หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เครื่องมือและทฤษฎีเบื้องต้นของรังสีแกมมาและระบบนับวัด

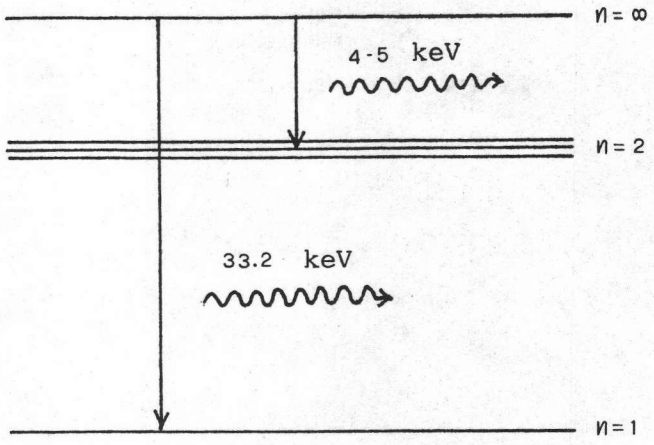
2.1 บทนำ

ในระยะแรกการวัดรังสีทำได้โดยใช้ระบบนับวัดที่มีหัวนับวัดชนิดหลอดบรรจุก๊าซ เช่น หัวนับวัดชนิดพรอบพอชันนอลและชนิดไกเกอร์มูลเลอร์เป็นต้น หัวนับวัดเหล่านี้จะมีประสิทธิภาพต่ำในการเปลี่ยนพลังงานรังสีเป็นสัญญาณไฟฟ้าเมื่อนำไปวัดรังสีที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูงเช่น รังสีแกมมาเป็นต้น เนื่องจากก๊าซที่บรรจุภายในหัวนับวัดมีความหนาแน่นน้อยทำให้การดูดกลืนพลังงานรังสีแกมมาขณะผ่านหัวนับวัดลดลง [9,16,27,36] และไม่สามารถวัดพลังงานของรังสีได้

ต่อมามีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการนับวัดรังสีแกมมาให้สูงขึ้น โดยใช้หัวนับวัดชนิดของแข็ง หัวนับวัดที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดได้แก่สารเรืองแสง (fluors) หัวนับวัดชนิดนี้เรียกว่า หัวนับวัดซินทิลเลชันซึ่งมีความสำคัญต่อการนับวัดรังสีแกมมาในปัจจุบัน การเผยแพร่การพัฒนาเครื่องนับวัดซินทิลเลชันเริ่มเป็นครั้งแรกโดย Hine[7]

เมื่อรังสีชนผลึกจะเกิดมีแสงสว่างปรากฏขึ้นในผลึกจัดว่าเป็นขบวนการซินทิลเลชันดังรูปที่ 2.1 แสงสว่างที่เกิดขึ้นจะมีความถี่อยู่ในช่วงที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า การเรืองแสงออกมาจะเกิดในช่วงเวลาสั้นประมาณ 10^{-8} วินาที หรือขณะที่อะตอมในผลึกยังอยู่ในสภาวะโลด (excited state) เรียกขบวนการนี้ว่าฟลูออเรสเซนซ์ (fluoresence) ถ้าการปล่อยแสงออกมาในช่วงเวลานาน ๆ เป็นเศษส่วนของวินาทีจนกระทั่งนานหลาย ๆ ชั่วโมง เรียกขบวนการนี้ว่า ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence)[8]

ขบวนการฟลูออเรสเซนซ์ให้แสงสว่างที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและอุลตราไวโอเล็ต ซึ่งค้นพบครั้งแรกโดยรัธเธอร์ฟอร์ด[29,30] เกิดจากการกระตุ้นและการแตกตัวเป็นประจุอิสระของอิเล็กตรอนในอะตอมของสารซินทิลเลชัน หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์และระบบอิเลคทรอนิคของระบบนับวัดจะแปลงแสงสว่างนี้เป็นสัญญาณนับวัดต่อไป



รูปที่ 2.1 แสดงระดับพลังงานของอะตอมไอโอดีนซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของผลึกซินทิลเลชันโซเดียมไอโอไดด์ เมื่อรังสีแกมมาทำให้อิเล็คตรอนของอะตอมหลุด อิเล็กตรอนจากวงนอกจะเข้ามาแทนวงในโดยปล่อยพลังงานออกมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า พลังงานที่ปล่อยออกมาจะทำให้มีการเรืองแสงขึ้นในผลึกซินทิลเลชัน

สารซินทิลเลชันมีหลายชนิด แต่ละชนิดเหมาะสำหรับวัดรังสีและอนุภาคต่าง ๆ กัน และสามารถวัดพลังงานแตกต่างกันไป แบ่งสารซินทิลเลชันเป็น 2 ประเภท คือ

ก. สารซินทิลเลชันประเภทอนินทรีย์สาร ซึ่งเป็นผลึกของแข็งหรือเป็นผงเช่น ZnS(Ag), NaI(Tl), CsI(Tl), CdS(Ag) เป็นต้น

ข. สารซินทิลเลชันประเภทอินทรีย์สาร มีทั้งชนิดของแข็งและของเหลวใช้วัดรังสีเบตาและแอลฟาเช่น พี-เทอร์เฟ็นนีล (p-terphenyl), แอนทราซีน, POPOP, PPO และทรานสทิลบีน เป็นต้น ซึ่งให้แสงในช่วงใกล้อุลตราไวโอเล็ต

โดยทั่วไปปริมาณโฟตอนของแสงที่ปล่อยออกมาจากผลึกเรืองแสงทุกชนิดจะเป็นฟังก์ชันกับเวลาในรูปแบบของเอกซ์โพเนนเชียลง่าย ๆ[7] ช่วงเวลาที่ปล่อยโฟตอนแสงคือ 67% ของช่วงเวลาทั้งหมดที่เกิดการเรืองแสงหลังจากผลึกดูดกลืนรังสีเรียกว่าเวลาการสลายตัว (decay time) เช่น เวลาการสลายตัว ของผลึกโซเดียมไอโอไดด์มีค่า 2.5×10^{-7} วินาที โดยเวลาทั้งหมดที่แสงจากผลึกโซเดียมไอโอไดด์นี้จะสลายหมดใช้เวลา 1.5×10^{-6} วินาที ซึ่งทำให้ผลึกชนิดนี้เกิดซินทิลเลชันได้นานกว่าสารชนิดอื่น ๆ เป็นต้น

เวลาการสลายตัวของโฟตอนในหัวนับวัดมีค่าต่างกันในผลึกของแข็งดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติมูลฐานของสารซินทิลเลชันที่เป็นของแข็งและของเหลว[2]

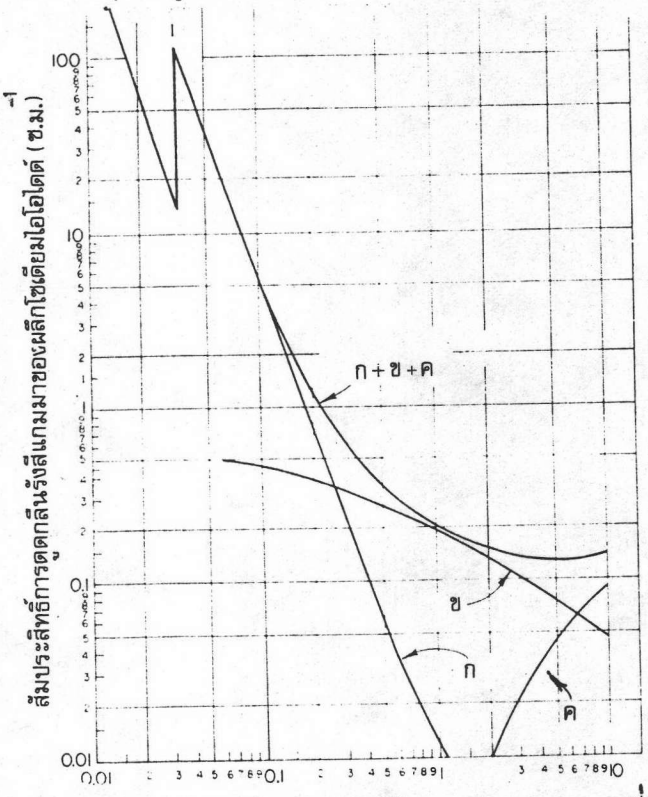
สารซินทิลเลชัน	ความหนาแน่น (กรัม/ลบ.ซม.)	ความยาวคลื่นสูงสุด (นาโนเมตร)	เวลาการสลายตัว t (วินาที)
โซเดียมไอโอไดด์ (NaI)	3.67	410	2.5×10^{-7}
ทรานสทิลบีน (transtilbene)	1.15	410	3×10^{-9}
ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS)	4.10	450	1×10^{-5}
พี-เทอร์เฟ็นนิล (P-terphenyl)	1.1	380	5×10^{-9}
แอนทราซีน (anthracene)	1.24	440	2.7×10^{-9}

จากตารางที่ 2.1 พบว่าผลึกโซเดียมไอโอไดด์มีความหนาแน่นสูงคือ 3.67 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ไอโอดีนมีเลขอะตอมสูง (z =53) ซึ่งสามารถหยุดยั้งรังสีแกมมาได้ดี ความยาวคลื่นแสงเกิดจากผลึกอยู่ในช่วงการตอบสนองของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์คือไม่เกิน 4,400 อังสตรอม เวลาการสลายตัวนานกว่าสารซินทิลเลชันชนิดอื่น ๆ ทำให้แสงสว่างที่เกิดขึ้นนานพอที่โฟตอนของแสงสามารถสะท้อนลงบนผิวโฟโตแคโธดได้เป็นจำนวนมากกว่าสารซินทิล-เลชันชนิดอื่น อีกทั้งผลึกโซเดียมไอโอไดด์มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสีแกมมาพลังงานต่ำและพลังงานปานกลางได้ดี

ในระบบนับวัดซินทิลเลชันมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ผลึกหัวนับวัด หลอดโฟโตมัลติพลาย เออร์ เครื่องขยายสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณและภาคแสดง

2.2 อันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อผลึกโซเดียมไอโอไดด์

เมื่อโฟตอนพลังงานต่ำ ๆ ชนกับผลึกโซเดียมไอโอไดด์จะเกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริคเป็นส่วนใหญ่ เมื่อพลังงานสูงขึ้นจะเกิดอันตรกิริยาแบบคอมพ์ตัน ถ้าโฟตอนมีพลังงานมากกว่า 1.02 MeV จะเกิดอันตรกิริยาแบบอิเล็กตรอนคู่ขึ้นในผลึก ผลของอันตรกิริยาเหล่านี้เมื่อนำมาเขียนกราฟระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานของผลึกโซเดียมไอโอไดด์(แทลเลียม) กับพลังงานของรังสีแกมมาแสดงได้ดังรูป 2.2 อันตรกิริยาทั้งสามแบบจะทำให้เกิดโฟตอนของแสงสว่างและอิเล็กตรอนทุกติยภูมิขึ้นในผลึก และการเปลี่ยนแปลงเป็นสัญญาณนับวัดต่อไป[2,7,8,16,29,30]



รูปที่ 2.2 แสดงอันตรกิริยาของรังสีแกมมาต่อผลึกโซเดียมไอโอไดด์ที่มีแทลเลียมเป็นตัวกระตุ้น

ก = โฟโตอิเลคตริก

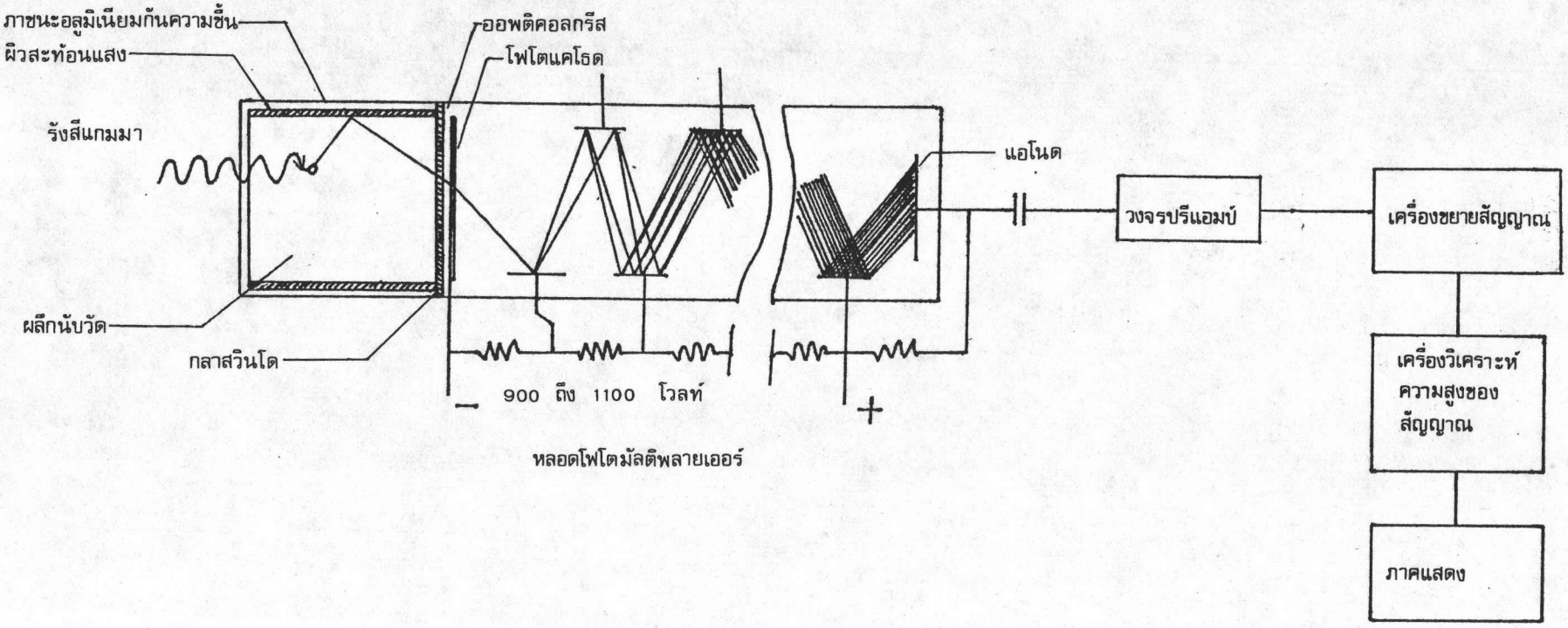
ข = การกระเจิงแบบคอมพ์ตัน

ค = การผลิตอนุภาคคู่

ก+ข+ค = แสดงผลรวมของการเกิดอันตรกิริยาทั้งหมดในผลึกซินทิลเลชัน

2.2.1 ผลึกหัวนับวัดซินทิลเลชันโซเดียมไอโอไดด์ (แทลเลียม)[7]

ผลึกโซเดียมไอโอไดด์บริสุทธิ์จะไม่ทำให้เกิดซินทิลเลชันที่อุณหภูมิห้อง หลังจากเติมสารอสุทธิเช่นแทลเลียม 0.1 ถึง 0.4 โมลเปอร์เซนต์[7]ลงไป แทลเลียมจะทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดซินทิลเลชันได้ที่อุณหภูมิห้อง

