

บทที่ 3

ตัวตรวจจับเอ็กซเรย์และสารเรืองแสง

3.1 บทนำ

เอ็กซเรย์คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบหนึ่งที่มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง ดังนั้นเอ็กซเรย์จึงมีคุณสมบัติที่คล้ายคลึงกับแสง เช่น เคลื่อนที่เป็นเส้นตรง ถ้าเคลื่อนที่ในสุญญากาศจะมีความเร็วเท่ากับแสง คุณสมบัติของการสะท้อนกลับ หักเหและเลี้ยวเบน แต่ในการวัดพลังงานจะไม่เหมือนกับแสงต่างๆ ไปที่จะวัดอนุภาคของแสงหรือโฟตอน การวัดพลังงานของเอ็กซเรย์สามารถทำได้โดยตัวตรวจจับจะต้องได้รับพลังงานทั้งหมดของเอ็กซเรย์จากนั้นตัวตรวจจับเกิดการเปลี่ยนแปลงและเมื่อทำการวัดถึงความเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นจะทำให้ทราบถึงพลังงานของเอ็กซเรย์ที่ตกกระทบกับตัวตรวจจับได้ ในกระบวนการการทำงานตัวตรวจจับแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันไปตามแต่วิธีการของตัวตรวจจับ แต่อย่างไรก็ตามตัวตรวจจับเหล่านี้จะมีคุณสมบัติพื้นฐานที่เหมือนกัน อย่างเช่น ค่าประสิทธิภาพ (efficiency) การกระจายตัวของพลังงาน (energy resolution) โหมดการทำงานและวิธีการบันทึกข้อมูลซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของงานที่นำตัวตรวจจับไปใช้

3.2 ชนิดของตัวตรวจจับเอ็กซเรย์

ตัวตรวจจับเอ็กซเรย์สามารถแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบ นั่น คือ แบ่งตามรูปแบบโครงสร้าง และแบ่งตามรูปแบบของชนิดข้อมูลที่ต้องการวัด [2]

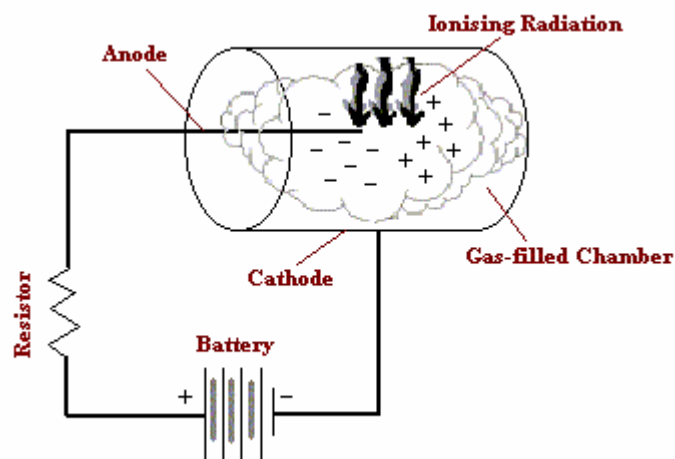
3.2.1 แบ่งตามโครงสร้าง

โครงสร้างโดยทั่วไปของตัวตรวจจับเอ็กซเรย์นั้นมี 3 ชนิด ดังต่อไปนี้

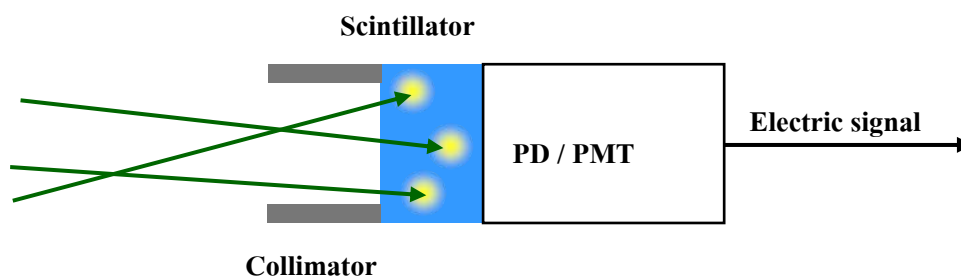
ชนิดก๊าซ (Gas-filled Detector) ตัวตรวจจับชนิดนี้ ภายในจะบรรจุก๊าซที่สามารถแตกตัวเป็นประจุไฟฟ้าบวก และลบได้เมื่อมีเอ็กซเรย์เข้ามาปะทะ ประจุไฟฟ้าที่แตกตัวจะก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าขนาดต่างๆกัน ขึ้นกับปริมาณของเอ็กซเรย์ที่เข้ามา ตัวตรวจจับลักษณะนี้ได้แก่ Ionization Chambers ,Proportional Counters ,Geiger-Mueller Counter เป็นต้น ดังรูปที่ 3.1

ชนิดเคลือบด้วยสารเรืองแสง (Scintillation Detector) ตัวตรวจจับชนิดนี้ จะใช้การแปลงเอ็กซเรย์ให้กลายเป็นแสงที่อุปกรณ์สามารถวัดและแปลงเป็นสัญญาณได้ สารเรืองแสงนี้จะมีหลายชนิด และให้แสงที่มีสีแตกต่างกันไป ดังนั้นต้องทำการเลือกสารเรืองแสงให้เหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ใช้งาน ตัวตรวจจับชนิดนี้เป็นชนิดที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งจะทำการกล่าวถึงในรายละเอียดต่อไป ตัวตรวจจับลักษณะนี้ได้แก่ ฟิล์มเอ็กซเรย์ เป็นต้น ดังรูปที่ 3.2

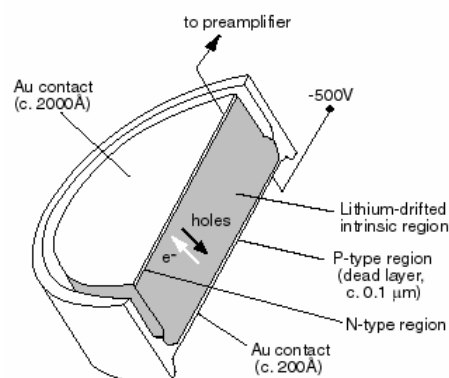
ชนิดสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Detector) ตัวตรวจจับชนิดนี้ จะใช้สารเรืองแสงเอ็กซเรย์ มาอัดจนเป็นผลึก แล้วนำมาผิบบนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดสารกึ่งตัวนำ ทำให้ได้ประสิทธิภาพที่ดีว่าชนิดอื่นๆ และเป็นที่ยอมรับแพร่หลายมากในปัจจุบัน ดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.1 แสดงตัวตรวจจับเอ็กซเรย์ชนิดก๊าซ



