บทที่ 2
อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยฟลูออเรสเซนส์เอ็กซ์

2.1 บทนำ

หลักสำคัญของ เทคนิค FEA คือการ เลือกใช้พลังงานกัมมันตภาพรังสีที่พอ เหมาะใน การก่อให้ เกิดช่องว่างในวงโคจรของอะตอมสารตัวอย่าง (มัก เป็นวง K) ซึ่งอะตอมจะอยู่ใน สภาวะไม่คงตัว และจะกลับคืนสภาวะ เดิมได้ต่อ เมื่อมีการ เปล่งรังสี เอ็กซ์ซึ่งมีค่าพลังงาน เฉพาะ สำหรับแต่ละธาตุ ดังนั้น สามารถคำนวณความ เข้มข้นของธาตุดังกล่าวได้

โดยทั่วไป FEA จะมีพลังงาน เอ็กซ์ เรย์ในช่วง 1-40 keV ถ้าต่ำกว่า 1 keV จะ เกิดปัญหา เกี่ยวกับการลดทอนพลังงาน ซึ่งผลคือทำให้การวิ เคราะห์ผิดพลาดไป และถ้า พลังงานสูงกว่า 40 keV มักไม่สามารถกระตุ้นวงโคจร K โดยทั่วไปจะได้ L- เอ็กซ์ เรย์ ซึ่งมีพลังงานต่ำยก เว้นพวกธาตุหนักๆ (เช่น ตะกั่ว)

สิ่งสำคัญอีกสิ่งหนึ่งคืออุปกรณ์ที่ใช้วัดพลังงาน เอ็กซ์ เรย์ ต้องมี เรสโซลูชันดี สามารถ แยกพลังงานของ เอ็กซ์ เรย์ได้ ซึ่งหมายถึงแยกแต่ละธาตุออกจากกันได้ดีนั่น เอง อุปกรณ์ เดิมที่ ใช้วัดส เปคตรัม (spectrum) ของรังสี เอ็กซ์ เป็นผลึก ซึ่งอาศัยการหัก เบนของลำ เอ็กซ์ เรย์ ตามกฎของแบรกก์ (Bragg) ปัจจุบันมีการใช้หัววัดทำจากสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำหน้าที่แปลง พลังงานของโฟตอนตกกระทบ เป็นการแตกตัวภายในสารกึ่งตัวนำในหัววัด สัญญาณที่ได้จากการ แตกตัวดังกล่าวมีค่าใกล้ เคียงกับพลังงานของโฟตอน หรือกล่าวได้ว่า เป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่า พลังงานกัมมันตภาพ จึงสะดวกในการใช้งานอย่างยิ่ง ในบทนี้ จะได้กล่าวถึงรายละ เอียด ของอุปกรณ์ซึ่ง เป็นหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ

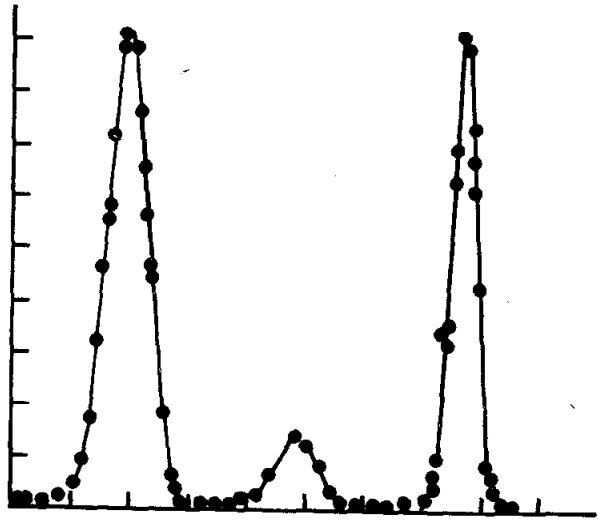
2.2 หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ

2.2.1 การออกแบบทั่วไป

โดยทั่วไปหัววัดจะมีลักษณะกลม มีบริเวณไวต่อแสงกัมมันตภาพประมาณ เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-1.0 ซม. และหนาประมาณ 3-5 มม. สารกึ่งตัวนำที่ใช้อาจเป็นซิลิคอน (silicon) หรือเจอร์มาเนียม (germanium) เมื่อพลังงานรังสีเอ็กซ์ (ที่ต้องการ) ตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ จะเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเลคทริค เอฟเฟคท์ ซึ่งโดยทั่วไปมักเป็นเอ็กซ์เรย์จากวงโคจร K ซึ่งโฟโตอิเล็กตรอนที่ถูกปล่อยออกมาจะมีพลังงานเท่ากับพลังงานโฟตอนตกกระทบ ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวในวงโคจร K ช่องว่างดังกล่าวจะถูกแทนที่เพื่อจัดให้อะตอมอยู่ในสถานะเสถียร ผลตามมาคือแคแรคเทอริสติคเอ็กซ์เรย์ของซิลิคอน (หรือเจอร์มาเนียม) ซึ่งมักถูกดูดกลืนอยู่ภายในวัสดุของหัววัดนั่นเอง