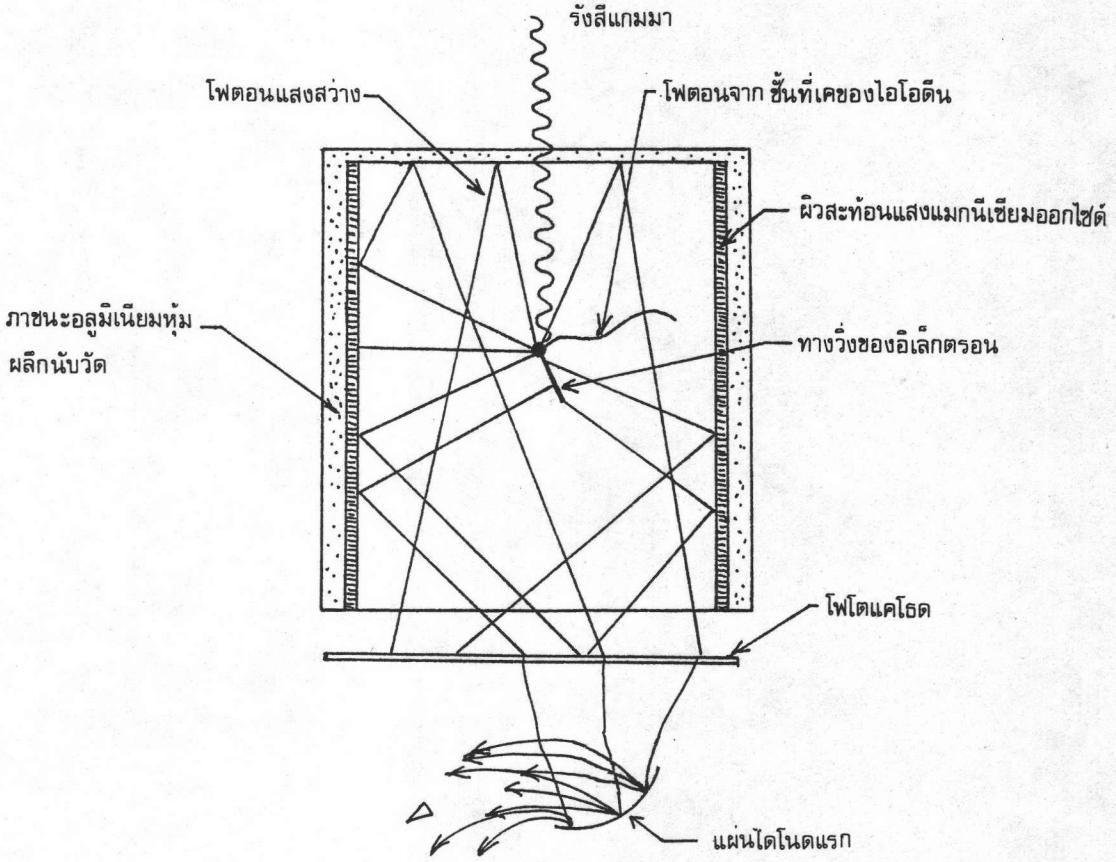


รูปที่ 2.3 ระบบของเครื่องนับวัดรังสีแกมมาแบบซินทิลเลชันประกอบด้วยผลึกนับวัด หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ปรีแอมป์เครื่องขยายสัญญาณ เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณและภาคแสดง (2,36)

ผลึกนับวัดหุ้มไว้ด้วยภาชนะอลูมิเนียมรูปทรงกระบอก มีความหนา 0.079 ซม. เพื่อป้องกันความชื้นจากภายนอกเข้าสู่ผลึกนับวัด เพราะผลึกโซเดียมไอโอไดด์สามารถดูดความชื้นได้ดีและทำให้การโปร่งแสงเสียไปผลึกจะเปลี่ยนเป็นสีเหลือง ผิวภายในภาชนะอลูมิเนียมที่ห่อหุ้มผลึกฉาบไว้ด้วยตัวสะท้อนแสงแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) เพื่อป้องกันการรั่วของแสงออกจากผิวผลึกและภาชนะห่อหุ้มผลึกดังรูป 2.4 ที่ปลายเปิดของภาชนะอลูมิเนียมปิดด้วยกระจก (optical glass window) ซึ่งเชื่อมต่อเข้ากับผิวของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ด้วย ออพติคอล กรีซ(optical grease) เพื่อเป็นตัวกลางให้แสงจากผลึกนับวัดเข้าสู่โฟโตแคโธดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ได้ ตัวกลางนี้มีค่าดัชนีหักเหน้อยที่สุดเพื่อลดการสูญเสียโฟตอนแสงดังรูปที่ 2.3

2.3 <u>ทฤษฎีการเกิดโฟตอนภายในหัวนับวัดชินทิลเลชันโซเดียมไอโอไดด์</u> (แทลเลียม)[2,16,29,30,36,39]

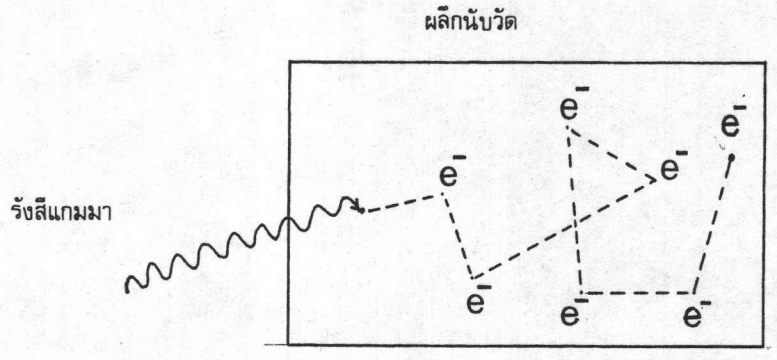
เมื่อโฟตอนของรังสีแกมมาพลังงานต่ำกว่า 1.02 MeV. เข้าชนผลึกหัววัดทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริคและคอมพ์ตันขึ้น และโฟตอนพลังงานเกินกว่า 1.02 MeV.เข้าชนผลึกทำให้เกิดอันตรกิริยาแบบอนุภาคคู่ขึ้น อันตรกิริยาเหล่านี้ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (secondary electron)



รูปที่ 2.4 แสดงการเกิดชินทิลเลชันในผลึกโซเดียมไอโอไดด์[36] มีโฟตอนของแสงเกิดขึ้นตลอดแนวที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ และการสะท้อนของโฟตอนแสงที่ผิวของผลึกสู่โฟโตแคโธด

ขณะที่อิเล็กตรอนทุติยภูมิเคลื่อนที่ไปในผลึกและสูญเสียพลังงานให้แก่ อะตอมของผลึกตลอดแนวทางที่ผ่านไป ทำให้อะตอมของผลึกนับวัดถูกกระตุ้น (excited) และแตกตัวเป็นประจุอิสระ ดังรูปที่ 2.5 [39]

009584



รูปที่ 2.5 รังสีแกมมาเข้าสู่ผลึกหัวนับวัดจะถ่ายทอดพลังงานแก่ผลึกทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิขึ้น ซึ่งจะเคลื่อนที่ไปชนอะตอมของผลึกทำให้อะตอมถูกกระตุ้นและเกิดประจุอิสระขึ้นจำนวนมากตลอดแนวการเคลื่อนที่

เมื่ออะตอมที่ถูกชนกลับคืนสู่สภาวะปกติจะปล่อยพลังงานออกมาเป็นโฟตอนของแสงที่มองเห็นได้ด้วยตาเปล่าและอุลตราไวโอเล็ตเป็นจำนวนมาก เรียกโฟตอนเหล่านี้ว่าลูมิเนสเซนซ์ควันตา (luminescence quanta) หรือโฟตอนทุติยภูมิ

โฟตอนทุติยภูมิของแสงที่ ปล่อยออกมาจากอะตอมผลึกนับวัดเนื่องจากอันตรกิริยาแบบโฟโตอิเลคตริกจะมีจำนวนแปรผันโดยตรงกับพลังงานรังสีแกมมาที่ผลึกนับวัดดูดกลืนไว้ โดยทั่วไปจะเกิดโฟตอนทุติยภูมิ 20-30 อนุภาคต่อพลังงาน 1 keV ที่ปล่อยออกมาจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิทั้งหมด โฟตอนทุติยภูมิที่เกิดขึ้นจะกระจายไปทั่วทุกทางในผลึกและสะท้อนไปมาด้วยผิวสะท้อนแสงแมกนีเซียมออกไซด์ที่ฉาบภาชนะอลูมิเนียมไว้ ถ้าผลึกนับวัดไม่ดูดกลืนโฟตอนทุติยภูมิไว้ โฟตอนจะสะท้อนครั้งสุดท้ายเข้าสู่ผิวของโฟโตแคโธดภายในหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ต่อไปดังรูป 2.3, 2.4

2.4 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์

เป็นหลอดสูญญากาศประกอบด้วยโฟโตแคโธดซึ่งเป็นแผ่นโลหะผสมของซีเซียมกับแอนติโมนี มีไดโนดจำนวน 10-12 ตัวต่ออนุกรมกัน แต่ละตัวมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกสูงขึ้นด้วยกำลังขยาย (voltage gain) คงที่เช่น 100 โวลท์ เป็นต้น และมีแอโนดหนึ่งแผ่น ดังรูป 2.3

เมื่อแสงจากผลึกซินทิลเลชันชนโฟโตแคโธดจะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนพลังงานต่ำหลุดออกมาจากผิว โฟโตอิเล็กตรอนแต่ละอนุภาคที่เกิดขึ้นจะโฟกัสไปสู่ไดโนดตัวแรกซึ่งมีศักย์ไฟฟ้าสูงกว่าโฟโตแคโธด อิเล็คตรอนจากแคโธดชนไดโนดทำให้ไดโนดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิออกมาหลายอนุภาค มีจำนวนแตกต่างกันขึ้นกับความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างไดโนดและแคโธด อิเล็กตรอนแต่ละอนุภาคเคลื่อนที่เข้าชนไดโนดตัวที่สองด้วยความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างไดโนดทั้งสองซึ่งจะให้อิเล็กตรอนออกมาเป็นทวีคูณ ขบวนการนี้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องจนครบทุกไดโนด อิเล็กตรอนจากไดโนดสุดท้ายจะเคลื่อนที่สู่แอโนดและอิเล็กตรอนทุกตัวถูกจับไว้ เกิดเป็นสัญญาณของกระแสไฟฟ้าออกจากแอโนดสู่วงจร ขยายสัญญาณเพื่อสร้างเป็นสัญญาณนับวัดต่อไป ถ้าการเพิ่มของอิเล็กตรอนจากแต่ละไดโนดด้วยแฟคเตอร์ 4 ดังนั้นไดโนด 12 ตัว จะให้อิเล็กตรอนทุติยภูมิ 4^{12} อนุภาคต่ออิเล็กตรอนที่เข้าชนไดโนดตัวแรก สัดส่วนการเพิ่มจำนวนของอิเล็กตรอนขึ้นอยู่กับความเสถียรของกำลังขยายของศักย์ไฟฟ้าของไดโนดแต่ละคู่ที่อยู่ใกล้กันและต้องมีค่าเท่ากัน กำลังขยายจะเปลี่ยนแปลงไปเมื่อศักย์ไฟฟ้าที่ใส่ให้แก่แต่ละไดโนดเปลี่ยน ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ป้อนให้แก่หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์จะต้องเสถียรที่สุด

สัญญาณที่ออกจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์มีขนาดแตกต่างกันเนื่องจากสาเหตุต่าง ๆ ดังนี้

ก. รังสีแกมมาที่มีระดับพลังงานเดียวกันจะทำให้เกิดสัญญาณที่มีขนาดแตกต่างกันเล็กน้อยเนื่องจากการเกิดอันตรกิริยาและตำแหน่งของซินทิเลชันในผลึกนับวัดต่างกัน และการเพิ่มจำนวนอิเล็กตรอนภายในหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์

ข. โฟตอนของแสงที่เห็นได้ด้วยตาเปล่าซึ่งเกิดจากอิเล็กตรอนทุติยภูมิแต่ละอนุภาคมีจำนวนไม่แน่นอน อันเป็นผลมาจากความเปลี่ยนแปลงทางสถิติภายในผลึกนับวัด

ค. ความแตกต่างของระยะทางที่โฟตอนเคลื่อนที่ในผลึกและจำนวนครั้งของการสะท้อนของโฟตอนที่ผิวผลึก ทำให้มีการดูดกลืนโฟตอนในผลึกเป็นจำนวนแตกต่างกัน ฉะนั้นจำนวนโฟตอนจะลดลงไม่แน่นอน

ง. เมื่อโฟตอนของแสงเคลื่อนเข้าสู่ผิวโฟโตแคโธด จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนขึ้น แต่มีโฟตอนบางอนุภาคอาจไม่ทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนออกมาก็ได้

จ. โฟโตอิเล็กตรอนจากโฟโตแคโธดส่วนใหญ่ถูกโฟกัสเข้าสู่ผิวของไดโนดตัวแรก แต่โฟโตอิเล็กตรอนบางอนุภาคก็สามารถหลุดหนีไปจากไดโนดแรกได้

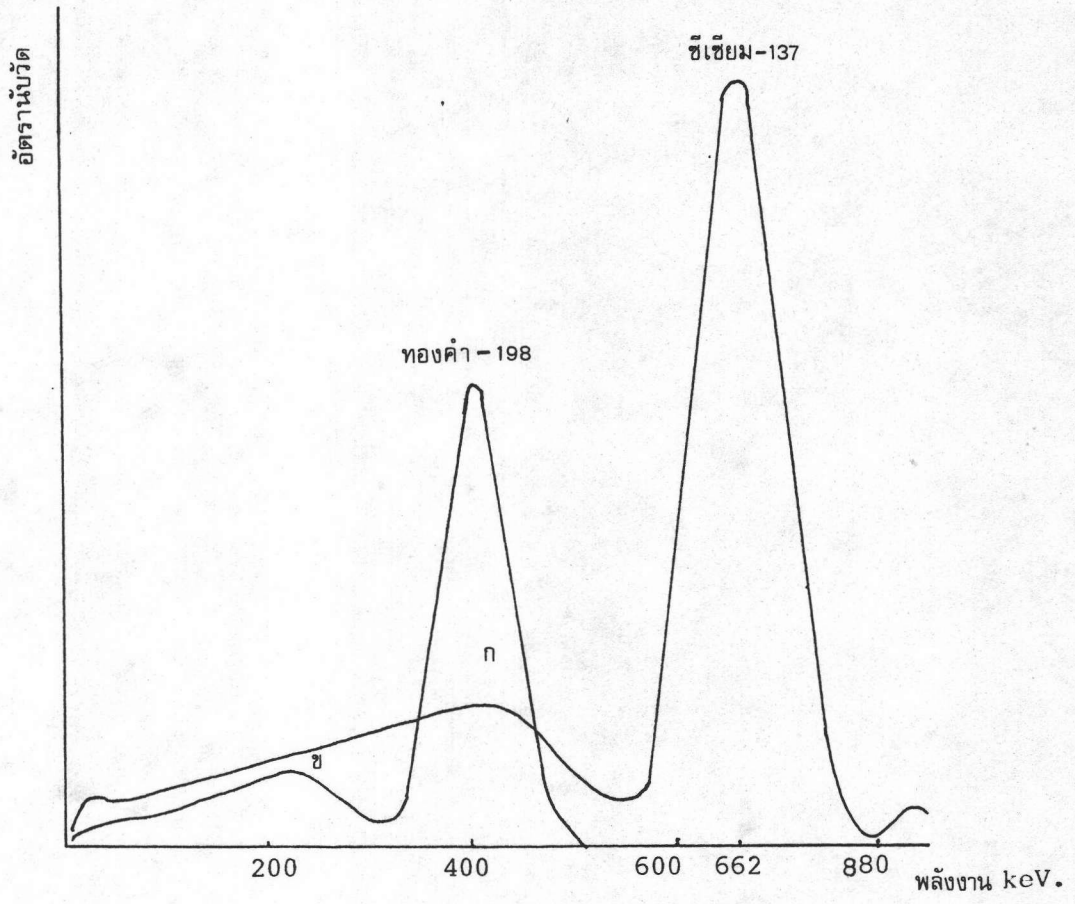
ฉ. โฟโตอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าสู่ผิวไดโนดอาจจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิหรือไม่ก็ได้