รูปที่ 3.2 แสดงตัวตรวจจับชนิดเคลือบด้วยสารเรืองแสง



รูปที่ 3.3 แสดงตัวตรวจจับชนิดสารกึ่งตัวนำ

3.2.2 แบ่งตามชนิดของข้อมูลที่ต้องการวัด

สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดเช่นเดียวกัน นั่นคือ

Counters เป็นการวัดในลักษณะนับจำนวนพัลส์ หรือจำนวนสัญญาณที่เข้ามาว่ามากน้อยเพียงใด ตัวตรวจจับลักษณะนี้ได้แก่ Geiger-Mueller Counter เป็นต้น



รูปที่ 3.4 แสดงตัวตรวจจับแบบ Counters

Spectrometers เป็นการวัดการกระจายของพลังงานที่เกิดขึ้น ตัวตรวจจับลักษณะนี้ได้แก่ NaI Scintillation Detectors เป็นต้น



รูปที่ 3.5 แสดงตัวตรวจจับแบบ Spectrometers

Dosimeters เป็นการวัดโดส ซึ่งเป็นปริมาณรังสีที่ได้รับต่อหน่วย หน่วยนี้อาจจะเป็นเวลา หรือ มวล

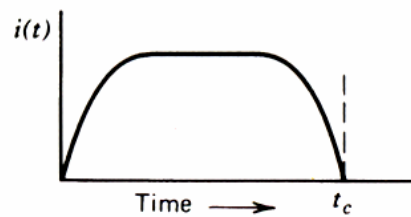


รูปที่ 3.6 แสดงตัวตรวจจับสนาม Dosimeter

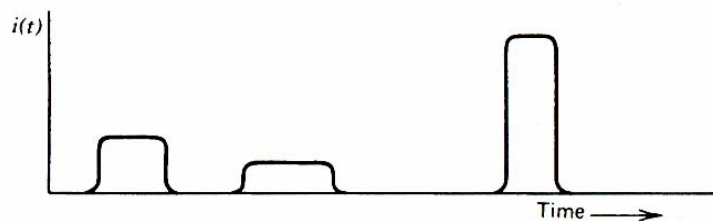
3.3 รูปแบบจำลองของตัวตรวจจับสนามพื้นฐาน [7]

ถ้าสมมติให้ตัวตรวจจับสนามสามารถตรวจจับสนามการแผ่รังสีได้ บางชนิดเท่านั้น สิ่งแรกที่ต้องให้ความสนใจก็คือ การทำปฏิกิริยากับอนุภาคเดี่ยวหรือควอนตัม (Quantum) ภายในตัวตรวจจับสนามเมื่อได้รับการแผ่รังสี ตัวอย่างเช่น อนุภาคเดี่ยวของรังสีแอลฟา (Alpha) หรือ อาจจะเป็นโปรตอนของรังสีแกมมา (Gamma – ray Photon) ในการที่ตัวตรวจจับสนามจะมีความสามารถในการตอบสนองต่อการแผ่รังสีทั้งหมดได้ การแผ่รังสีจะต้องทำปฏิกิริยากับโครงสร้างภายในตัวตรวจจับสนามและการทำปฏิกิริยานั้น จะต้องหยุดลงอย่างรวดเร็ว (โดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10^{-9} วินาทีในก๊าซ และ 10^{-12} ในของแข็ง) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วช่วงเวลาที่เกิดปฏิกิริยานี้มีค่าสั้นมาก ดังนั้นจึงมีการพิจารณาว่าการตอบสนองของตัวตรวจจับสนามต่อพลังงานที่เกิดจากการแผ่รังสีนั้นเกิดขึ้นอย่างทันทีทันใด

ผลที่ได้จากตัวตรวจจับสนามเมื่อทำปฏิกิริยากับการแผ่รังสีก็คือ ประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจจับสนามในส่วนที่ได้รับการกระตุ้น ถ้าสมมติให้แบบจำลองของตัวตรวจจับสนามมีค่าประจุ Q เกิดขึ้นที่เวลา $t = 0$ เมื่อทำปฏิกิริยากับอนุภาคเดี่ยว หรือ ควอนตัมของการแผ่รังสี ซึ่งประจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้จะเกิดการสะสมอยู่ในรูปของสัญญาณทางไฟฟ้า โดยทั่วไปการสะสมประจุนี้จะเกิดขึ้นภายใต้แรงจากสนามไฟฟ้าภายในตัวตรวจจับสนาม ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ประจุบวกและลบที่เกิดขึ้นมีการเดินทางในทิศทางตรงกันข้าม ช่วงเวลาที่ให้ในการเก็บประจุที่เกิดขึ้นได้ทั้งหมดขึ้นอยู่กับชนิดของตัวตรวจจับสนาม



รูปที่ 3.7 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแสโดยที่ t_c แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ



รูปที่ 3.8 แสดงการแผ่รังสีที่มีช่วงเวลาใกล้เคียงกัน

ตัวอย่างเช่น ion chambers ใช้เวลาอยู่ในช่วง 10^{-3} วินาที แต่ถ้าเป็นตัวตรวจจับที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำประเภทไดโอด จะใช้เวลาประมาณ 10^{-9} วินาที ค่าเหล่านี้สะท้อนถึงความเร็วของประจุพาหะภายใต้ตัวตรวจจับที่ได้รับการกระตุ้นและระยะทางเฉลี่ยที่ต้องเดินทางของประจุก่อนที่จะถึงขั้วไฟฟ้า (electrodes)