สัญญาณของพลังงานเอ็กซ์เรย์ที่ต้องการวัดถูกส่งต่อไปยังวงจรขยาย ซึ่งจะทำหน้าที่ขยายสัญญาณดังกล่าวและจัดรูปร่างสัญญาณด้วย ทั้งนี้เพื่อลดสัญญาณรบกวนลงให้มากที่สุด อำพนของแต่ละสัญญาณแทนพลังงานหนึ่งของรังสีเอ็กซ์ ส่วนความถี่ของสัญญาณจะเป็นสัดส่วนกับความเข้มของการเปล่งกัมมันตภาพดังกล่าว

ถ้าอุปกรณ์วิเคราะห์สัญญาณเป็นแบบมัลติแชนเนล ซึ่งจะทำการวัดได้หลายๆค่าพลังงานในเวลาเดียวกัน จะปรากฏสเปคตรัมบนจอภาพ จากนั้นนำข้อมูลที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไป รูป 2.1 แสดงภาพดังกล่าวมาแล้วนี้ ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้หลายๆธาตุในเวลาเดียวกัน



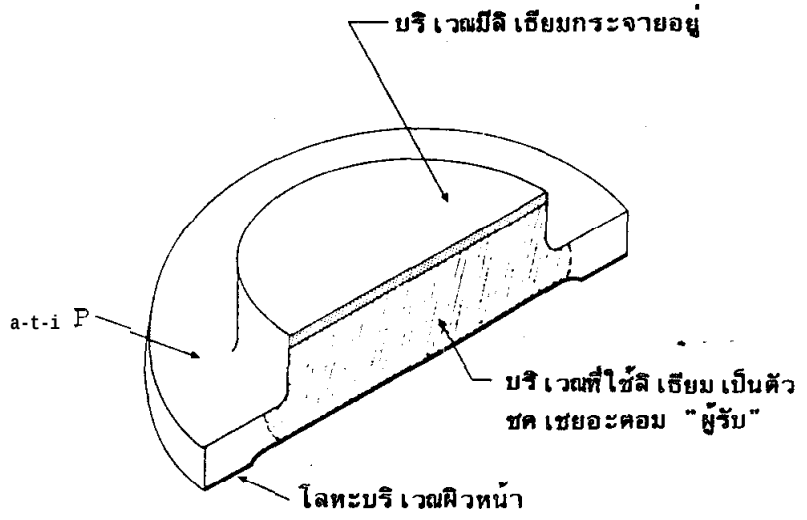
รูป 2.1 สเปคตรัมของเอ็กซ์เรย์ แสดง K_α และ K_β ของแมงกานีส

สำหรับหัววัดซึ่งทำจากซิลิคอน สามารถใช้งานได้ดี ณ อุณหภูมิห้อง แต่เจอร์มา-เนียมจะทำงานได้ดี ณ $77^{\circ}K$ (ภายในไนโตรเจนเหลว) อย่างไรก็ตาม หัววัดสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดนี้จะเกิดพาหะประจุเป็นจำนวนมากแม้จะได้รับพลังงานตกกระทบเพียงเล็กน้อยก็ตาม ซึ่งผลตามมาคือเกิดสัญญาณ (จากประจุ) ขนาดใหญ่ คุณสมบัติจำเป็นของสารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำหัววัดจะต้องสามารถเก็บประจุอิสระทั้งหมดที่เกิดจากปฏิกริยาของโฟตอนได้ดี

2.2.2 การผลิตหัววัดสารกึ่งตัวนำ

แม้จะมีสารกึ่งตัวนำหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้ทำหัววัดกัมมันตภาพรังสีคือซิลิคอน หรือเจอร์มาเนียม ในงาน FEA นิยมใช้หัววัดแบบซิลิคอนเป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากหัววัดเจอร์มาเนียมเหมาะสมกับการวัดรังสีเอ็กซ์หรือแกมมาพลังงานสูงเท่านั้น