ช. ความเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพในการเพิ่ม จำนวนของอิเล็กตรอนทุติยภูมิในไดโนดอันก่อนจะเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้สัญญาณที่ออกมาจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เปลี่ยนไปตามลำดับ

ถ้าหัวนับวัดทำงานถูกต้องสมบูรณ์พลังงานที่วัดได้ต้องไม่มีการบิดเบือนและโฟโตพีคจะต้องแคบมาก ๆที่พลังงานค่านี้ อย่างไรก็ตามมีบางสัญญาณจะให้พลังงานตรงกับโฟโตพีคและมีอีกหลายสัญญาณที่พลังงานแตกต่างไปจากโฟโตพีคดังเหตุผลที่กล่าวมา สัญญาณขนาดแตกต่างกันทำให้โฟโตพีคมีความกว้างเกิดขึ้น

ความเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทำให้เกิดสัญญาณที่มีค่าพลังงานต่ำกว่าโฟโตพีคขึ้นระหว่างศูนย์ถึงค่าพลังงานใกล้เคียงกับโฟโตพีคดังรูปที่ 2.6 นอกจากนี้อาจมีสัญญาณพลังงานต่ำเกิดขึ้นจากสาเหตุอื่น ๆ คือ โฟตอนที่มีอันตรกิริยาแบบคอมพ์ตันกับผลึกนับวัดจะทำให้โฟตอนตัวเดิมมีพลังงานลดลงกระเจิงหนีออกจากผลึกนับวัด (scattered photon) และอิเล็กตรอน (recoiled electron) หลุดจากอะตอมผลึกนับวัด ผลึกจะดูดกลืนพลังงานของอิเล็คตรอนตัวนี้ และเปลี่ยนเป็นแสงสว่างตลอดแนวที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ แสงสว่างนี้ทำให้เกิดสัญญาณพลังงานต่ำมีค่าต่าง ๆ กัน ถ้ารังสีแกมมามีพลังงานสูงคอมพ์ตันอิเล็กตรอนและโฟตอนที่กระเจิงออกจากผลึกนับวัดจะมีพลังงานสูงด้วย ดังนั้นรังสีแกมมาพลังงานสูงมีโอกาสหลุดหนีจากผลึกนับวัดได้มากกว่ารังสีแกมมาพลังงานต่ำ ทำให้จำนวนอันตรกิริยาแบบคอมพ์ตันของรังสีแกมมาพลังงานสูงเกิดขึ้นมากกว่าพลังงานต่ำ เช่น รังสีแกมมาจากนิวไคลด์ รังสีซีเซียม-137 พลังงาน 662 keV. มีจำนวนอันตรกิริยาแบบคอมพ์ตันมากกว่ารังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีทองคำ-198 พลังงาน 412 keV ดังรูปที่ 2.6

ในเครื่องมือนับวัดชินทิลเลชันและเครื่องมือสร้างภาพขนาดของผลึกและขนาดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์จะแตกต่างกัน เครื่องนับวัดและเครื่องมือสร้างภาพสแกนเนอร์มีหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เพียง 1 หลอด เครื่องถ่ายภาพชินทิลเลชัน (gamma camera) มีจำนวนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์แตกต่างกันไปตามขนาดของผลึกของหัวนับวัด การใช้งานและการออกแบบของผู้ผลิต ดังแสดงในตารางที่ 2.2



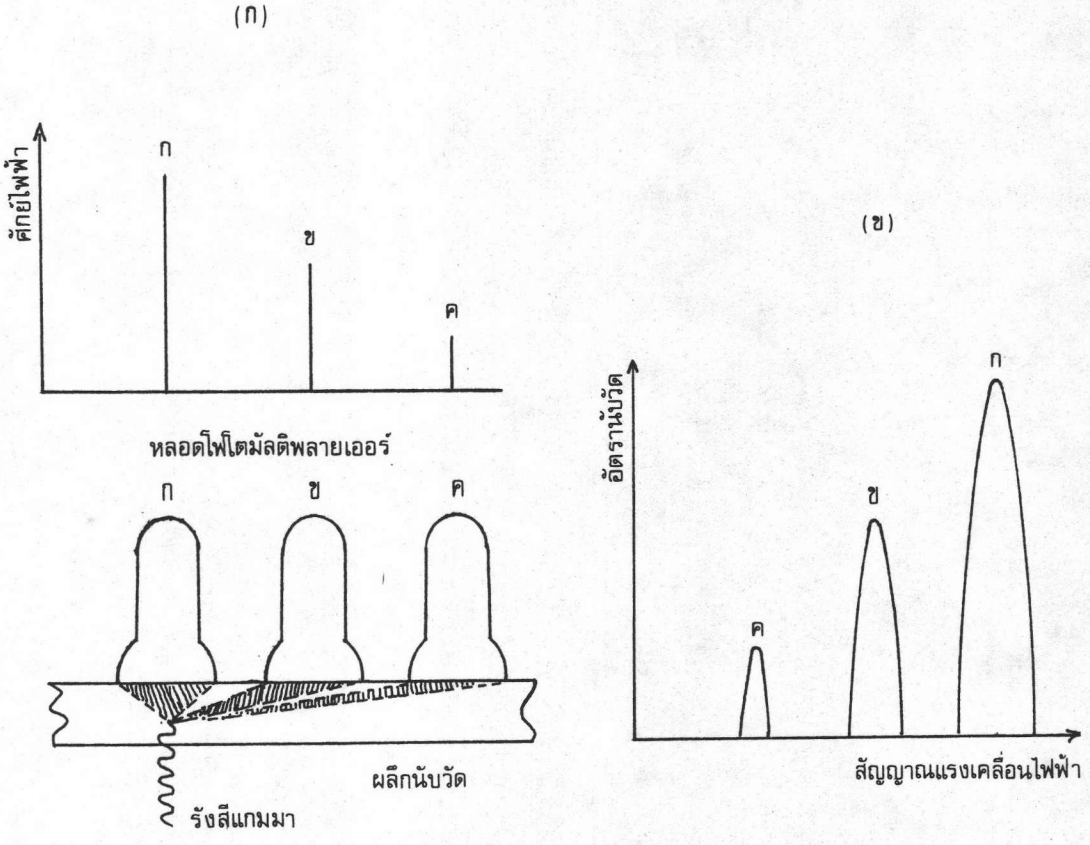
รูปที่ 2.6 รังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีซีเซียม-137 พลังงาน 662 keV จะให้จำนวนอันตรกิริยาแบบคอมพ์ตัน (ก) ได้มากกว่ารังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีทองคำ 198 พลังงาน 412 keV (ข) เมื่อชนผลึกโซเดียมไอโอไดด์เดียวกัน

ตารางที่ 2.2 แสดงขนาดและจำนวนผลึกหัวนับวัดและหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ของเครื่องนับวัดและเครื่องมือสร้างภาพซินทิลเลชันในโรงพยาบาลจุฬาลงกรณ์

ชนิดเครื่องมือ	ขนาดของผลึกหัววัด		หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์	
	ความหนา (ซม.)	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)	จำนวนหลอด	เส้นผ่าศูนย์กลาง (ซม.)
สเปคโตรมิเตอร์	2.5	2.5	1	2.5
สแกนเนอร์ (Picker)	7.5	12.5	1	12.5
แกมมาคาเมอรา 1 (Philips)	1.25	32.7	37	5.18
แกมมาคาเมอรา 2 (Philips)	0.95	48	37	7.62

หลักการนับวัด ของเครื่องนับวัดและเรคติลิเนียร์สแกนเนอร์คล้ายกัน สำหรับเครื่องถ่ายภาพแกมมาจะมีวงจรกำหนดตำแหน่งการเกิดซินทิลเลชันเพิ่มเติมจากเครื่องนับวัดเนื่องจากมีหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์จำนวนมาก ภาพที่ 2.7 ก. แสดงหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ที่ตำแหน่งต่าง ๆ รับโฟตอนของแสงจากซินทิลเลชันจากจุดเดียวกันในผลึกนับวัด สัญญาณหรือแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในแต่ละหลอดมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันตามปริมาณของแสงที่เข้าหลอด จากภาพพบว่าหลอด ก ได้รับแสงมากที่สุดหลอด ข และ ค จะได้รับแสงน้อยตามลำดับ

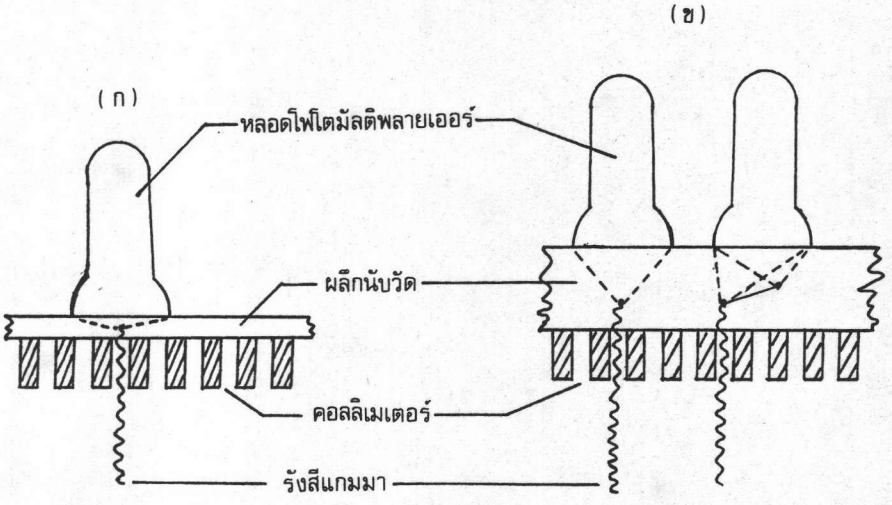
ปริมาณแสงเข้าสู่หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์น้อยทำให้หลอดผลิตอิเล็กตรอนน้อย เป็นเหตุให้สัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าจากหลอดลดลง สัญญาณจากหลอด ก มีค่าสูงสุด เมื่อสัญญาณผ่านเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณจะแสดงผลเฉพาะหลอด ก เท่านั้น ส่วนหลอด ข และ ค สัญญาณมีอำพนต่ำจะถูกตัดทิ้งไป (กล่าวละเอียดในภาคการวิเคราะห์สัญญาณ) ดังรูปที่ 2.7-ข



รูปที่ 2.7 หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์รับโฟตอนแสงและผลิตสัญญาณมีขนาดแตกต่างกันตามตำแหน่งซินทิลเลชันในผลึกและหลอดที่อยู่ใกล้กว่าจะให้สัญญาณมีอำพนสูงกว่า[8]

สำหรับผลึกที่มีความหนามากจะมีประสิทธิภาพสูงในการนับวัดรังสีแกมมาพลังงานสูง และโอกาสที่จะเกิดอันตรกิริยาคอมพ์ตันมีน้อยกว่าอันตรกิริยาโฟโตอิเลคตริค แต่กำลังแยกของการขจัดของตำแหน่งในการเกิดซินทิลเลชันจะลดลง เพราะเมื่อเกิดคอมพ์ตันและโฟโตอิเลคตริกใกล้ ๆ กัน หัวนับวัดจะไม่สามารถแยกได้ว่าจุดใดเป็นโฟโตอิเลคตริคและหาจุดที่รังสีชนผลึกครั้งแรกได้ยาก เพราะอันตรกิริยาทั้งสองแบบให้แสงที่อยู่ในช่วงการตอบสนองของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เดียวกันดังรูปที่ 2.8 ข และ 2.9 ข, ค. ตำแหน่งการเกิดซินทิลเลชันที่วัดได้จะผิดไปดังภาพที่ 2.8 ทำนองเดียวกันถ้าแผ่นผลึกหนาเมื่อได้รับรังสีแกมมาพลังงานต่ำก็ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการนับวัดเพิ่มขึ้น[8] เนื่องจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์อยู่ห่างจากจุดที่เกิดซินทิลเลชันในผลึกมาก ปริมาณของแสงที่เข้าสู่หลอดจะลดลงและสัญญาณแรงเคลื่อนไฟฟ้าที่เกิดจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ก็ลดลง ส่งผลให้เกิดความไม่แน่นอนในการนับวัดเพิ่มมากขึ้น

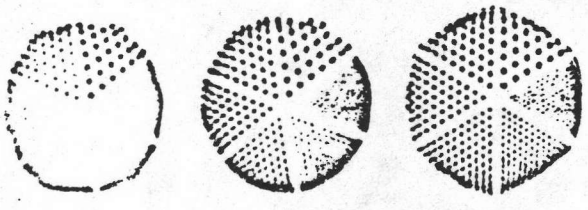
เครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาแบบใหม่ออกแบบมาเพื่อรับรังสีแกมมาพลังงานต่ำและพลังงานปานกลาง ผลึกนับวัดค่อนข้างบางคือมีความหนาระหว่าง 0.63 -1.27 ซม. ทำให้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์วางชิดกับจุดที่เกิดซินทิลเลชันมากขึ้น ตำแหน่งของจุดซินทิลเลชันบน



รูปที่ 2.8 ผลของความหนาของผลึก

ก. ผลึกบางเมื่อเกิดซินทิลเลชันในผลึกและอยู่ใกล้หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ สัญญาณแสงจะถูกจับได้มากกว่าผลึกหนา

ข. เมื่อผลึกหนาขึ้นหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์อยู่ห่างจากจุดที่เกิดซินทิลเลชัน เมื่อเกิดคอมพ์ตันและโฟโตอิเล็คตริกใกล้ ๆ กัน ทำให้หัวนับวัดไม่สามารถแยกได้ว่าจุดใดเป็นโฟโตอิเลคตริค และหาจุดที่รังสีชนผลึกครั้งแรกได้ยาก



รูปที่ 2.9 หัวนับวัด ก. และ ข. มีขนาดของผลึกเท่ากัน ข. มีหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์มากกว่าจะให้รายละเอียดของภาพ มากกว่า,หัวนับวัด ข และ ค มีจำนวนหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เท่ากัน ค. มีผลึกบางกว่าจะให้รายละเอียดของภาพได้ชัดเจนกว่า

ภาพที่แสดงออกมาจะถูกต้องใกล้เคียงกับตำแหน่งที่เกิดขึ้นในวัตถุมากที่สุด ทำให้กำลังแยกของการขจัดของภาพดีขึ้นให้ภาพมีรายละเอียดชัดเจนกว่าภาพจากผลึกหนาดังรูปที่ 2.9 ข,ค การเพิ่มกำลังแยกของการขจัดอีกวิธีหนึ่งคือ การลดขนาดของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ให้เล็กลงและเพิ่มจำนวนหลอดให้มากขึ้นบนผิวของผลึกซินทิลเลชันโดยออกแบบหลอดให้เรียงเป็นรูปหกเหลี่ยม ทำให้ภาพมีรายละเอียดดีขึ้น ดังรูป 2.9 ก,ข.