ถ้าพิจารณาจากแบบจำลองของตัวตรวจจับการตอบสนองต่ออนุภาคเดี่ยวหรือควอนตัมที่เกิดจากการแผ่รังสีจะเป็นกระแสที่ไหลในช่วงเวลาที่มีค่าเท่ากับเวลาในการเก็บประจุทั้งหมด รูปที่ 3.7 แสดงค่าเวลาที่เกิดกระแสโดยที่ t_c แทนเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุ

$$\int_0^{t_c} i(t) dt = Q \quad (3.1)$$

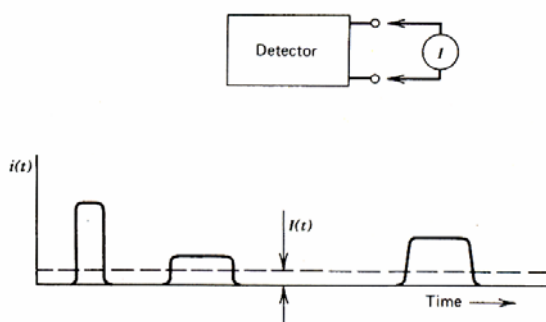
จาก (3.1) แสดงค่าผลรวมของประจุ (Q) ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 0 ถึง t_c ในสถานการณ์จริงการแผ่รังสีมักเกิดเป็นช่วงๆ ดังแสดงในรูปที่ 3.8 ถ้าการแผ่รังสีเกิดขึ้นหลายครั้งอย่างรวดเร็ว จะทำให้กระแสที่เกิดขึ้นในตัวตรวจจับเป็นค่ากระแสที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีหลายครั้ง แต่ในที่นี้จะสมมติให้อัตราการแผ่รังสีในแต่ละครั้งเกิดขึ้นในอัตราที่ต่ำอย่างเพียงพอที่จะพิจารณาว่ากระแสที่เกิดในตัวตรวจจับแต่ละครั้งเกิดขึ้นจากการแผ่รังสีเพียงครั้งเดียว ขนาดและเวลาที่เกิดค่ากระแสในแต่ละครั้งขึ้นอยู่กับกาเกิดปฏิกิริยาของการแผ่รังสีในแต่ละครั้ง ดังแสดงในรูปที่ 3.8

3.4 รูปแบบการทำงานของตัวตรวจจับ (Modes of detector operation)

รูปแบบการทำงานพื้นฐานของตัวตรวจจับแบ่งออกเป็น 3 ชนิด คือ โหมดพัลส์ (Pulse mode), โหมดกระแส (Current mode) และโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน (Mean Square Voltage mode) หรือบางครั้งจะเรียกว่า แคมเบลลิง โหมด (Campbelling mode) จากโหมดการทำงานทั้งสาม โหมดพัลส์จะมีรูปแบบการทำงานที่ง่ายที่สุด แต่โหมดกระแสจะมีการนำไปใช้งานมากที่สุด ส่วนโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดันจะมีการนำไปใช้ในบางงานเท่านั้น

3.4.1 โหมดกระแส (Current mode)

เป็นการแปลงเอ็กซ์เชอร์ที่ได้รับให้เป็นกระแส ดังนั้นหากเอ็กซ์เชอร์มีพลังงานสูง ก็จะทำให้ได้กระแสมากตามไปด้วย ในการวัดค่ากระแสอุปกรณ์ที่ใช้ อย่างเช่น แอมมิเตอร์จะต่ออยู่ที่ขั้วไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุตของตัวตรวจจับ ดังแสดงในรูปที่ 3.9

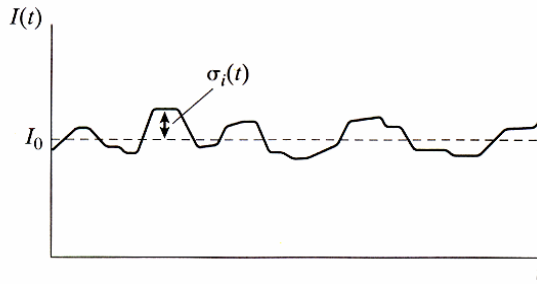


รูปที่ 3.9 แสดงการต่อวงจรของเครื่องวัดกระแส

ถ้าสมมติให้อุปกรณ์ที่ใช้การวัดค่ากระแสมีการตอบสนองอยู่ในช่วง T ดังนั้นค่ากระแสที่เกิดขึ้นจะเป็น ดังนี้

$$I(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t i(t') dt' \quad (3.2)$$

เนื่องจากการตอบสนองในช่วงเวลา T มีค่ายาวนานกว่าค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการเกิดพัลส์กระแสที่เกิดจากตัวตรวจจับในแต่ละลูก ผลที่ได้คือการเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นจากหลายๆ พัลส์ภายในช่วงเวลาดังกล่าว



รูปที่ 3.10 ค่ากระแสที่เกิดขึ้นจากการผันแปรตามเวลา ($\sigma_i(t)$)

ค่าเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นได้จากผลรวมค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดประจุกับจำนวนประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง ดังนี้

$$I_0 = rQ = r \frac{E}{W} q \quad (3.3)$$

เมื่อ

r = อัตราการเกิดประจุ

$Q = Eq/W =$ จำนวนประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง

E = พลังงานเฉลี่ยที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง

W = พลังงานเฉลี่ยที่ต้องการในแต่ละครั้ง

ที่ทำให้เกิดคู่ประจุ (electron-ion pair)

$q = 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$

สำหรับตัวตรวจจับที่ได้รับการแผ่รังสีที่มีค่าคงที่ ค่าเฉลี่ยของกระแสที่เกิดขึ้นสามารถเขียนให้อยู่ในรูปผลรวมของค่ากระแสคงที่ (I_0) รวมกับค่ากระแสที่เกิดขึ้นจากการผันแปรตามเวลา ($\sigma_i(t)$) ดังแสดงในรูปที่ 3.10 โดยที่ $\sigma_i(t)$ คือตัวแปรสุ่มที่ขึ้นอยู่กับการเกิดขึ้นอย่างไม่ต่อเนื่องซึ่งเป็นไปตามธรรมชาติของการแผ่รังสีเมื่อทำปฏิกิริยากับตัวตรวจจับ