ในรูป 2.2 แสดงภาพตัดขวางของหัววัดซิลิคอนซึ่งมีลิเธียมเป็นตัวดริฟท์ (drift) มักเรียกทับศัพท์เป็น "ซิลลี" เขียนสัญญลักษณ์ Si (Li) โดยทั่วไปมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของทั้งบริมาตร 2 ซม. หนา 10 มม. ภายในปริมาตรของหัววัดประกอบด้วยบริเวณแอคทีฟ



รูป 2.2 แผนภาพตัดขวางของหัววัด Si(Li)

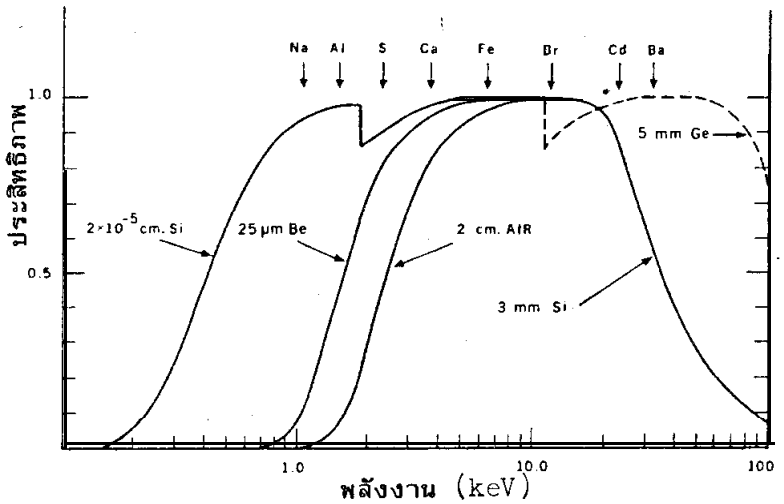
(active) ซึ่งไวต่อการตรวจวัดพลังงานกัมมันตภาพ จะอธิบายโดยยกตัวอย่างจากสาร P (เป็นสารกึ่งตัวนำที่ถูก เติมสาร เจือให้มีสภาพ เป็น "อะตอมผู้รับ" เป็นส่วนใหญ่) ใช้ลิ เธียม เป็น "อะตอมผู้ให้" ซึ่งมีปริมาณ เพียงพอในการชด เชยให้อะตอมของสาร P ดังนั้น จำนวน พาหะประจุจึงถูกลดค่าลง เกือบจะ เป็นศูนย์ ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้า (จากภายนอก) เข้าสู่หัววัด เพียง เล็กน้อยจะสามารถผลักให้พาหะประจุ เคลื่อนผ่านสารกึ่งตัวนำได้ ลักษณะ เช่นนี้จะ เป็น การปรับให้บริ เวณแอคทีฟมีสภาพว่าง เปล่า (ปราศจากพาหะประจุใดๆ) เป็นการ เตรียมพร้อม ที่จะสร้างพาหะประจุซึ่ง เกิดจากกัมมันตภาพรังสีตกกระทบ ปัญหาคือจะไล่พาหะประจุดังกล่าว ที่แรกนั้นไปได้อย่างไร? แก้ปัญหาโดยทำการโด๊ป (เติมสาร เจือ) ให้ผิวตรงข้ามหัววัดมีสภาพ เป็นสาร p (หรือ n) ซึ่งต้อง เติมสาร เจือให้มีจำนวนอะตอมมากกว่าบริ เวณแอคทีฟมากๆ โครงสร้าง เช่นนี้มีชื่อ เรียก เป็นแบบ p-i-n ซึ่ง i หมายถึง "intrinsic" หรือบริ เวณปราศ จากพาหะประจุนั่น เอง ส่วน p และ n หมายถึงผิวสัมผัสทั้งสอง อย่างไรก็ตาม การ เคลื่อน ที่ของพาหะประจุดังกล่าวจะมีกระแสไหลหรือไม่? คำตอบแท้จริงน่าจะ เกิดมีกระแสไหลบ้างแต่ มีปริมาณน้อยมาก เนื่องจากได้ทำการโด๊ปอย่างหนักให้ผิวสัมผัสมีพาหะประจุส่วนน้อยด้วยปริมาณ น้อยๆ เท่านั้น

