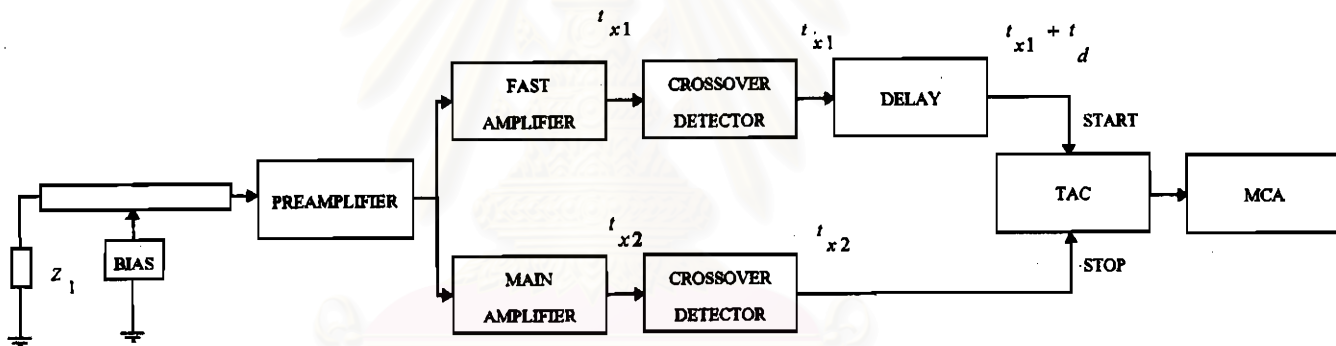
ค่าผลต่างระหว่างเวลา t_{x1} กับ t_{x2} จะถูกส่งไปยังอุปกรณ์แปลงผันเวลา เป็นความสูงของพัลส์โดย t_{x2} เป็นตัวเริ่มต้นการแปลงผันเวลาและ $t_{x1} + t_d$ เป็นตัวหยุดการแปลงผันเวลาได้ค่าความสูงของพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับคาบเวลาส่งให้อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง ค่าแขนแนกแอสเครตของ MCA จะเป็นไปตามสมการ

$$N_x = G\Delta t_x = GSx \quad \dots\dots\dots(2.27)$$

เมื่อ G คือค่าอัตราขยายของอุปกรณ์แปลงผันเวลา (TAC)

S คือความไวในการแจกแจงตำแหน่ง (spatial sensitivity)

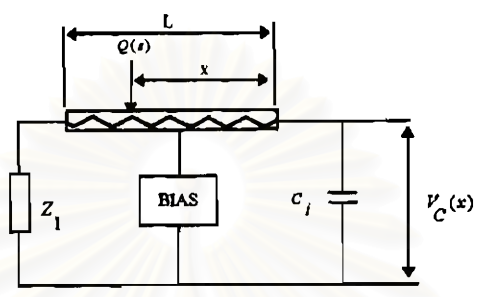
2.3.2.2 ระบบวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทมชนิดวัดสัญญาณทางเดียว



รูปที่ 2.22 แผนภาพสำหรับวัดตำแหน่งรังสีแบบโรสโทมชนิดวัดสัญญาณทางเดียว [6]

ระบบวัดนี้ประกอบด้วย หัววัดรังสีไวต่อตำแหน่งที่จัดให้มีทางออกสัญญาณด้านเดียวปลายอีกด้านหนึ่งโหลดด้วย Z_1 แหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสำหรับไบอัสหัววัดรังสี วงจรขยายส่วนหน้าชนิดมีวงจรกรองสัญญาณ (amplifier filter) วงจรขยายสัญญาณพัลส์ 2 ชุด และวงจรตรวจตำแหน่งเวลา (timing circuit) ดังในรูปที่ 2.22 สัญญาณพัลส์จากวงจรขยายส่วนหน้าด้านบนจะรับการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายสัญญาณแบบความไวสูง (fast amplifier) และสัญญาณด้านล่างจะรับการขยายสัญญาณด้วยวงจรขยายสัญญาณพัลส์แบบธรรมดา และเพื่อให้กำเนิดสัญญาณลอจิกที่ตำแหน่งถูกต้อง สัญญาณพัลส์จากวงจรขยายทั้ง 2 จะผ่านวงจรตรวจตำแหน่งเวลาทำให้ได้สัญญาณ t_{x1} และ t_{x2} ตามลำดับ สัญญาณ t_{x1} จะผ่านวงจรหน่วงเวลาได้สัญญาณเป็น $t_{x1} + t_d$ เป็นสัญญาณเริ่มต้นการแปลงผันเวลาของอุปกรณ์แปลงผันเวลาเป็นความ