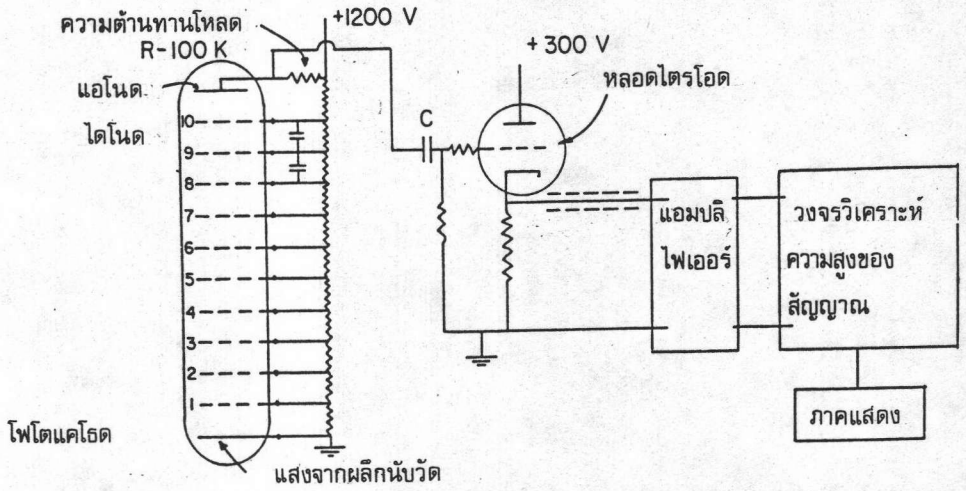
2.5 วงจรขยายสัญญาณ (preamplifier and amplifier)

วงจรขยายสัญญาณประกอบด้วยปรีแอมปลิไฟเออร์และแอมปลิไฟเออร์เป็นวงจรที่เชื่อมระหว่างหัวนับวัดและวงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ มีหน้าที่ดังนี้

2.5.1 ปรีแอมปลิไฟเออร์

เป็นวงจรที่ต่อระหว่างหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์และวงจรแอมปลิไฟเออร์มีหน้าที่หลัก 3 ประการคือ

ก. ขยายสัญญาณ



รูปที่ 2.10 แสดงวงจรของเครื่องนับวัด ซึ่งประกอบด้วยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ หลอดไตร-โอด(ปรีแอมป์) แอมปลิไฟเออร์ วงจรวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณและภาคแสดง แสงจากผลึกนับวัดทำให้เกิดสัญญาณไฟฟ้าด้วยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ เข้าสู่วงจรขยายสัญญาณปรีแอมป์และแอมปลิไฟเออร์ สัญญาณที่ขยายแล้วถูกแยกด้วยวงจรวิ-เคราะห์สัญญาณ และแสดงผลการนับวัดต่อไป

ข. ให้ความต้านทานของหัวนับวัดและแอมปลิไฟเออร์เท่ากัน (match Impedance)

ค. จัดรูปร่างของสัญญาณให้พอเหมาะกับวงจรอิเลคทรอนิคชนิดอื่น ๆ

จากรูปที่ 2.10 ระหว่างแอโนดและแคโธดของหลอดไตรโอด (triode)* ซึ่งมีหน้าที่ขยายสัญญาณมีความต่างศักย์ไฟฟ้าสูงอยู่ ทำให้กระแสอิเล็กตรอนปริมาณคงที่จากแคโธดเคลื่อนที่สู่แอโนดตลอดเวลา เมื่อมีสัญญาณของกระแสอิเล็กตรอนออกจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เป็นสัญญาณที่มีอำพน (amplitude) ต่ำ และเกิดขึ้นในช่วงเวลาสั้น ๆ คือสั้นกว่า 1×10^{-6} วินาที ถูกกั้นด้วยความต้านทาน (load resistor) ไม่ให้ไหลสู่ศักย์ไฟฟ้า +1,200 โวลท์ ของหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ ทำให้สัญญาณกระแสอิเล็กตรอนไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุ (capacitor),C ประจุไฟฟ้าเก็บสะสมในตัวเก็บประจุนี้ เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างขั้วของตัวเก็บประจุ และเกิดศักย์ไฟฟ้าที่กริดคือ

$$V = \frac{Q}{C} \qquad \text{..... 2.1}$$

เมื่อ v ศักย์ไฟฟ้าที่เข้าสู่กริดของหลอดไตรโอด (โวลท์)

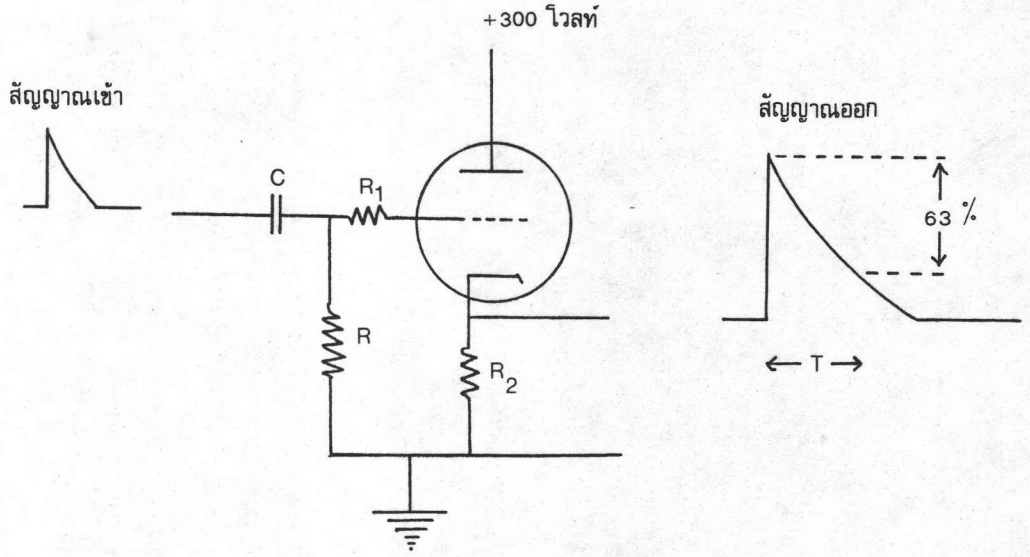
Q ประจุไฟฟ้าที่ออกจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เข้าสู่ตัวเก็บประจุ(คูลอมบ์)

C ความจุของตัวเก็บประจุ (ฟารัด)

ศักย์ไฟฟ้าที่กริดจะบังคับการไหลของอิเล็กตรอนจากแคโธดสู่แอโนดในหลอดไตรโอดให้ลดลง เกิดเป็นสัญญาณกระแสไฟฟ้ามีอำพน (amplitude) สูงกว่าสัญญาณเดิมจากกริดออกจากหลอดไตรโอดทางขั้วแคโธด

---

*ปัจจุบันใช้ทรานซิสเตอร์แทนหลอดไทรโอดในวงจรอิเลคทรอนิคสำหรับขยายสัญญาณ



รูปที่ 2.11 แสดงสัญญาณไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุ C เข้าสู่กริดของหลอดไตรโอดและถูกขยายออกมา และการลดลงของอำพนสัญญาณเนื่องจากมีประจุรั่วผ่านความต้านทาน R

จากรูปที่ 2.11 ความต้านทาน R ต่อกับตัวเก็บประจุ C ประจุไฟฟ้าจากตัวเก็บประจุจะรั่วผ่านความต้านทาน R สู่กราวด์ ทำให้ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ขั้วทั้งสองของตัวเก็บประจุและศักย์ไฟฟ้าที่กริดลดลงเป็นฟังก์ชันของเอกซ์โพเนนเชียลกับเวลา t ที่ประจุไฟฟ้าไหลผ่านความต้านทาน R[39] คือ

$$V = V_0 e^{-t/RC} \qquad \text{.....} \quad 2.2$$

เมื่อ R x C เรียกว่า "ค่าเวลาคงตัว" (time constant) T ของวงจรสร้างรูปร่างของสัญญาณ (pulse-shaping circuit) หรือวงจร RC

วงจร RC จะทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่เข้าสู่กริดของหลอดไตรโอดลดลง 63% ของ V_0 ในเวลา T ทำให้สัญญาณที่ออกมาจากหลอดไตรโอดมีช่วงเวลาปรากฏ (duration) นานขึ้นตาม

ค่า T หรือ R x C

การขยายสัญญาณของวงจรปรีแอมปลิไฟเออร์มีกำลังขยายซึ่งเป็นอัตราส่วนของสัญญาณออกต่อสัญญาเข้าระหว่าง 5-20 เท่า สำหรับหัวนับวัดบางชนิดอาจใช้กำลังขยายมากกว่านี้หรือใช้กำลังขยายสูง ๆ แต่มักจะมีปัญหาเกิดขึ้นคือ เกิดสัญญาณรบกวน (noise) เพิ่มขึ้นและการขยายสัญญาณจะเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิขณะนั้นด้วย

2.5.2 เครื่องขยายสัญญาณ (amplifier)

เครื่องขยายสัญญาณในเครื่องมือนิวเคลียร์มีหน้าที่หลักอยู่สองประการคือ

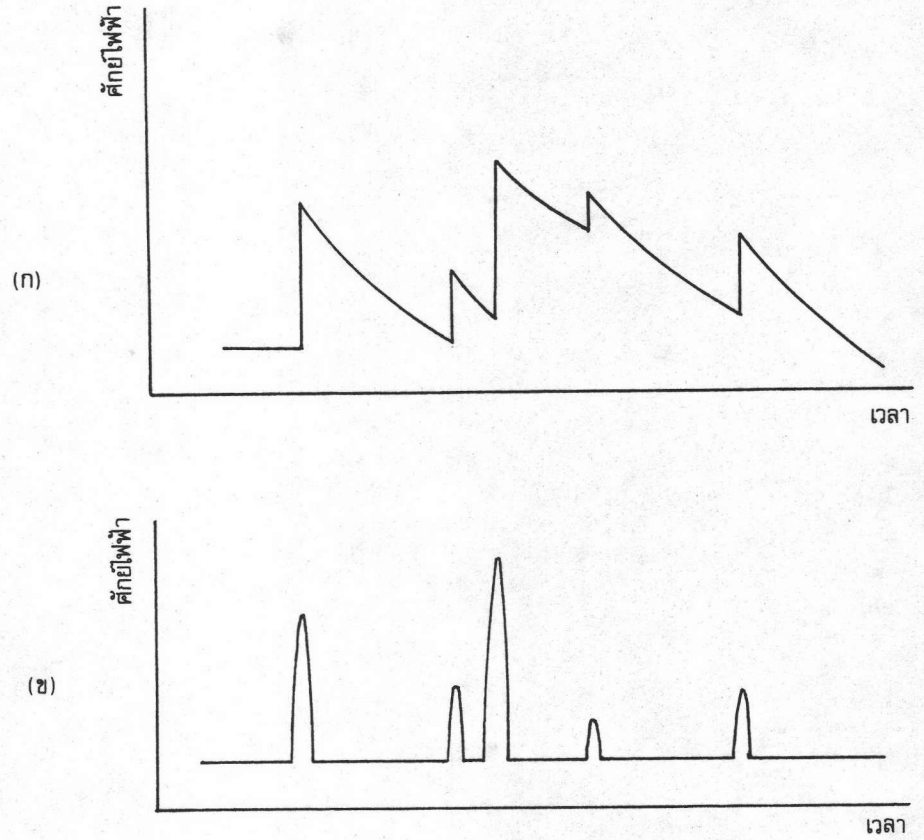
ก. เพื่อขยายสัญญาณขนาดเล็กจากปริแอมปลิไฟเออร์ซึ่งอำพนมีขนาดเล็กเป็นมิลลิ-โวลท์ให้พอเหมาะกับเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณคือมีระดับขนาดเป็นโวลท์

ข. เพื่อเปลี่ยนรูปร่างของสัญญาณให้แคบลงเพื่อป้องกันการซ้อนกันของสัญญาณ (pulse pileup) และเพื่อตัดสัญญาณรบกวนออก

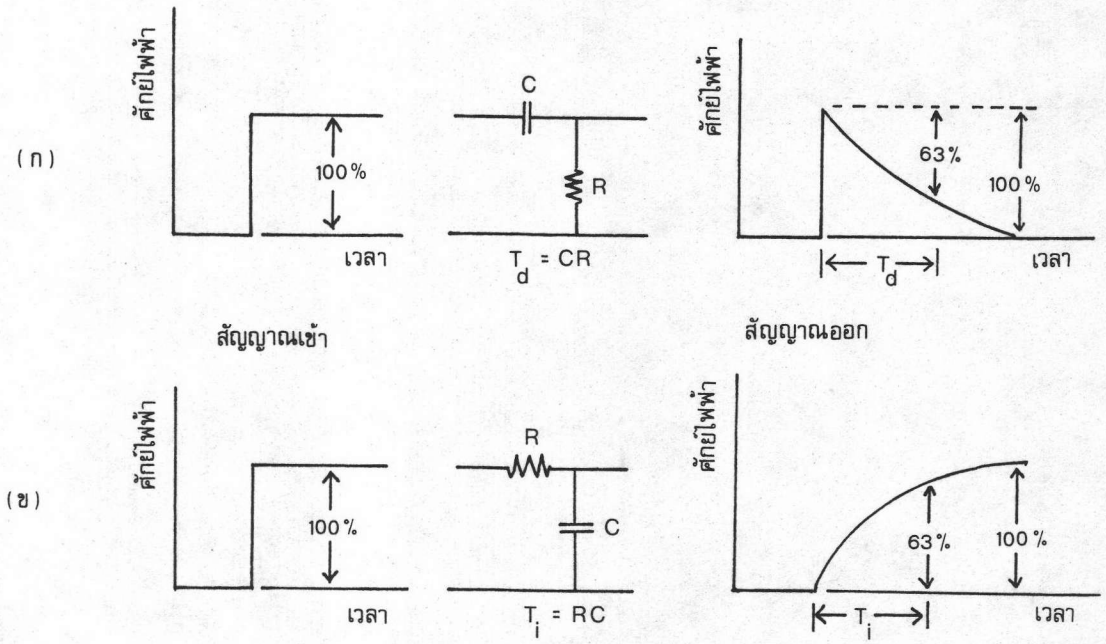
สัญญาณที่ออกจากเครื่องขยายปริแอมปลิไฟเออร์มีค่าเวลาคงตัวเท่ากับ 5×10^{-5} วินาที และอำพนของสัญญาณลดลงจนหมดในเวลา 5×10^{-4} วินาที เมื่อมีสัญญาณใหม่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 5×10^{-4} วินาที สัญญาณใหม่จะซ้อนกับหางของสัญญาณแรก ทำให้อำพนของสัญญาณผิดไปดังรูป 2.12 ก. ทำให้อำพนของสัญญาณที่ออกจากวงจรปริแอมป์ผิดพลาดไป จากเหตุการณ์นี้ระบบจะอ่านอัตรานับวัดได้ไม่เกิน 100 ครั้งต่อวินาที