การวัดค่าทางสถิติที่เกิดจากองค์ประกอบที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มเหล่านี้ได้จากค่าเฉลี่ยการผันแปร (variance) หรือค่าเฉลี่ยกำลังสอง (mean square value) ที่กำหนดโดยค่าเวลาเฉลี่ยของกำลังสองของความแตกต่างของกระแสที่เกิดขึ้นจากการผันแปรตามเวลา ($I(t)$) กับค่าเฉลี่ยของกระแส (I_0) ซึ่งค่าเฉลี่ยกำลังสองนี้เป็นไปตาม (3.4)

$$\overline{\sigma_i^2(t)} = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t [I(t') - I_0]^2 dt' = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t \sigma_i^2(t') dt' \quad (3.4)$$

โดยค่าเฉลี่ยเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) เป็นไปตาม

$$\overline{\sigma_I(t)} = \sqrt{\sigma \frac{2}{I}(t)} \quad (3.5)$$

ถ้าพิจารณาจากสถิติ Poisson (Poisson Statistics) ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนเหตุการณ์ที่ได้รับการบันทึก n เป็นไปตาม

$$\sigma_n = \sqrt{n} \quad (3.6)$$

ดังนั้น ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของจำนวนเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นด้วยอัตราการเกิด r ในช่วงเวลาที่ทำการวัด T คือ

$$\sigma_n = \sqrt{rT} \quad (3.7)$$

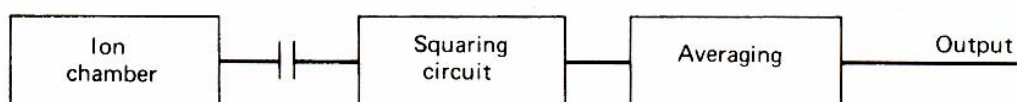
ถ้าการกระจายตัวของประจุในแต่ละพัลส์มีค่าเหมือนกัน สัดส่วนของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของสัญญาณที่ได้จากการวัดกับสัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มภายในช่วงเวลา T กำหนดโดย

$$\frac{\overline{\sigma_I(t)}}{I_0} = \frac{\sigma_n}{n} = \frac{1}{\sqrt{rT}} \quad (3.8)$$

เมื่อ $\overline{\sigma_I(t)}$ คือ เวลาเฉลี่ยของค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานในการวัดกระแส เมื่อ T คือค่าเวลาการตอบสนองของเครื่องวัดกระแสและ I_0 คือค่ากระแสเฉลี่ยที่อ่านได้จากเครื่องวัดโดยผลที่ได้จะนำมาใช้ในการประมวลความไม่แน่นอนที่เกี่ยวข้องกับเครื่องมือวัดแบบ Current Mode

จาก (3.8) ประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละครั้ง (Q) สมมติให้มีค่าคงที่ ดังนั้นผลที่ได้นี้จะนำไปใช้กับช่วงเวลาที่สัญญาณที่เกิดขึ้นอย่างสุ่มเท่านั้น ไม่รวมถึงขนาดของสัญญาณ

3.4.2 โหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน (Mean Square Voltage Mode)



รูปที่ 3.11 บล็อกการทำงานของโหมดค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดัน

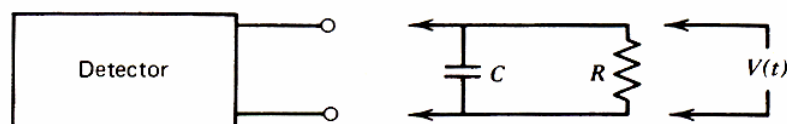
การทำงานของ MSV เป็นการส่งสัญญาณกระแสที่ได้จากตัวตรวจจับผ่านเข้าสู่วงจรเฉลี่ยค่ากระแส (I_0) โดยค่ากระแสที่ส่งผ่านไปได้นั้นจะเป็นค่ากระแสในส่วน $\sigma_i(t)$ จากบล็อกการทำงานในรูปที่ 3.11 สัญญาณ $\sigma_i(t)$ จะถูกนำมาทำเป็นกำลังสองและเฉลี่ยโดยช่วงเวลา T ปริมาณผลลัพธ์ที่ได้จาก $\sigma \frac{2}{I}(t)$ จะสอดคล้องกับและถูกกำหนดโดย (4) ทำการรวม (3) และ (8) จะสามารถหาขนาดของสัญญาณได้จาก

$$\overline{\sigma \frac{2}{I}(t)} = \frac{rQ^2}{T} \quad (3.9)$$

จาก (3.9) จะเป็นค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณที่แปรผันตรงกับอัตราการเกิด (r) และค่ากำลังสองของประจุที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงเวลานั้น ในการวิเคราะห์การทำงานของโหมดนี้จะใช้การวิเคราะห์แบบ Campbell และในบางครั้งจะเรียกการทำงานในโหมดนี้ว่า Campbelling Mode

3.4.3 โหมดพัลส์ (Pulse mode)

การทำงานในโหมดนี้สัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับจะนำมาต่อกับวงจรภายนอก ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นวงจรขยายภาคต้น (Preamplifier) ซึ่งสามารถเขียนวงจรเสมือนได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดงการวัดสัญญาณแบบโหมดพัลส์

ตัวต้านทานในวงจรเปรียบได้กับความต้านทานทางอินพุตของวงจรและตัวเก็บประจุเปรียบได้กับค่าความเก็บประจุรวมของตัวตรวจจับและวงจรเครื่องมือวัด ตัวอย่างเช่น วงจรขยายภาคต้นได้นำมาต่อกับตัวตรวจจับ ค่าความต้านทานคือค่าความต้านทานทางอินพุตของวงจรขยายภาคต้นและค่าความเก็บประจุจะเป็นผลรวมของค่าความเก็บประจุของตัวตรวจจับ ของสายนำสัญญาณที่ใช้ในการต่อระหว่างตัวตรวจจับกับวงจรขยายภาคต้นและค่าความเก็บประจุทางดำนอินพุตของวงจรขยายภาคต้น ดังนั้นเอาท์พุทที่ได้จะขึ้นอยู่กับค่าคงที่ของเวลา (time constant) ของวงจรที่กำลังทำการวัด โดยที่ค่าคงที่ของเวลาได้จากผลคูณของค่าความต้านทานและค่าความเก็บประจุหรือ $\tau = RC$