สูงของพัลส์ ส่วนสัญญาณ t_{x2} เป็นสัญญาณหยุดการแปลงผันเวลา ซึ่งจะทำได้สัญญาณทางออกของอุปกรณ์แปลงผันเวลา มีขนาดความสูงของพัลส์เป็นสัดส่วนกับตำแหน่งที่รังสีตกกระทบบนเส้นลวดแอโนด นำไปวิเคราะห์แพทเทอร์นตำแหน่งด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์ความสูงแบบหลายช่อง



รูปที่ 2.23 แสดงหลักการแจกแจงตำแหน่งโดยวิธีการวัดเวลาขาขึ้นชนิดสัญญาณทางเดียว

จากรูปที่ 2.23 แสดงวงจรสมมูลทางไฟฟ้าของหัววัดแบบไวต่อตำแหน่ง R_0 คือค่าความต้านทานที่ใช้ในการรวบรวมประจุต่อหน่วยความยาว C_0 คือค่าความจุของหัววัดต่อหน่วยความยาว ปลายด้านหนึ่งต่ออยู่กับวงจรขยายส่วนหน้า (preamplifier) โดยมีความจุของอินพุต $C_i \gg C_0$ ปลายอีกด้านหนึ่งต่ออยู่กับ Z_1 มีค่าประมาณเท่ากับ Z_0 ซึ่งเท่ากับอิมพีแดนซ์ของหัววัดรังสีในรูปของสายส่งไฟฟ้า (characteristic impedance of the detector)

ค่าความไวต่อตำแหน่ง คืออัตราส่วนของผลต่างของเวลาต่อผลต่างของระยะทาง [6]

$$S = \frac{\Delta t_x}{\Delta x} \cong k(R_0 C_0 T)^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots(2.28)$$

t_0 คือค่าคงที่ของวงจรอาร์ซีดีฟเฟอเรนชิเอเตอร์ (RC differentiator)

k คือค่าคงที่ซึ่งแปรผันตามคุณลักษณะของตัวกรองสัญญาณ

และ

$$\Delta t_x = t_{x2} - (t_{x1} - t_d)$$

เมื่อ t_d คือค่าเวลาหน่วง

t_{x2} คือครอสโอเวอร์ไทม์ของพัลส์ที่ได้จากวงจรขยายหลัก (main amplifier)

t_{x1} คือครอสโอเวอร์ไทม์ของพัลส์ที่ได้จากวงจรขยายความเร็วสูง (fast amplifier)

ค่าความสูงของพัลส์ที่เป็นสัดส่วนกับคาบเวลาของอุปกรณ์แปลงผันเวลา
เป็นความสูงของพัลส์ที่ส่งไปยังอุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่องจะมีฟังก์ชันตามสมการ

$$N_x = Tt_x \quad \dots\dots\dots(2.19)$$

เมื่อ T = ค่า transfer ฟังก์ชันของ TAC (channel per second)

ตารางที่ 2.2 แสดงสมรรถนะของหัววัดรังสีพรอพอร์ชันแนลชนิดไวต่อตำแหน่งต้นแบบ
จากงานวิจัยของ Oak Ridge National Laboratory (1968) [6] ซึ่งใช้วิธีการวัดตำแหน่งแบบวัดเวลา
ขาขึ้นของพัลส์หรือ ไรส์ไทม์ (rise time measurement)

ตารางที่ 2.2 Prototype position-sensitive detectors

	Detector nos.					
	1	2	3	4	5	6
Radiation or particle type ^a	x rays	x rays	neutrons	neutrons	alpha	alpha
Gas filling	Kr-CH ₄	Kr-CH ₄	BF ₃	BF ₃	Ar-CH ₄	Ar-CH ₄
Gas pressure (cm Hg)	152	152	76	152	flow	flow
Sensitive length (mm)	400	400	400	400	250	40
Collector resistance (k Ω /mm)	40	40	8	8	8	400
Collector capacitance (F/mm $\times 10^{-10}$)	8.5	8.5	8.5	8.5	8.5	32
Detector geometry	b	b	b	b	b	c
RC differentiator time constants						
Main amplifier (μ sec)	6.4	6.4	12.8	12.8	6.4	6.4
Fast amplifier (μ sec)	d	1	2	2	2	d
Experimental results						
Position sensitivity (nsec/mm)	34	18	25	25	18	310
Spatial uncertainty ^e [mm (FWHM)]	0.5	1.15	10.5	6.2	0.66	1.25

^a Detectors 1 to 5 are proportional counters and no. 6 is a pulse ion chamber.

^b Cylinder.

^c Parallel plates at 40 mm distance.

^d The pick-up electrode was used in the fast amplifier channel.

^e At the center position. (The collimator diameters were: 0.1 mm for the x-ray source, 0.3 mm for the alpha source, and 1.5 mm for the thermal neutron beam.)

¹⁰ General Electric Co., Valley Forge, Pa.

¹¹ T. V. Blalock, private communication.