วงจรจัดรูปของสัญญาณ (pulse-shaping circuits) ของเครื่องขยายสัญญาณต้องแยกสัญญาณที่เหลื่อมซ้อนกันจากปริแอมป์ออกจากกันได้ชัดเจนดังรูป 2.12 ข. การแยกสัญญาณออกจากกันจะต้องไม่ทำให้อำพนของสัญญาณผิดพลาดไปจากเดิมซึ่งแปรผันตามพลังงานของรังสีแกมมาและให้มีเวลาตรงกับการเกิดชินทิลเลชันในผลึกนับวัด

วงจรขยายและปรับรูปร่างของสัญญาณปกติใช้วงจร CR ดังรูป 2.13 ก. เมื่อมีสัญญาณเข้าซึ่งมีอำพนสูงขึ้นทันทีในตอนต้นของสัญญาณและมีช่วงเวลาในการเกิดสัญญาณนานจากปริ-แอมป์เข้าสู่วงจร CR ทำให้สัญญาณออกมามีอำพนเพิ่มขึ้นทันทีแล้วสลายตัวด้วยเวลาคงตัว (time constant) T_d มีค่าเท่ากับผลคูณของ R และ C อำพนของสัญญาณที่ออกมาจะแปรผันตามอำพนของสัญญาณเข้าและสัญญาณที่สองจะไม่ถูกรบกวนด้วยหางของสัญญาณแรก วงจร CR มีใช้ทั้งวงจรปรีแอมป์และแอมปลิไฟเออร์ แต่ค่าเวลาคงตัวของวงจรปรีแอมป์นานกว่า



รูปที่ 2.12 รูป (ก) แสดงสัญญาณจากวงจรปริแอมปลิฟลายเออร์ที่มีค่าเวลาคงตัวยาว เหลื่อมซ้อนกัน รูป (ข) สัญญาณเดียวกันที่ออกมาจากเครื่องขยายสัญญาณจะทำให้สัญญาณแคบลงโดยไม่ทำให้อำพนของสัญญาณเปลี่ยนแปลงไปหรือเวลานับวัดผิดพลาดไป



รูปที่ 2.13 แสดงวงจรขยายและจัดรูปร่างของสัญญาณ CR และ RC (รูป ก. และ รูป ข.) เมื่อมีสัญญาณเข้าเหมือนกัน จะทำให้สัญญาณออกมีอำพนลดลงและเพิ่มขึ้น 63% ในเวลา T_d และ T_i ตามลำดับ

จากรูปที่ 2.13 ข. อำพนของสัญญาณเพิ่มขึ้นในตอนแรกเข้าสู่วงจร RC สัญญาณที่ออกมาจะเปลี่ยนไปดังสมการ

$$V = V_o \ (1-e^{-t/RC}) \qquad \text{..... 2.3}$$

V = อำพนของสัญญาณที่ออกจากวงจร

V_o = อำพนของสัญญาณเข้า

$RC = T_i$ ค่าเวลาคงตัวของวงจร

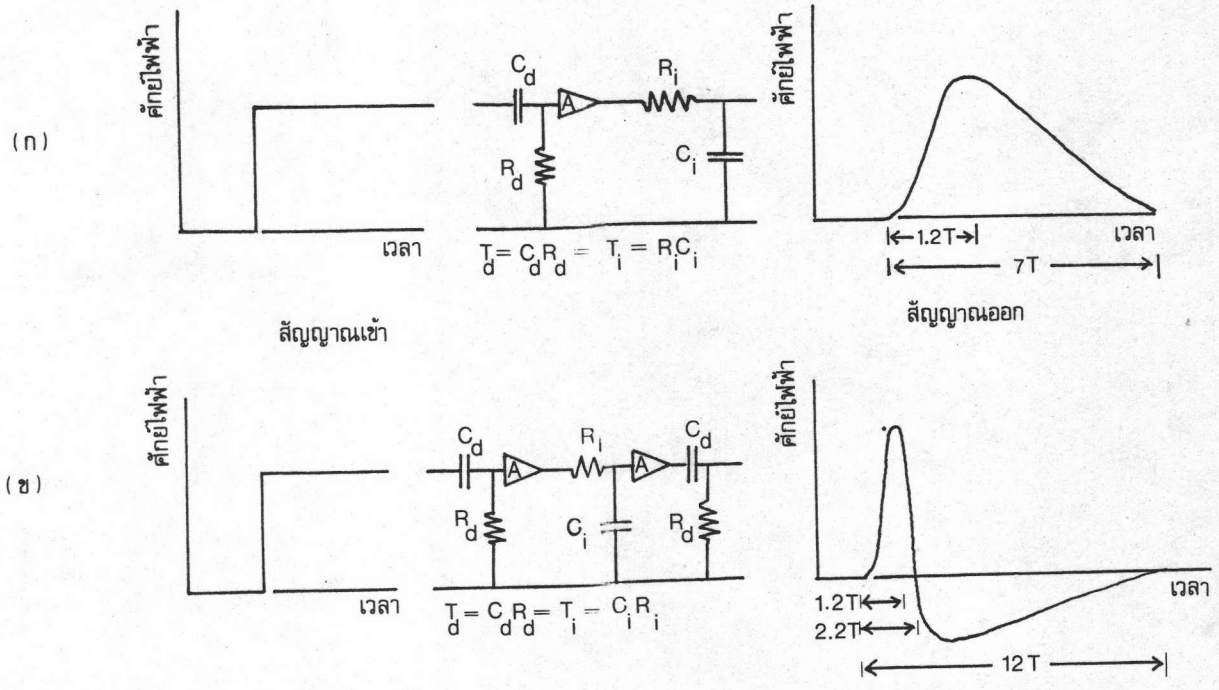
จากสมการ 2.3 จะทำให้สัญญาณที่ออกมาจากวงจร RC ค่อย ๆ เพิ่มขึ้นตามลำดับและมีอำพน 63% ในเวลา T_i

วงจร RC และ CR ประกอบกันขึ้นเป็นวงจรขยายและจัดรูปร่างของสัญญาณดังรูป 2.14 ก. เมื่อค่าเวลาคงตัวของวงจรทั้งสองเท่ากัน ($T=T_d=T_i$) สัญญาณที่ออกมาจะมีอำพนมากสุดเมื่อใช้เวลา 1.2 T และสัญญาณจะสลายไปหมดใช้เวลา 7T ในหัวนับวัดแบบซินทิลเลชัน มีค่าเวลาคงตัว T ประมาณ $0.25 \times 10^{-6} - 5 \times 10^{-6}$ วินาที(39) ดังนั้นสัญญาณที่ออกมาจะมีช่วงเวลาการเกิดสัญญาณน้อยกว่าสัญญาณจากปริแอมป์ ($5 \times 10^{-5} - 5 \times 10^{-4}$ วินาที) ทำให้ระบบสามารถวัดอัตรานับวัดสูง ๆ ได้ สัญญาณที่ออกจากเครื่องขยายชนิดนี้จะมีเฉพาะสัญญาณบวกเท่านั้น (มีสัญญาณลบที่หางของสัญญาณน้อยมาก) เรียกว่าสัญญาณชนิด "ขั้วเดียว" (unipolar output)

จากรูป 2.14 ข แสดงวงจร CR สองวงจรประกอบเข้าเป็นวงจรจัดรูปร่างของสัญญาณ สัญญาณออกจากวงจรนี้จะมีทั้งสัญญาณบวกและลบเรียกว่าสัญญาณชนิด "สองขั้ว" ค่าเวลาคงตัวของวงจร RC เท่ากัน ทำให้สัญญาณที่ออกมามีอำพนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและมีสัญญาณบวกแคบ ๆ ช่วงเวลาในการเกิดสัญญาณนานกว่าสัญญาณชนิดขั้วเดียว

สัญญาณชนิดขั้วเดียวจะมีสัญญาณรบกวน (noise) น้อยและให้กำลังแยกของพลังงานดีกว่า สัญญาณชนิดสองขั้วมีข้อดีคือใช้วัดอัตรานับวัดสูงได้ดี

เครื่องขยายสัญญาณควบคุมโดยการปรับค่าเวลาคงตัว (time constant) ถ้าใช้ค่าเวลาคงตัวนานทำให้อำพนของสัญญาณออกมาได้สมบูรณ์ซึ่งใช้หากำลังแยกของสัญญาณได้ดีที่สุด สำหรับค่าเวลาคงตัวสั้นมีประโยชน์ในการวัดเวลาของการเกิดสัญญาณได้แม่นยำและใช้วัดอัตรานับวัดสูง ๆ ได้ เช่นในเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชัน เป็นต้น



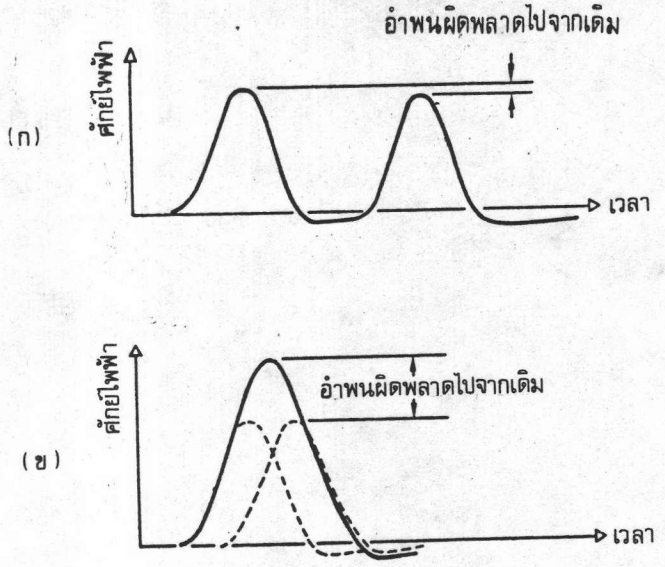
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรขยายสัญญาณชนิด CR (ก) และชนิด CR สองชุดต่ออนุกรมกัน (ข)

(ก) สัญญาณที่ออกมามีเฉพาะสัญญาณบวกเท่านั้นมีความกว้างของสัญญาณ 7T

(ข) เป็นสัญญาณชนิดสองขั้ว (bipolar pulse) สัญญาณชนิดนี้มีความกว้างของสัญญาณบวกน้อยกว่าชนิดแรก ทำให้สามารถนับอัตรานับวัดสูง ๆ ได้

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากวงจรขยายสัญญาณเมื่อนำไปวัดอัตรานับวัดสูง ๆ

ก. การเลื่อนตำลงของโฟโตพีค (Baseline Shift) เกิดจากสัญญาณที่สองเกิดซ้อนกับสัญญาณลบที่หางของสัญญาณแรก ทำให้อำพนของสัญญาณที่สองและสัญญาณถัดมาลดลงทีละน้อยตามลำดับ ดังรูป 2.15 ก. และ 2.16



รูปที่ 2.15 (ก) ภาพแสดงการเลื่อนไปของโฟโตพีค (baseline shift) เกิดจากการรวมกันที่หางของสัญญาณที่เกิดใกล้กัน

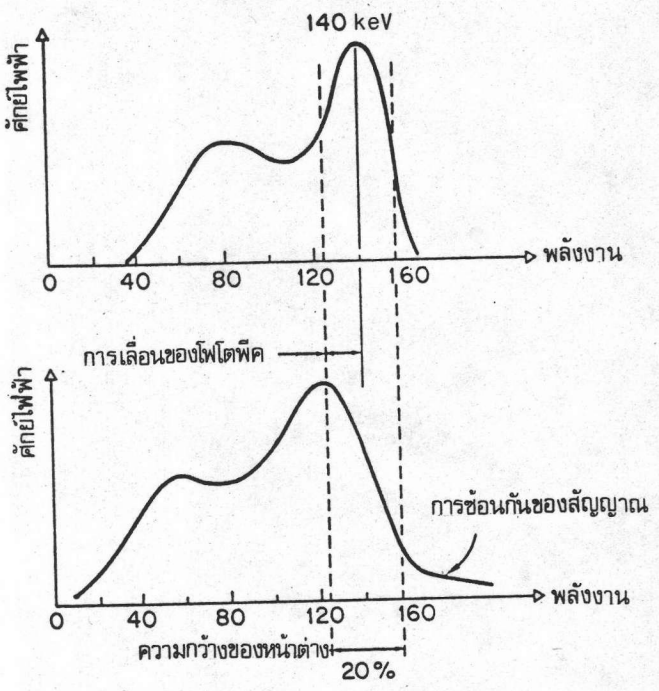
(ข) แสดงการเหลื่อมซ้อนกันของสัญญาณ (pulse pileup) กลายเป็นสัญญาณเดียวกัน เมื่อสัญญาณทั้งสองเกิดในเวลาใกล้เคียงกันมาก

ความไม่แน่นอนของอำพนของสัญญาณทำให้สเปคตรัมของรังสีแกมมาจากนิวไคลด์รังสีระดับพลังงานของโฟโตพีคต่ำลงดังรูปที่ 2.16 ก.ข.

การเลื่อนของโฟโตพีคสามาถแก้ไขได้โดยเพิ่มวงจรพิเศษคือ baseline restoration หรือpole zero cancellation วงจรนี้ใช้กับเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชันสำหรับวัดอัตรานับวัดสูง ๆ เท่านั้น

ข. การเหลื่อมซ้อนกันของสัญญาณ (pulse pileup) เมื่อใช้วัดอัตรานับวัดสูง ๆ เกิดจากสัญญาณศักย์ไฟฟ้ารวมกันเป็นสัญญาณเดียวกันมีอำพนเปลี่ยนไปจากสัญญาณเดิม สัญญาณนับวัดที่เกิดขึ้นทำให้การวัดพลังงานของรังสีผิดพลาดไป และมีค่านับวัดขาดหายไปเนื่องจากรีโซลวิงไทม์ (resolving time) ของระบบนับวัด ดังรูปที่ 2.15 ข.

ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นจากสองวิธีดังกล่าวแก้ไขโดย ลดความกว้างของสัญญาณที่ออกจากเครื่องขยายสัญญาณลง หรือลดค่าเวลาคงตัว (time constant) ลง ซึ่งมีข้อเสียคือทำให้กำลังแยกของพลังงานของสัญญาณลดลง จากเหตุผลดังกล่าวจึงอาจสรุปได้ว่า การวัดอัตรานับวัดสูง ๆ จะทำให้กำลังแยกของพลังงานของเครื่องนับวัดลดลง



รูปที่ 2.16 ก. แสดงสเปคตรัมของเทคนีเชียมเมื่อมีอัตรานับวัดต่ำ ๆ

ข. สเปคตรัมที่โฟโตพีคเลื่อนไปและขยายออกเนื่องจากการเหลื่อมซ้อนกันของสัญญาณและ baseline shift ในวงจรขยายเพื่อใช้วัดอัตรานับวัดสูง

2.6 เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ (Pulse Height Analyzer)

ธาตุกัมมันตรังสีแต่ละชนิดอาจให้รังสีแกมมาได้หลายค่าระดับพลังงาน ถ้ารังสีแกมมาเหล่านี้ชนผลึกและผลึกดูดกลืนพลังงานจากรังสีแกมมาไว้หมด ซึ่งเป็นปรากฏการณ์โฟโตอิเลกตริก การนับวัดจะถูกต้องที่สุด แต่รังสีแกมมาส่วนใหญ่ไม่ได้ผ่านเข้าผลึกหัวนับวัดโดยตรง รังสีเหล่านี้มีการสะท้อนหรือหักเหเมื่อไปชนวัตถุอื่นหรือสิ่งกีดขวางก่อนผ่านเข้ามาในผลึกนับวัด ทำให้เกิดโฟโตอิเลคตริกหรือการกระเจิงแบบคอมพ์ตันขึ้นในผลึก

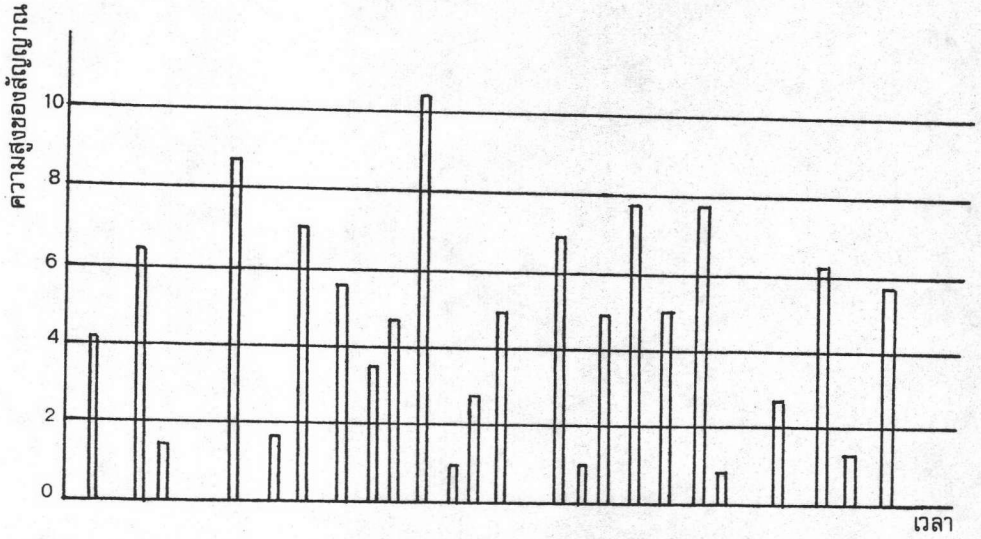
เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณมีหน้าที่คัดเลือกสัญญาณจากโฟโตอิเลคตริกที่เกิดจากรังสีแกมมาทำอันตรกิริยาในผลึกเท่านั้น ส่วนพลังงานที่แตกต่างจากโฟโตอิเลคตริกจะถูกตัดออก

เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณมี 2 แบบด้วยกันคือ

ก. แบบอินทิกรอล (Integral Pulse Height Analyzers) เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณชนิดนี้จะยอมให้สัญญาณที่มีอำพนสูงกว่าระดับที่ตั้งไว้ให้ผ่านเข้าเครื่องนับวัดได้ สัญญาณที่มีอำพนต่ำกว่าระดับที่ตั้งไว้จะถูกตัดหมด

ข. แบบดิฟเฟอเรนเทียล (Differential Pulse- Height Analyzers) ประกอบด้วยเครื่องแยกสัญญาณสองเครื่องต่อขนานกัน สัญญาณที่เกิดขึ้นทั้งหมดป้อนเข้าเครื่องแยกสองเครื่องพร้อม ๆ กัน เครื่องแรกนับเฉพาะสัญญาณที่มี อำพนสูงกว่า E_1 และอีกเครื่องหนึ่งจะนับเฉพาะสัญญาณที่มีอำพนสูงกว่า E_2 สัญญาณที่ออกจากเครื่องแยกสัญญาณทั้งสองถูกส่งเข้าวงจร Anticoincidence circuit ซึ่งจะนับเฉพาะสัญญาณที่มีอำพนระหว่าง E_1 และ E_2 เท่านั้น สัญญาณอื่น ๆ ถูกตัดทิ้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.17 ผลต่างของอำพนสัญญาณคือ E_1-E_2 เรียกว่าความกว้างของหน้าต่าง (window width)

เครื่องนับวัดรังสีแกมมาในปัจจุบันจะเลือกความกว้างของหน้าต่าง (window width) E_2-E_1 หรือ ΔE และระดับพลังงานที่จะวัด E (center line) ได้เลย มี E อยู่กึ่งกลางของ ΔE เมื่อเปลี่ยนค่า E ความกว้างของหน้าต่าง ΔE จะเลื่อนตาม เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณจะยอมให้ผ่านเฉพาะสัญญาณที่มีพลังงาน $E \pm \frac{\Delta E}{2}$ หรือ E ถึง $E+\Delta E$ ผ่านเข้าสู่ระบบแสดงผลดังรูป 2.18 เมื่อ E คือพลังงานที่โฟโตพีคของรังสีแกมมา ΔE ความกว้างของหน้าต่าง (energy window หรือ window width) เช่นการวัดรังสีแกมมา

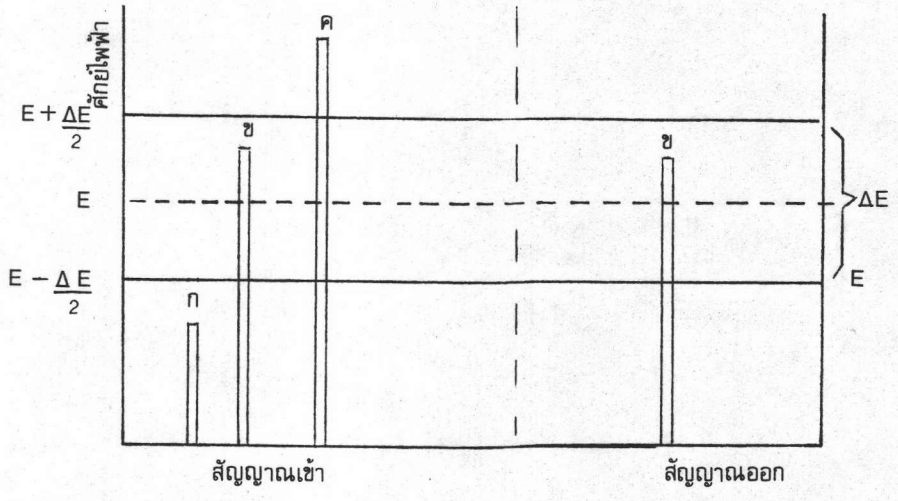


รูปที่ 2.17 ก. แสดงสเปคตรัมของสัญญาณที่เข้าสู่เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ ถ้ากำหนดความสูงของสัญญาณเท่ากับ 2 ในเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณแบบอินทิกรอลจะนับได้ 18 สัญญาณ

ข. ถ้า $E_1=2$ และ $E_2=6$ ในเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณแบบดิฟเฟอเรลเทียล จะนับได้ 10 สัญญาณ เป็นต้น

พลังงาน 140 keV จากเทคนีเซียม-99เอ็ม ใช้ความกว้างของหน้าต่าง 20% ซึ่งมีค่าเท่ากับ 28 keV เครื่องนับวัดย่อมนับวัดสัญญาณจากรังสีแกมมาที่มีค่าพลังงานระหว่าง 126-154 keV ส่วนสัญญาณจากรังสีแกมมามากกว่าหรือน้อยกว่านี้จะถูกตัดทิ้งหมด

i 17358267

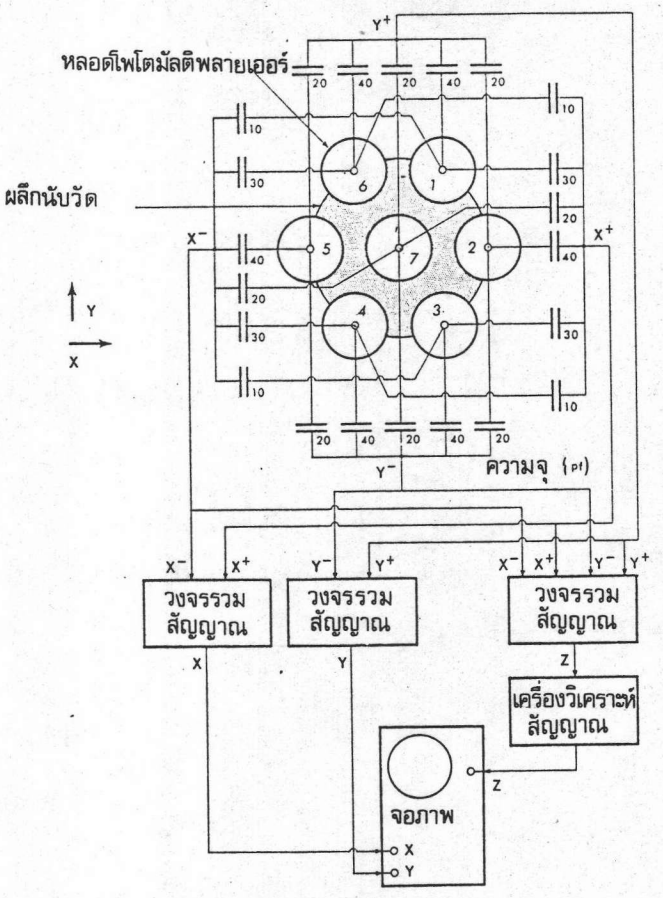


รูปที่ 2.18 การวิเคราะห์สัญญาณเมื่อผ่าน window เครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณจะยอมให้สัญญาณจากรังสีแกมมามีพลังงานระหว่าง $E \pm \frac{\Delta E}{2}$ เท่านั้นผ่านสู่ภาคแสดงผลของข้อมูล หรือให้สัญญาณจากรังสีแกมมามีพลังงาน E ถึง $E + \Delta E$ ผ่านเท่านั้น

ในเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมามีเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณทำหน้าที่คล้ายเครื่องนับวัดที่มีหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เพียงหลอดเดียว โดยสัญญาณที่เกิดจากทุกหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ในทุกควอเดรนทร์ของหัวนับวัดคือ สัญญาณ X^+, X^-, Y^+ และ Y^- ถูกรวมเป็นสัญญาณเดียวกันเรียกว่าสัญญาณ Z(Z-signal) ดังสมการ

$$Z = X^+ + X^- + Y^+ + Y^- \qquad \text{..... 2.4}$$

สัญญาณ Z จะถูกส่งเข้าเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณเพื่อคัดเลือกเฉพาะสัญญาณจากโฟโตพีคดังกล่าวมาแล้ว รูปที่ 2.19 แสดงสัญญาณ X^+, X^-, Y^+ และ Y^- ถูกรวมเป็นสัญญาณ Z เข้าเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ[7] ต่อไป



รูปที่ 2.19 แสดงการทำงานของเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชันประกอบด้วยหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์เจ็ดหลอด สัญญาณที่ออกจากแต่ละหลอดถูกแยกเป็นสัญญาณกำหนดตำแหน่งการเกิดซินทิลเลชันในผลึก X^+, X^-, Y^+, Y^- ซึ่งถูกรวมเป็นสัญญาณ X และ Y สำหรับกำหนดตำแหน่งซินทิลเลชันบนจอภาพ และถูกรวมเป็นสัญญาณ Z เข้าเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ

สัญญาณจากหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์แต่ละหลอดจะผ่านตัวเก็บประจุเพื่อแบ่งสัญญาณที่เกิดขึ้นออกเป็น 4 ชนิด คือ X^+, X^-, Y^+ และ Y^- ตามตำแหน่งของชินทิลเลชันในผลึกนับวัด ขนาดของสัญญาณจะแปรผันตามความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุแต่ละตัว เช่น หลอดหมายเลขหนึ่งจะกำหนดขนาดของสัญญาณ X^+ด้วยความจุ 30×10^{-12} ฟารัด สัญญาณ X^- ด้วยความจุ 10×10^{-12} ฟารัด สัญญาณ Y^+ ด้วยความจุ 40×10^{-12} ฟารัด และสัญญาณ Y^- ด้วยความจุเท่ากับศูนย์ ทำให้เกิดจุดบนจอภาพที่ตำแหน่ง X^+ ($X^+ > X^-$) และ Y^+ เท่านั้น หรือหลอดที่ 7 จะส่งสัญญาณทั้งสี่เท่ากัน เป็นต้น ดังนั้นถ้าเกิดชินทิลเลชันในผลึกนับวัดใต้หลอดที่สอง หลอดนี้จะรับแสงได้มากที่สุดเพราะอยู่ใกล้กว่าและมุมทรงตัน (solid angle) จะกว้างกว่าหลอดอื่นดังรูปที่ 2.7 . ส่วนหลอดที่ 1 , 3 และ 7 จะรับสัญญาณแสงได้น้อยลง และหลอด 4, 5 และ 6 จะรับแสงได้น้อยที่สุด หลอดที่ 2 ถูกต่อเข้ากับตัวเก็บประจุที่ที่มีค่ามากสำหรับสร้างสัญญาณ X^+ จึงให้สัญญาณ X^+ ออกมามากและให้สัญญาณ X^- มีค่าน้อย สัญญาณ Y^+ และ Y^- จะมีค่าปานกลางและมีขนาดเท่ากัน

สัญญาณทั้งสี่ชนิดจะรวมกันในวงจรคอมพิวเตอร์และสร้างสัญญาณขึ้นใหม่สามสัญญาณเพื่อกำหนดความสว่างของจุดบนจอภาพคือสัญญาณ Z และกำหนดตำแหน่งของจุดสว่างบนภาพ (X, Y) คือ

$$X = X^+ - X^- \qquad \text{..... 2.5}$$

$$Y = Y^+ - Y^- \qquad \text{..... 2.6}$$

ในหลอดที่สองพบว่าวงจรกำหนดตำแหน่งของสัญญาณ X มีค่ามากไปทางบวกเพราะสัญญาณ X^+ มีค่ามาก ส่วนสัญญาณ Y มีค่าเป็นศูนย์เพราะ Y^+ และ Y^- มีค่าเท่ากัน สัญญาณ X และ Y จะถูกส่งไปยัง X และ Y input ของวงจรออสซิลโลสโคปเพื่อแสดงตำแหน่งของภาพต่อไป

สัญญาณที่สามเป็นสัญญาณกำหนดความสว่างของชินทิลเลชันดังสมการ 2.4 คือ

$$Z = X^+ + X^- + Y^+ + Y^-$$

สัญญาณแซด (Z) เป็นตัวกำหนดอำพนของสัญญาณซึ่งจะถูกส่งเข้าเครื่องวิเคราะห์ความสูงของของสัญญาณเพื่อหาพลังงานของรังสีแกมมาดังกล่าวมาแล้วในตอนต้น