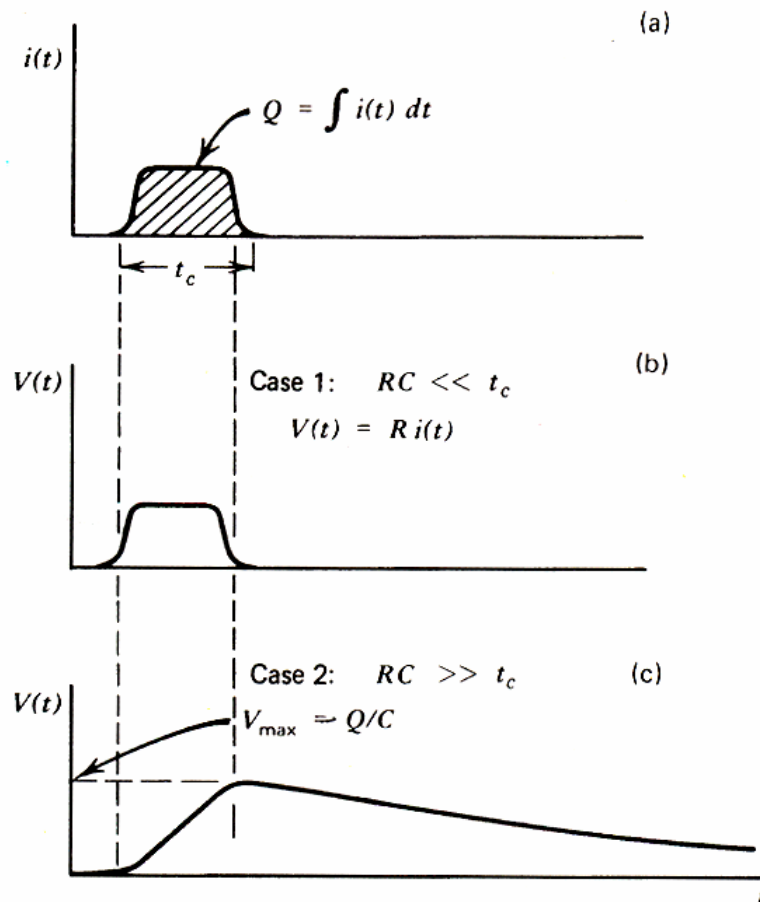
1. ในกรณีค่า RC ต่ำ ($\tau \ll t_c$)

ในกรณีค่าคงที่ของเวลาของวงจรภายนอกมีค่าต่ำกว่าเวลาที่ใช้ในการเก็บประจุหลายๆ กระแสที่ไหลผ่านโหลดความต้านทานจะไหลอย่างทันทีทันใด ดังนั้นแรงดันที่เกิดขึ้น ($V(t)$) ในกรณีนี้จะมีรูปร่างที่ใกล้เคียงค่ากระแสที่เกิดจากตัวตรวจจับ ดังแสดงในรูปที่ 3.13 (b)

2. ในกรณีค่า RC สูง ($\tau \gg t_c$)

ในกรณีนี้จะแตกต่างจากกรณีแรกอย่างมาก เนื่องจากกระแสที่เกิดขึ้นจากตัวตรวจจับไหลผ่านไปทั่วต้านทาน ประจุส่วนหนึ่งก็จะสะสมในตัวเก็บประจุ เมื่อกระแสจากตัวตรวจจับมีค่าลดลงตัวเก็บประจุจะคายประจุที่สะสมไว้ผ่านตัวต้านทาน ถ้าสมมติให้ค่าเวลาระหว่างการเกิดสัญญาณแต่ละครั้งมีเวลานาน ตัวเก็บประจุยังคงคายประจุผ่านตัวต้านทานเรื่อยๆ จนกว่าประจุจะลดลงจนมีค่าเท่ากับศูนย์ ค่าแรงดัน ($V(t)$) ที่ตกคร่อมตัวต้านทานแสดงในรูปที่ 3.13 (c) และขนาดของแรงดันที่สอดคล้องกับจำนวนประจุที่เกิดขึ้นจากตัวตรวจจับมีค่าดังนี้

$$V_{\max} = \frac{Q}{C} \quad (3.10)$$

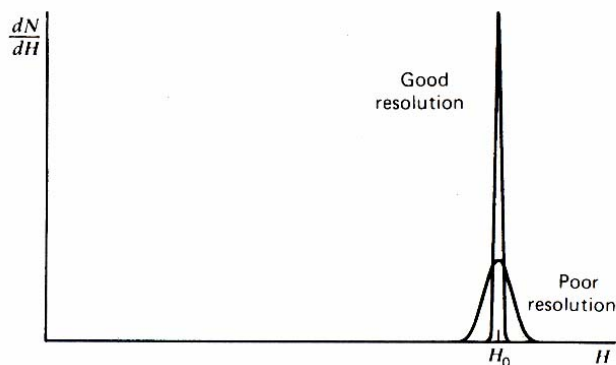


รูปที่ 3.13 แสดงลักษณะของสัญญาณจากวงจรที่มีค่าคงที่ของเวลาต่างกัน

สิ่งที่ต้องคำนึงถึงในโหมคนี้อีกคือ ค่าเดทไทม์ (Dead Time) เดทไทม์ คือช่วงเวลาที่ต้องเว้นไว้ก่อนที่จะวัดเอ็กซ์เรย์พัลส์ถัดไป เนื่องจากเมื่อยิงเอ็กซ์เรย์ลูกแรกมาแล้ว หากพัลส์ของลูกแรกยังไม่ลดลง และมีพัลส์ลูกที่ 2 ตามมาจะทำให้เกิดการยัดออกปของสัญญาณ ทำให้เดทไทม์มากขึ้น โดยเดทไทม์นี้จะขึ้นกับ คุณสมบัติของสารเรืองแสงเอ็กซ์เรย์ วงจรส่วนแปลงสัญญาณอะนาล็อกเป็นดิจิทัล โครงสร้างของตัวตรวจจับ และโครงสร้างของหลอดเอ็กซ์เรย์ [2]

3.5 Energy Resolution

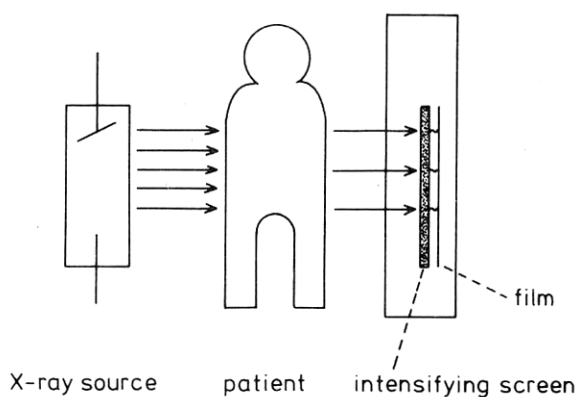
คุณสมบัติที่สำคัญสิ่งหนึ่งของตัวตรวจจับรังสีเมื่อมีการตอบสนองต่อรังสี จากรูปที่ 3.14 แสดงความแตกต่างทางด้านความสูงของการกระจายตัวของสัญญาณที่ได้จากตัวตรวจจับเมื่อได้รับรังสีที่มีแหล่งพลังงานเดียว ซึ่งการกระจายตัวของรูปคลื่นนี้เรียกว่า ฟังก์ชันการตอบสนอง (response function) ของตัวตรวจจับรังสี จากรูปที่ 3.14 พื้นที่ใต้ส่วนโค้งของทั้งสองรูปคลื่นมีขนาดที่เท่ากัน แต่การกระจายตัวรอบค่าเฉลี่ย (H_0) มีความกว้างไม่เท่ากัน จากรูปคลื่นที่มีความสูงและแคบแสดงถึงการตอบสนองของตัวตรวจจับที่ดี นั่นคือมีความไว และแม่นยำ



รูปที่ 3.14 แสดงการกระจายตัวของพลังงานที่แตกต่างกัน

3.6 ตัวตรวจจับที่เคลือบด้วยสารเรืองแสง

หลังจากการค้นพบเอ็กซ์เรย์โดย วิลเฮล์ม คอนราด เรินท์เก้น เมื่อปี ค.ศ. 1895 พบว่าฟิล์มถ่ายรูปทั่วไปไม่สามารถตรวจจับเอ็กซ์เรย์ได้ เนื่องจากค่าการดูดกลืนพลังงานของฟิล์มต่อเอ็กซ์เรย์มีค่าต่ำเกินไป ดังนั้นจึงได้มีการนำเอาฟอสเฟอร์เข้ามาใช้ ฟอสเฟอร์จะดูดกลืนพลังงานของเอ็กซ์เรย์และคายพลังงานออกมาในรูปของพลังงานแสงที่สามารถตรวจจับด้วยฟิล์มแบบทั่วไปได้ รูปที่ 3.15 แสดงการถ่ายภาพเอ็กซ์เรย์ทางการแพทย์ที่อยู่บนพื้นฐานของการใช้งานจากเรืองแสงซึ่งทำมาจากเอ็กซ์เรย์ฟอสเฟอร์ (X-ray phosphos) หรือที่เรียกกันโดยทั่วไปว่า สารเรืองแสง



รูปที่ 3.15 แสดงการถ่ายภาพเอ็กซเรย์ทางการแพทย์

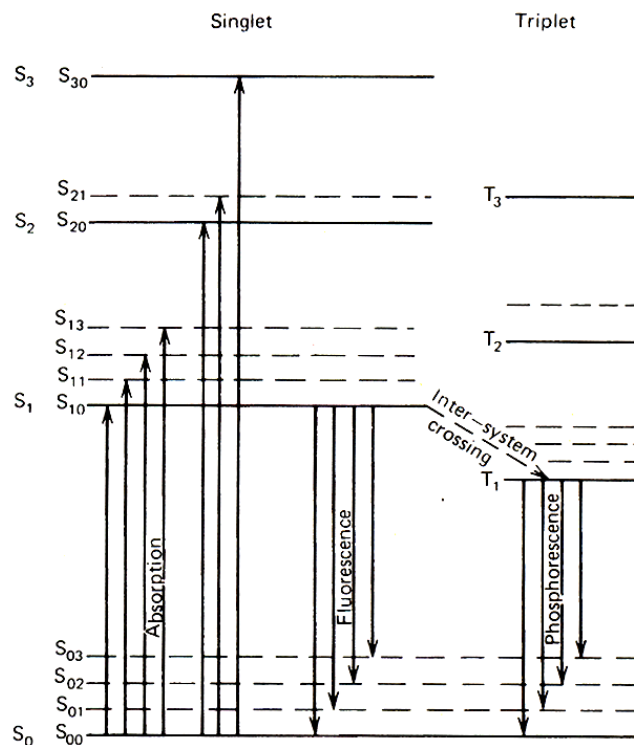
การตรวจจับรังสีโดยใช้สารเรืองแสงเป็นเทคนิคที่มีการใช้อย่างยาวนานแต่ยังคงเป็นเทคนิคที่มีการพัฒนาและใช้อยู่ในปัจจุบัน โดยที่คุณสมบัติของสารเรืองแสงที่ดีมีดังนี้ [9]

1. สามารถเปลี่ยนพลังงานพลังงานจลน์ของประจุให้เป็นพลังงานแสงที่สามารถตรวจจับได้ด้วยค่าการเปลี่ยนถ่ายที่สูง
2. การเปลี่ยนถ่ายพลังงานนี้ควรมีการสนองที่เป็นเส้นตรงตลอดช่วงการเปลี่ยนถ่าย
3. ตัวกลางควรโปร่งแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน
4. เวลาที่ใช้ในลดลงของแสงหลังจากจับรังสีควรมีค่าสั้น
5. วัสดุที่ใช้ควรมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีและมีขนาดใหญ่เพียงพอต่อการนำมาทำตัวตรวจจับ
6. ดัชนีการหักเหควรมีค่าใกล้เคียงกับกระจก (~ 1.5) เพื่อให้มีประสิทธิภาพการส่งผ่านที่ดี