นอกจากนี้สัญญาณที่ได้รับนอกจากสัมพันธ์กับตำแหน่ง X และ Y แล้ว ยังขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาที่ผลึกได้รับ โดยสัญญาณที่กำหนดตำแหน่ง X และ Y ของรังสีแกมมาพลังงาน 140 keV จะมีแรงเคลื่อนไฟฟ้าครึ่งหนึ่งของสัญญาณจากรังสีแกมมาพลังงาน 280 keV เมื่อรังสีทั้งสองชนผลึกที่ตำแหน่งเดียวกัน ความแตกต่างของสัญญาณที่ขึ้นอยู่กับพลังงานของรังสีแกมมาสามารถกำจัดออกไปได้โดยหารสัญญาณ X และ Y ด้วยสัญญาณ Z เช่น เมื่อรังสีแกมมาพลังงาน 140 keV มีสัญญาณ X, Y และ Z คือ 0.01, 0.04 และ 0.14 โวลท์ ตามลำดับ นอร์มอลไลซ์ของสัญญาณ X และ Y หาได้จากการหารด้วยสัญญาณ Z คือ

$$X = \frac{0.01}{0.14} \qquad Y = \frac{0.04}{0.14}$$

$$= \frac{1}{14} \qquad = \frac{2}{7}$$

ถ้ารังสีแกมมาพลังงาน 280 keV มีสัญญาณ X, Y และ Z เป็น 0.04, 0.08 และ 0.28 โวลท์ ตามลำดับจะให้สัญญาณที่นอร์มอลไลซ์แล้ว

$$X = \frac{0.04}{0.28} \qquad Y = \frac{0.08}{0.24}$$

$$= \frac{1}{7} \qquad = \frac{1}{3}$$

สัญญาณ X และ Y ที่นอร์มอลไลซ์แล้วจึงเป็นสัญญาณที่กำหนดตำแหน่งของการเกิดชินทิลเลชันในผลึกเท่านั้นไม่เปลี่ยนแปลงตามพลังงานของรังสีแกมมาแต่ละโฟตอนที่ผลึกดูดกลืนไว้ สัญญาณ X และ Y ส่งไปยังหลอดแคโธดเพื่อกำหนดจุดบนจอภาพต่อไป[8, 32]

2.7 ภาคแสดง

สัญญาณจากรังสีแกมมาที่แยกพลังงานเรียบร้อยแล้วจะแสดงออกมาเป็นค่านับวัดและอัตรานับวัด ภาคแสดงมีหลายแบบด้วยกันได้แก่สเกเลอร์ เรตมิเตอร์ และการแสดงภาพ เป็นต้น

ก. สเกเลอร์ เป็นภาคแสดงที่จะแสดงออกมาเป็นตัวเลขค่านับวัดของสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ

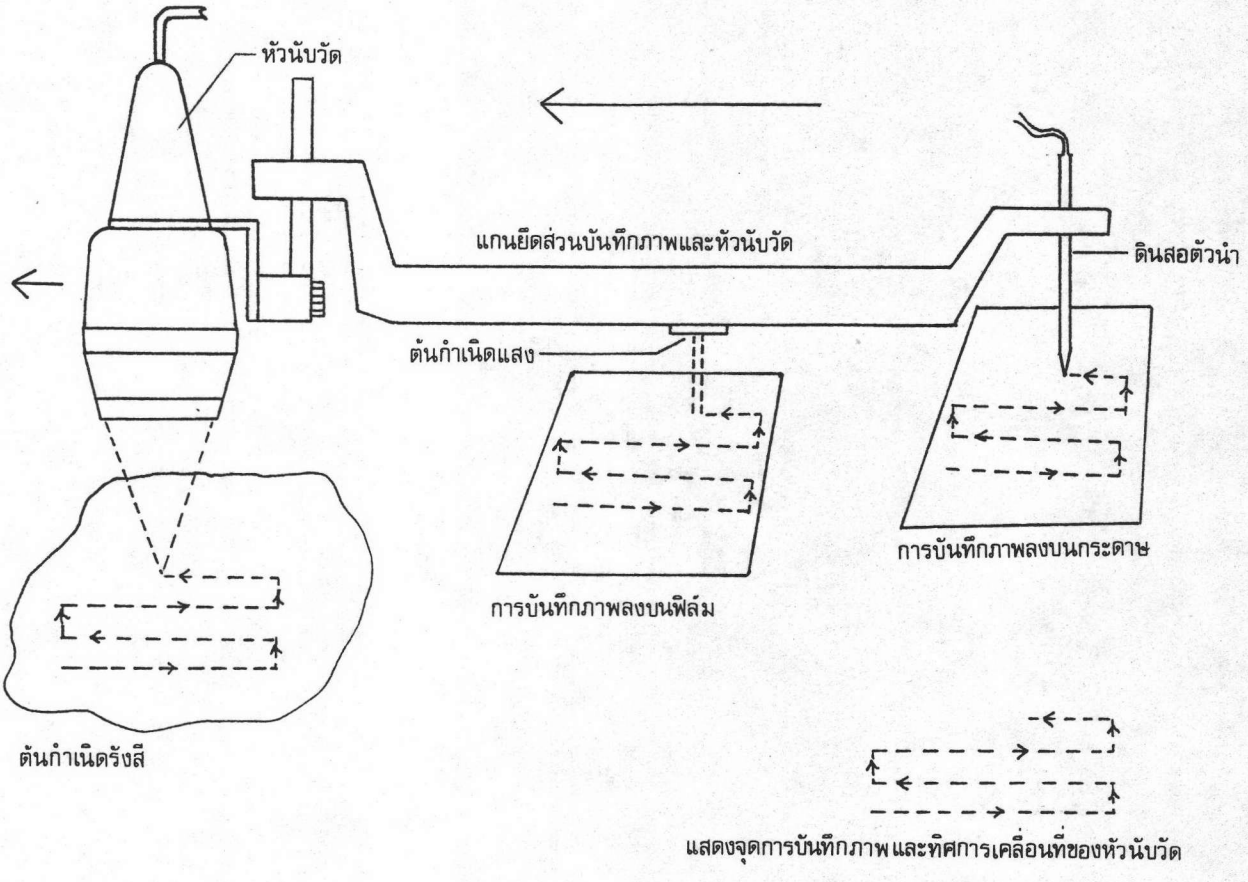
ข. เรตมิเตอร์ เรตมิเตอร์มีลักษณะเป็นหน้าปัด มีเข็มแสดงอัตรานับวัดของสัญญาณที่ออกมาจากเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณ

ค. การสร้างภาพ เครื่องมือสร้างภาพทางเวชศาสตร์นิวเคลียร์มี 2 ชนิด คือ เรคติลิเนียร์สแกนเนอร์และเครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมามีการทำงานแตกต่างกันคือ

2.7.1 ระบบสร้างภาพของเครื่องมือสร้างภาพเรคติลิเนียร์สแกนเนอร์

ระบบการสร้างภาพของเครื่องสแกนเนอร์ประกอบด้วยระบบขับเคลื่อนของหัวนับวัดและระบบบันทึกภาพลงบนฟิล์มและกระดาษ

ก. ระบบขับเคลื่อน (Mechanical driving system) หัวนับวัดและระบบบันทึกภาพของเครื่องสแกนเนอร์บันทึกภาพบนกระดาษหรือบนฟิล์มติดอยู่บนแกนเดียวกันและเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กัน ระบบบันทึกภาพจะบันทึกจุดลงบนฟิล์มหรือกระดาษทันทีที่เกิดซินทิลเลชันในหัวนับวัด ตำแหน่งของจุดบนภาพจะสอดคล้องกับตำแหน่งของจุดที่รังสีแกมมาจากต้นกำเนิดรังสีเข้าหัวนับวัด ระบบขับเคลื่อนจะเคลื่อนที่กลับไปมาและเคลื่อนที่ในแนวตั้งฉากกับทิศการสแกนโดย



ภาพที่ 2.20 แสดงหัวนับวัดและระบบบันทึกภาพของเครื่องสแกนเนอร์ลงบนฟิล์มบันทึกภาพและกระดาษบันทึกภาพ มีแกนยึดหัวนับวัดและระบบบันทึกภาพให้เคลื่อนที่ไปพร้อมๆ กัน

บันทึกภาพทีละจุดจนครบทั้งภาพดังรูปที่ 2.20 การกระจายของจุดในภาพนี้จะแสดงความเข้มข้นของสารกัมมันตรังสีที่สะสมอยู่ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ภายในต้นกำเนิดรังสีที่นับวัด

ระบบขับเคลื่อนจะต้องมีความเร่งสูงเพื่อให้สามารถเลือกอัตราเร็วต่าง ๆ ที่เหมาะสมกับการทดสอบ อัตราเร็วต้องมีความถูกต้องแน่นอนและผู้ใช้เครื่องมือสามารถปรับให้ระบบขับเคลื่อน เคลื่อนที่หรือหยุดได้ตามต้องการ ในยุคแรกระบบขับเคลื่อนใช้มอเตอร์กระแสตรงซึ่งสามารถปรับอัตราเร็วและทิศการสแกนได้ง่าย แต่อัตราเร็วไม่แน่นอน มีค่าคลาดเคลื่อนไป $\pm$ 10%[8] หรือมากกว่านั้น ทำให้ภาพที่ได้จากต้นกำเนิดรังสีที่สม่ำเสมอเกิดความแปรปรวนของอัตรานับวัดขึ้น ในปัจจุบันระบบสแกนเนอร์ใช้พัลสเตพพิง มอเตอร์ (pulse stepping motor) หรือซินโครนัสมอเตอร์ (synchronous motor) ขนาดใหญ่ซึ่งมีระบบอิเลคทรอนิคควบคุมอัตราเร็วในการขับเคลื่อนของมอเตอร์ ทำให้อัตราเร็วของการสแกนถูกต้องขึ้น

ข. <u>ระบบบันทึกภาพของเครื่องสแกนเนอร์</u> สัญญาณจากเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณจะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณแสงมีลักษณะจุดกลมหรือสี่เหลี่ยมเล็ก ๆ บันทึกลงบนฟิล์มเอกซเรย์ จากหลอดแคโธดเล็ก ๆ ผลิตแสงในช่วงความถี่ที่มีความไวต่อฟิล์มเอกซเรย์นั้น ขนาดของช่องที่ยอมให้แสงผ่านจะต้องสอดคล้องกับระยะระหว่างแถวของจุดที่สแกนเพื่อป้องกันการเหลื่อมล้ำกันของจุดในแถวที่ใกล้เคียงกันและขึ้นอยู่กับขนาดของอวัยวะที่จะวัดด้วย สำหรับภาพบนกระดาษเกิดจากสัญญาณไฟฟ้าจากค่านับวัดกลายเป็นกระแสไฟฟ้าผ่านแท่งดินสอตัวนำ (stylus) ลงบนกระดาษบันทึกภาพที่เป็นตัวนำเหมือนกัน (Teledeltos paper) ขณะดินสอตัวนำเคลื่อนที่ผ่าน แต่ละจุดบนกระดาษบันทึกภาพแทนจำนวนค่านับวัดคงที่ (dot factor) จำนวนหนึ่งซึ่งได้เลือกไว้

คุณภาพของภาพขึ้น อยู่กับหลายแฟคเตอร์เช่น อัตราเร็วการสแกน ระยะระหว่างแถวของจุด ขนาดของจุดในภาพ ความเข้มของภาพ ค่าเวลาคงตัว dot factor กำลังขยายของภาพ เป็นต้น

2.7.1.1 <u>การควบคุมระบบการบันทึกภาพ</u> ภาพที่ปรากฏออกมาจะมีคุณภาพหรือไม่ต้องคำนึงถึงแฟคเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง[5] ดังนี้

1. อัตราเร็ว ถ้าเลือกอัตราเร็วในการสแกนต่ำภาพที่ปรากฏออกมาจะมีรายละเอียดและความคมชัดของภาพแน่นอน เพราะว่าสามารถบันทึกภาพการเกิดชินทิลเลชันลงบนฟิล์มเอกซ์-เรย์ได้มาก อัตราเร็วในการสแกนของหัวนับวัดควรมีค่าน้อยสุดเท่าที่ผู้ป่วยและเวลาการใช้

เครื่องสแกนเนอร์จะอำนวยให้ การใช้อัตราเร็วในการสแกนต่ำทำให้การบันทึกรายละเอียดของแต่ละภาพได้ครบแต่ใช้เวลานาน

2. อัตรานับวัด ภาพสแกนจะให้รายละเอียดและความคมชัดได้ดี เมื่อใช้สารกัมมันตรังสีมีความเข้มมาก ๆ และค่านับวัดสูง อย่างไรก็ตามการใช้สารกัมมันตรังสีสำหรับวินิจฉัยโรคจะต้องคำนึงถึงขนาดและการสะสมของสารกัมมันตรังสีภายในอวัยวะผู้ป่วยและปริมาณรังสีที่ผู้ป่วยได้รับด้วยเสมอ

3. ความหนาแน่นของการเกิดซินทิลเลชัน (Information Density) ภาพที่แสดงรายละเอียดและความคมชัดมากจะต้องมีความหนาแน่นของการเกิดซินทิลเลชันเกินกว่า 800 ครั้งต่อตารางเซนติเมตร และรายละเอียดต่าง ๆ จะขาดหายไปเมื่อความหนาแน่นต่ำกว่า 800 ครั้งต่อตารางเซนติเมตร ความหนาแน่นของการเกิดซินทิลเลชันมีความสัมพันธ์กับแฟคเตอร์อื่น ๆ คือ

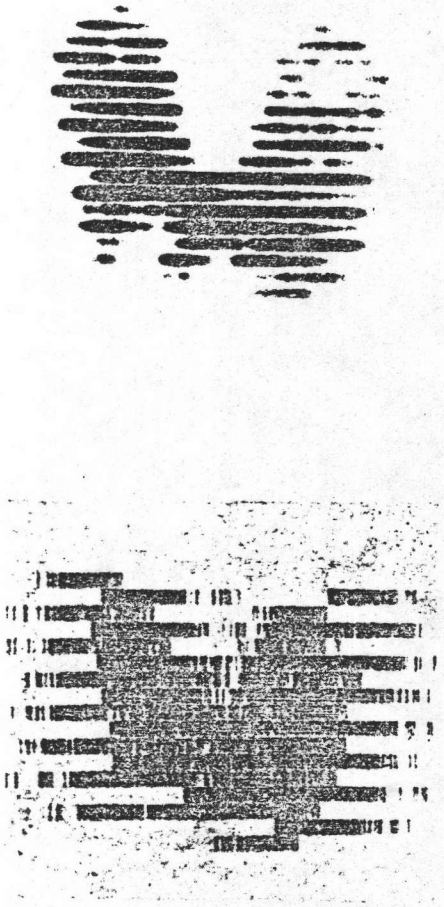
$$\text{ความหนาแน่นของการเกิดซินทิลเลชัน (I.D.)} = \frac{\text{อัตรานับวัด (cpm.)}}{\text{อัตราเร็วการสแกน (cm/min)} \times \text{ระยะระหว่างแถว (cm)}} \quad \ldots.2.7$$