ระหว่างสารเรืองแสงและตัวตรวจจับแสง

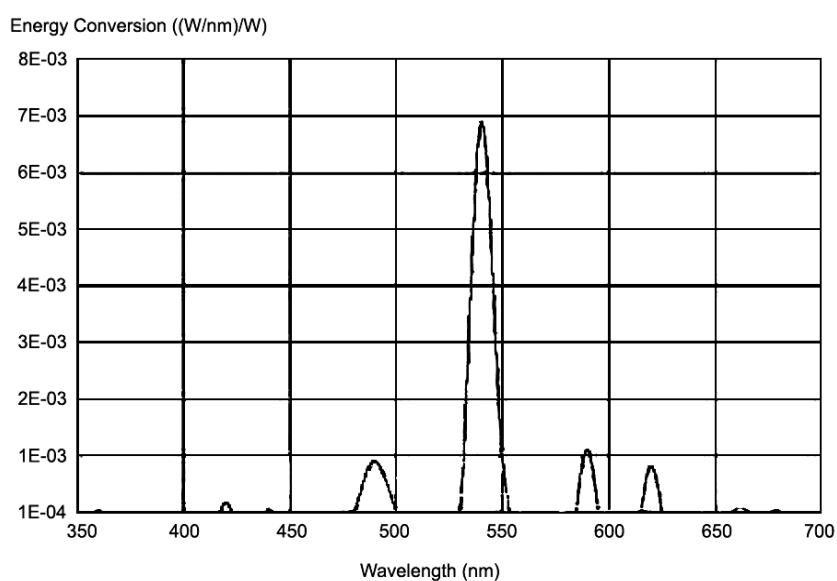
หลักการพื้นฐานของสารเรืองแสงคือแสงจะถูกปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนถ่ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากได้รับกระตุ้นด้วยเอ็กซเรย์ระหว่างชั้นพลังงาน S_{10} และการสั่นของอิเล็กตรอนที่สถานะพื้น (Ground state) ดังแสดงในรูปที่ 3.16 ถ้าให้ τ แทนเวลาในการลดสถานะจากชั้น S_{10} ดังนั้นค่าความหนาแน่นของการเรืองแสงที่เกิดจากการกระตุ้นที่เวลา t จะเป็นไปตาม

$$I = I_0 e^{-t/\tau} \quad (3.11)$$



รูปที่ 3.16 แสดงการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนหลังจากได้รับการกระตุ้นด้วยเอ็กซ์เรย์

ในสารเรืองแสงที่ทำมาจากสารอินทรีย์ทั้งหมด ค่า τ จะมีค่าอยู่ในช่วง 10^{-9} วินาที ดังนั้นการเรืองแสงจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเมื่อได้รับการกระตุ้นจากเอ็กซ์เรย์ รูปที่ 3.17 แสดงตัวอย่างแถบความถี่ที่สาร $Gd_2O_2S:Tb$ ปล่อยออกมาเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยเอ็กซ์เรย์และในตารางที่ 3.1 แสดงคุณสมบัติทั่วไปของสารเรืองแสง



รูปที่ 3.17 แถบความถี่ที่สาร $Gd_2O_2S:Tb$ ปล่อยออกมาเมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยเอ็กซ์เรย์

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติทั่วไปของสารเรืองแสง

NP #	Composition	S.G.	Peak (nm)	K-edge (keV)	Notes
NP-3010	Gd ₂ O ₂ S:Tb	7.50	545	50.22	Ortho Film
NP-3011	Gd ₂ O ₂ S:Eu	7.50	626	50.22	Others
NP-3020	CaWO ₄	6.06	425	69.48	Regular Film
NP-3025	Y ₂ O ₂ S:Tb	4.95	380/416/440/545	17.03	Regular Film
NP-3040	(Y-Sr)TaO ₄	7.46	325	67.38	Regular Film
NP-3043	(Y-Sr)TaO ₄ :Gd	7.46	315	67.38	Regular Film
NP-3044	(Y-Sr)TaO ₄ :Nb	7.46	325/395	67.38	Regular Film
NP-3050	BaFCl:Eu	4.56	380	37.38	Regular Film

3.7 ฉากรเรืองแสง (Intensifying Screen)

ฉากเรืองแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ทั่วไปในทางการแพทย์ โดยเฉพาะการถ่ายภาพเอ็กซเรย์ ฉากรเรืองแสงจะช่วยเพิ่มความคมชัดให้กับภาพเอ็กซเรย์โดยการเปลี่ยนจากเอ็กซเรย์เป็นแสง แล้วจึงเข้าสู่ฟิล์ม ทำให้ภาพที่ปรากฏบนฟิล์มมีความคมชัดมากขึ้น ฉากรเรืองแสงนี้จะถูกเคลือบด้วยสารฟอสเฟอร์เป็นชั้นบางๆ ซึ่งจะให้สีอะไรนั้นขึ้นกับชนิดของสารฟอสเฟอร์ที่เคลือบ โดยทั่วไปที่ใช้ในทางการแพทย์นั้นจะมี 2 สี นั่นคือ สีน้ำเงิน (CaWO₄) และสีเขียว (Gd₂O₂S:Tb) [8]

ฉากเรืองแสงประกอบไปด้วยส่วนประกอบ 4 ชั้น คือ

1. พื้นรองรับทำด้วยพลาสติก หรือกระดาษแข็งอัด
2. แผ่นสะท้อนแสง
3. แผ่นเรืองแสง
4. ชั้นพลาสติกเคลือบเพื่อป้องกันผิว

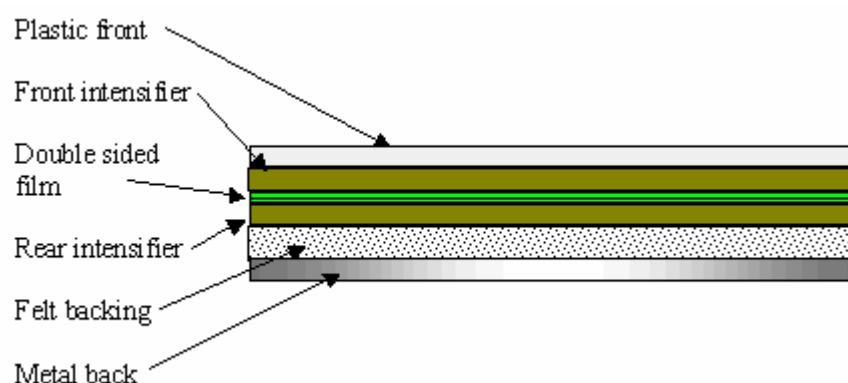
ความหนารวมทั้งหมด 15 – 16 mils (40 mils = 1 mm.)

พื้นรองรับ ทำด้วยแผ่นกระดาษอัดคุณภาพสูง หรือพลาสติกโพลีเอสเตอร์ หนาประมาณ 7 mils

แผ่นสะท้อนแสง แสงที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างเอ็กซเรย์กับผลึกฟอสเฟอร์ที่เคลือบอยู่บนนั้นจะถูกปล่อยออกมาทุกทิศทุกทาง แผ่นสะท้อนแสงนี้จะช่วยสะท้อนแสงจากด้านพื้นรองรับไปยังด้านหน้าฉาก สารสะท้อนนี้จะทำด้วยวัสดุสีขาว เช่น ไททาเนียมไดออกไซด์ (TiO₂) และฉาบลงบนพื้นรองรับหนา 7 mils

แผ่นเรืองแสง ชั้นแผ่นเรืองแสงนี้จะประกอบด้วยผลึกของสารเรืองแสงที่ห้อยแขวนอยู่ในพลาสติกความหนาประมาณ 1 – 4 mils แล้วแต่ความไวของฉาก

ชั้นพลาสติกเคลือบเพื่อป้องกันผิว ส่วนใหญ่แล้วจะใช้สารประเภทเซลลูโลส หนาประมาณ 0.7 – 0.8 mils ทำหน้าที่ 3 อย่างคือ ป้องกันการเกิดประจุไฟฟ้าสถิตย์ ป้องกันผิว และสามารถทำความสะอาดได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อชั้นแผ่นเรืองแสง [4]



รูปที่ 3.18 แสดงจากเรืองแสงที่ใช้ควบคู่กับฟิล์มเอ็กซเรย์

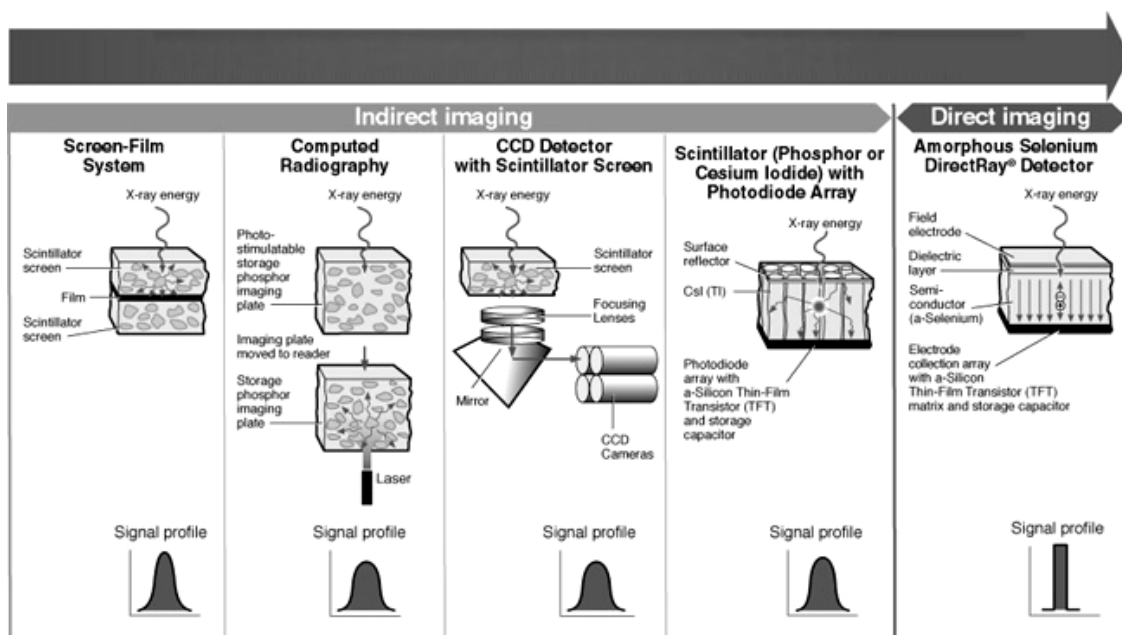


รูปที่ 3.19 แสดงจากเรืองแสงที่ใช้งานทั่วไป

จากรูปที่ 3.20 จะแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของการพัฒนาตัวตรวจจับเอ็กซเรย์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการพัฒนาตัวตรวจจับเอ็กซเรย์นั้น จะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆคือ

ตัวตรวจจับเอ็กซเรย์โดยตรง (Direct Imaging) คือตัวตรวจจับเอ็กซเรย์ที่สามารถแปลงสัญญาณเอ็กซเรย์ให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้โดยตรง สัญญาณที่ได้นั้นจะมีความคมชัดสูง

ตัวตรวจจับเอ็กซเรย์โดยอ้อม (Indirect Imaging) คือตัวตรวจจับเอ็กซเรย์แบบที่ต้องแปลงเอ็กซเรย์ให้เป็นพลังงานในรูปแบบอื่นที่ตัวตรวจจับชนิดนั้นๆสามารถตรวจจับได้ เช่นแปลงเอ็กซเรย์ให้กลายเป็นแสง จากนั้นจึงแปลงจากแสงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า เป็นต้น ตัวตรวจจับเอ็กซเรย์โดยอ้อมนี้ถูกพัฒนาขึ้นมาหลายรูปแบบ เพื่อให้สะดวกในการใช้งานในลักษณะที่แตกต่างกัน สัญญาณที่ได้นั้นจะมีคุณภาพที่ดีกว่าแบบแรก แต่ราคาจะสูงกว่ากันมาก [2]



รูปที่ 3.20 แนวโน้มการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับสนัก

จากคุณสมบัติของตัวตรวจจับสนักเอกซเรย์โดยอ้อม ที่ให้สัญญาณที่มีคุณภาพที่พอยอมรับได้ แต่ราคาถูก งานวิจัยนี้จึงได้เลือกใช้ตัวตรวจจับสนักเอกซเรย์โดยอ้อม ชนิด โฟโอดีไดโอดเคลือบด้วยสารเรืองแสงมาใช้งาน