4. การเลือกใช้คอลลิเมเตอร์ ถ้าหัวนับวัดมีคอลลิเมเตอร์ที่มีกำลังแยกสูงสามารถแสดงภาพของวัตถุขนาดเล็กและสามารถแสดงรายละเอียดของภาพบริเวณที่มีกัมมันตภาพแตกต่างกันได้ แต่ต้องใช้เวลาในการสแกนมากและใช้สารกัมมันตรังสีจำนวนมาก หัวนับวัดที่ใช้คอลลิเมเตอร์กำลังแยกสูงจะมีประสิทธิภาพในการนับวัดจำนวนซินทิลเลชันต่ำเพราะมีความหนาของผนังช่องคอลลิเมเตอร์จำนวนมากกั้นรังสีที่เข้าสู่ผลึกหัวนับวัด จากสาเหตุเหล่านี้ทำให้มีอัตรานับวัดต่ำและให้ข้อมูลน้อย ภาพที่ดีถูกสร้างขึ้นจะมีความคมชัดดีเมื่อพื้นที่ของระนาบโฟกัสมีขนาดเล็กกว่าขนาดของวัตถุหรืออวัยวะที่วัด

5. ความเข้มของฟิล์มบันทึกภาพ การบันทึกภาพด้วยแสงบนฟิล์มที่มีความเข้มพอเหมาะอาจควบคุมได้หลายวิธี คือ การควบคุมขนาดของช่องที่แสงผ่านไม่ให้ภาพจุดความเข้มเหลื่อมกับจุดความเข้มในแถวใกล้เคียงกัน มีการเพิ่มความเข้มของแสงให้สอดคล้องกับการตอบสนองของฟิล์มบันทึกภาพและอัตรานับวัดซึ่งอาจมีขนาดใกล้เคียงกัน เช่นการควบคุมการเพิ่มความเข้มที่ 50% หมายความว่า อัตรานับวัดที่เกิน 50% ของโฟโตพีคจะมีความเข้มบนฟิล์ม

ได้ชัด ส่วนอัตรานับวัดต่ำกว่า 50% ของโฟโตพีคจะมีความเข้มบนฟิล์มต่ำ

สถาบันวิทยบริการ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.21 แสดง Scalloping การสแกนที่มีแถวเหลื่อมออกจากแถวข้างเคียงตามทิศของการสแกนเกิดจากการใช้ค่าเวลาคงตัวนานมากเกินไปไม่สัมพันธ์กับอัตรานับวัดและอัตราเร็วในการสแกน

ความเข้มของจุดบนฟิล์มสามารถกำหนดได้จากความสว่างของแสงที่ใช้บันทึกลงบนฟิล์ม โดยกำหนดความสว่างของหลอดไฟฟ้าได้จากช่วงเวลาในการเปิดหลอดไฟ (Duration) [5] ซึ่งมีความสัมพันธ์ดังสมการ

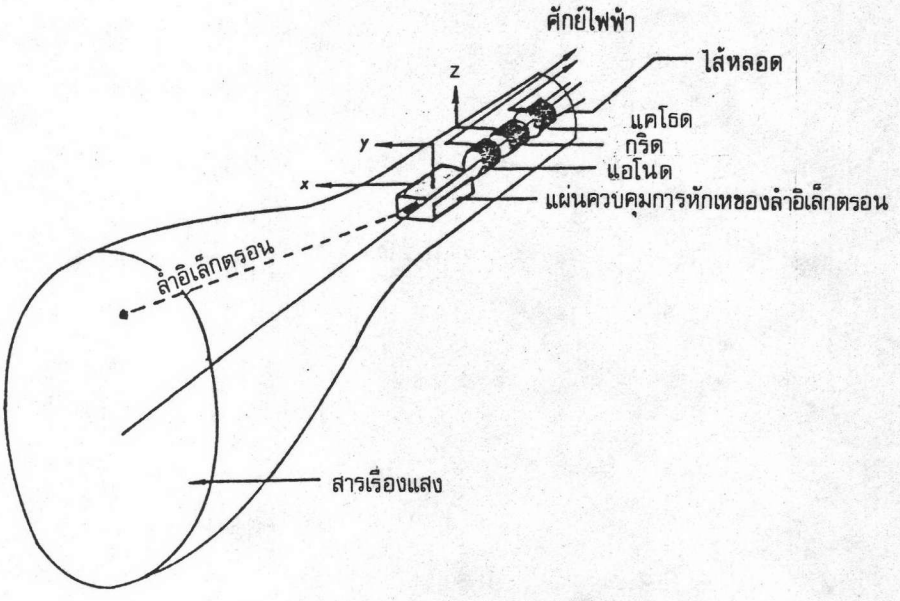
$$\text{เวลาที่หลอดไฟสว่าง} = \frac{C \times \text{อัตราเร็วการสแกน}}{\text{อัตรานับวัดมากสุด (cpm)}} \quad \ldots\ldots\ldots\ 2.8$$

เมื่อ C เป็นค่าคงที่สำหรับกำหนดช่วงเวลาการสว่างของแสงเช่นในเครื่อง Magnascanner 500 มีค่า C = 4000 เป็นต้น

6. ค่าเวลาคงตัว (time constant) ในการหาอัตรานับวัดที่แน่นอนจะต้องเลือกค่าเวลาคงตัวนาน ๆ (long time constant) อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ค่าเวลาคงตัวจะต้องสัมพันธ์กับอัตรานับวัดจากตำแหน่งต่าง ๆ ของภาพและอัตราเร็วของการสแกนด้วย เครื่องสแกนเนอร์ใช้เรตมิเตอร์แบบแอนาลอกจำเป็นต้องเลือกเอาระหว่างความแน่นอนของข้อมูลและข้อมูลที่ให้ภาพมีลักษณะที่ดี การใช้ค่าเวลาคงตัวนานเกินไปทำให้การบันทึกค่านับวัดลงในภาพช้ากว่าอัตราเร็วการสแกนของหัวนับวัดภาพที่ปรากฏจะเหลื่อมกัน (scalloping) ดังรูปที่ 2.21

2.7.2 <u>ระบบสร้างภาพของเครื่องมือถ่ายภาพรังสีแกมมา</u> ซึ่งแบ่งออกเป็น

<u>หลอดรังสีแคโธดแสดงภาพ</u> เมื่อสัญญาณ z ออกจากเครื่องวิเคราะห์ความสูงของสัญญาณมาแล้วจะไปลดศักย์ไฟฟ้าที่กริด (grid) ของหลอดรังสีแคโธด ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่จากแคโธดสู่แอโนดได้สะดวกมีความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ใช้เร่งอิเล็คตรอนระหว่างขั้วบวกและลบคือ 4,000 โวลท์ ขณะเดียวกันสัญญาณแสดงตำแหน่ง X และ Y จะถูกส่งไปควบคุมการเบนของลำอิเล็กตรอนในแนวราบและแนวดิ่งให้ลำอิเล็กตรอนเบนไปตกบนจอภาพในตำแหน่งเดียวกับตำแหน่งที่เกิดซินทิลเลชันในผลึกที่หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์แต่ละหลอดรับไว้ ที่จอภาพของหลอดรังสีแคโธดฉาบไว้ด้วยสารเรืองแสงทำให้เกิดจุดสว่างได้เมื่อถูกชนด้วยอิเล็กตรอน สีของจุดสว่างจะขึ้นอยู่กับสารเรืองแสงที่ฉาบไว้ในหลอดรังสีแคโธด ดังนั้นการเลือกใช้ฟิล์มบันทึกภาพจากหลอดรังสีแคโธด จะต้องเป็นฟิล์มที่มีความไวมากที่สุดต่อสีของจุดสว่างบนหลอดรังสีแคโธดด้วย จุดสว่างนี้มีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.02 ซม. และการถ่ายภาพที่พอเหมาะแสงสว่างแต่ละจุดที่เกิดขึ้นบนฟิล์มจะต้องใช้เวลาบันทึกภาพไม่น้อยกว่า 4×10^{-6} วินาที



รูปที่ 2.22 แสดงส่วนประกอบของหลอดรังสีแคโธดซึ่งเป็นจอแสดงภาพ สัญญาณ X และ Y จะบังคับทิศทางของลำอิเล็กตรอนให้ชนจอภาพในตำแหน่งเดียวกับการเกิดซินทิล-เลชันในผลึกนับวัด

ในระบบของเครื่องถ่ายภาพบางเครื่องจะมีระบบขยายภาพเพิ่มขึ้น เช่น อวัยวะที่จะศึกษามีขนาดเล็ก พื้นที่ผิวของหัววัดส่วนใหญ่ไม่ได้ใช้ประโยชน์ กำลังขยายของเครื่องถ่ายภาพช่วยให้ภาพของอวัยวะเล็ก ๆ ถูกขยายใหญ่ขึ้น การขยายภาพแบ่งได้สองวิธี

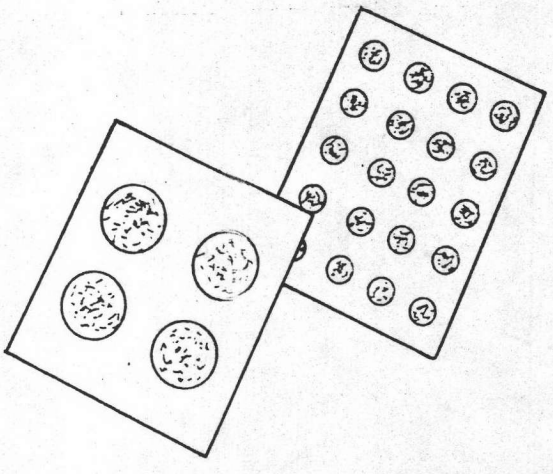
วิธีแรกเมื่อสัญญาณเอกซ์และวายผ่านสู่หลอดแคโธด ซินทิลเลชันที่เกิดขึ้นบริเวณกลางผลึกจะถูกขยายให้เต็มจอภาพ ส่วนสัญญาณที่ชนขอบนอกของผลึกจะเกิดอยู่ที่ขอบนอกของจอภาพ ระบบนี้สามารถเปลี่ยนแปลงกำลังขยายของภาพได้มากสุดตามโรงงานผลิตกำหนดไว้ ข้อเสียของกำลังขยายแบบนี้คือจำนวนค่านับวัดทั้งหมดที่ใช้สร้างภาพน้อยกว่าค่านับวัดที่ผลึกซินทิลเลชันวัดได้เพราะได้ตัดค่านับวัดบางค่าที่เกิดรอบ ๆ วัตถุทิ้งไป

วิธีที่สองเลือกพื้นที่วงกลมรอบจุดกึ่งกลางของผลึกรัศมีคงที่ ระบบอิเลคทรอนิคจะตัดสัญญาณเอกซ์และวายที่เกิดขึ้นบนผลึกและอยู่นอกพื้นที่ที่เลือกไว้ออกไป ส่วนสัญญาณที่เกิดขึ้นในพื้นที่รอบจุดศูนย์กลางผลึกที่เลือกไว้จะถูกปรับให้เกิดภาพเต็มจอของหลอดรังสีแคโธด ข้อดีของ

ระบบนี้คือระบบอิเลคทรอนิคของเครื่องถ่ายภาพจะรับภาพที่มีพื้นที่น้อย ๆ และค่านับวัดที่ได้จากขอบนอกของผลึกจะถูกตัดทิ้งไปทำให้ค่านับวัดทั้งหมดของเครื่องถ่ายภาพ ถูกบันทึกลงในหลอดเคโธดและภาพถ่ายหมด ข้อเสียของระบบนี้คือมีกำลังขยายคงที่เปลี่ยนแปลงไม่ได้

หลอดรังสีแคโธดชนิดสะสมภาพ (persistance cathod-ray tube) เป็นจอแสดงภาพชนิดหนึ่งของเครื่องถ่ายภาพซินทิลเลชัน ซึ่งมีลักษณะพิเศษที่สามารถรวบรวมจุดของซินทิลเลชันทั้งหมดของเครื่องถ่ายภาพให้เกิดภาพบนจอภาพได้นาน ภาพที่ได้จากจอภาพชนิดนี้มีคุณภาพ ความสม่ำเสมอ กำลังแยกและระดับความเข้มของภาพต่ำไม่เหมาะที่จะบันทึกภาพลงบนฟิล์ม จอภาพชนิดนี้มีประโยชน์ในการจัดตำแหน่งของผู้ป่วยก่อนถ่ายภาพลงบนฟิล์มเอกซ์เรย์

ระบบผลิตภาพหลายภาพบนฟิล์มเดียวกัน ในการศึกษาการกระจายของสารกัมมันตรังสีในอวัยวะผู้ป่วยปริมาณกัมมันตภาพจะมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับเวลา ทำให้มีการพัฒนาขบวนการสร้างภาพขึ้นเพื่อถ่ายภาพกัมมันตรังสีในอวัยวะผู้ป่วยในช่วงเวลาต่าง ๆ ต่อเนื่องกัน การทำงานของระบบนี้ใช้หลอดรังสีแคโธดสร้างภาพของจุดจากสัญญาณเอกซ์ วาย และ แซดจากเครื่องถ่ายภาพ ความแตกต่างของภาพจะเกิดขึ้นที่ละน้อยตามลำดับ และระบบอิเลคทรอนิคจะสร้างภาพโดยอัตโนมัติ ณ ตำแหน่งต่าง ๆ บนจอภาพของหลอดรังสีแคโธด เช่น เมื่อเลือกสร้างภาพชนิดสี่ภาพบนฟิล์มเดียวกัน ภาพที่เกิดขึ้นบนจอภาพจะลดขนาดลงเหลือหนึ่งในสี่ของชนิดภาพเดี่ยว ระบบอิเลคทรอนิคจะสร้างภาพแรกลงในควอแดรนท์แรกของหลอด ภาพต่อมาจะถูกสร้างขึ้นในควอแดรนท์ที่สอง สาม และ สี่ตามลำดับ ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 การบันทึกภาพหลายภาพบนฟิล์มเดียวกัน

เครื่องถ่ายภาพรังสีแกมมาแต่ละเครื่องอาจมีระบบลดขนาดของภาพแตกต่างกัน เช่น บางชนิดจะใช้หลอดที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาดใหญ่ บางชนิดใช้หลอดที่สร้างภาพซึ่งมีขนาดของจุดเล็กลง และบางชนิดอาจเพิ่มระบบของเลนซ์ที่สามารถปิดและเปิดตามลำดับกันเพื่อสร้างภาพจำนวนมาก ๆ โดยไม่ต้องลดขนาดของภาพจากหลอดรังสีแคโธดลงถึงหนึ่งส่วนสี่เท่า เนื่องจากเทคนิคในการถ่ายภาพชนิดหลายภาพบนฟิล์มเดียวกันแตกต่างกันหลายวิธี การเปรียบเทียบขนาดของจุดบนหลอดแคโธดจากผู้ผลิตต่าง ๆ กันจึงยังไม่เพียงพอที่จะตัดสินคุณภาพของภาพที่ปรากฏบนฟิล์มได้ องค์ประกอบหนึ่งซึ่งต้องใช้พิจารณาระบบการสร้างภาพหลาย ๆ ภาพคือการทำงานจะลดลงเนื่องจากเดดไทม์ (dead time) ของระบบ[17-26] การลดการทำงานของระบบอีกวิธีหนึ่งเกิดจากเทคนิคในการหักเหลำอิเล็คตรอนในหลอดรังสีแคโธด ระบบอิเลคทรอนิคของระบบผลิตภาพนี้มีข้อดีสามารถบันทึกภาพที่มีการเคลื่อนที่ได้เร็วและให้ภาพบนฟิล์มที่มากพอจะนำไปใช้ประโยชน์ได้