2.2.3 สัญญาณที่ตรวจวัด

จากราย ละ เอียดที่กล่าวแล้วในตอน 2.2.2 เห็นได้ว่าความถูกต้องของการวัดสัญญาณ ขึ้นกับระบบอิ เล็กทรอนิกส์ เป็นสำคัญ นอกจากนี้ยังต้องรักษาอุณหภูมิของหัววัดไม่ให้มีค่าสูง เพื่อ ลดการ เกิดพาหะประจุอิสระ เนื่องจากการ เพิ่มอุณหภูมิ (เมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้น พาหะประจุจะ เพิ่ม การสั่นมากขึ้นๆ ซึ่งหมายถึง เพิ่มพลังงานมากขึ้นนั่น เอง เมื่อปริมาณพลังงานสะสมมากพอจะทำ ให้พาหะประจุสามารถ เคลื่อนที่ เข้าสู่ขั้วไฟฟ้า ก่อให้ เกิดสัญญาณไฟฟ้า) นอกจากนี้ สัญญาณ รบกวนอาจ เกิดจากภาควงจรขยาย ซึ่งทั้งหมดที่ได้กล่าวมาจัด เป็นข้อจำกัดของ เรโซลูชัน (re solution) ทั้งสิ้น ในปัจจุบันได้มีการออกแบบระบบอิ เล็กทรอนิกส์ เพื่อให้ เกิดการรบกวนต่อ เรโซลูชันได้น้อยที่สุด

2.2.4 ประสิทธิ์ภาพของหัววัดสารกึ่งตัวนำ

ประสิทธิภาพของหัววัดสารกึ่งตัวนำหาได้จากผลคูณของประสิทธิภาพจีโอ เมทรีและการตอบสนองภายในหัววัด ซึ่งประสิทธิภาพจีโอ เมทรีคือมุมโซลิดที่หัววัดรองรับ ณ ระยะห่างระหว่างสารตัวอย่างและหัววัด ตามจีโอ เมทรีที่ผู้วิเคราะห์ได้เลือกจัด (เช่น จัดให้ตัวอย่างวางแนวเดียวกับหัววัด หรือวางในแนวทำมุมกับหัววัดซึ่งอาจเป็น 90° ก็ได้) ระยะห่างดังกล่าวมักมีค่าเป็น 2-10 ซม. และประสิทธิภาพจีโอ เมทรีมีค่า 1-0.04 % ส่วนประสิทธิภาพที่เกิดจากการตอบสนองของหัววัดถูกนิยามเป็นโอกาสที่เอ็กซ์เรย์ตกกระทบบนส่วนที่ไวต่อการตอบสนองสัญญาณ และเกิดการดูดกลืนพลังงานดังกล่าว ซึ่งจะทำการผลิตสัญญาณส่งออกจากหัววัด ในรูป 2.3 แสดงการพล็อตประสิทธิภาพภายในหัววัด Si(Li) และ Ge ในฟังค์ชันของพลังงานโฟตอน (แนวแกนนอน) ณ พลังงานโฟตอนต่ำๆจะ เกิดขีดจำกัด เนื่องจาก เกิดการ



รูป 2.3 ประสิทธิภาพ v.s. พลังงานของหัววัดซิลิคอนหนา 3 มม. และหัววัด เจอร์มา เนียมหนา 5 มม. ขีดจำกัดของประสิทธิภาพ ณ ช่วงพลังงานต่ำๆคือ เกิดการดูดกลืนในหน้าต่างหัววัด

ดูดกลืนในช่อง เปิด (หรือที่ เรียก เป็นหน้าต่าง) ทาง เข้าสู่หัววัด และอาจดูดกลืนภายในสาร ใดๆ (รวมทั้งอากาศ) ที่อยู่ระหว่างสารตัวอย่างและหัววัด โดยทั่วไป หน้าต่างหัววัด Si(Li) ประกอบด้วยผิวที่หัววัดตาย 0.2 ไมโคร เมตรบนด้านที่ติดกับ p^+ อนึ่ง ช่วงที่จัด เป็น บริ เวณหน้าต่างของหัววัดมักมีอุณหภูมิต่ำและทำด้วย เบอริ เลียม (beryllium) บางๆ มีขนาด หนา 25 ไมโคร เมตร ทาง เดินถัดไปจากบริ เวณนี้ของ เอ็กซ์ เรย์คืออากาศ หรือสูญญากาศ หรือฮี เลียม (helium) ขึ้นกับการประยุกต์ใช้ และจากรูป 2.3 ที่ช่วงพลังงานโฟตอนสูง หางกราฟจะ เป็นสัดส่วนกับ $(1-e^{-\mu\rho x})$ โดย $\mu\rho$ เป็นพื้นที่ภาคตัดขวางของการดูดกลืนแบบ โฟโตอิ เล็กทริค (หน่วย เป็น ซม.$^{-1}$) และ x เป็นความหนาของหัววัด

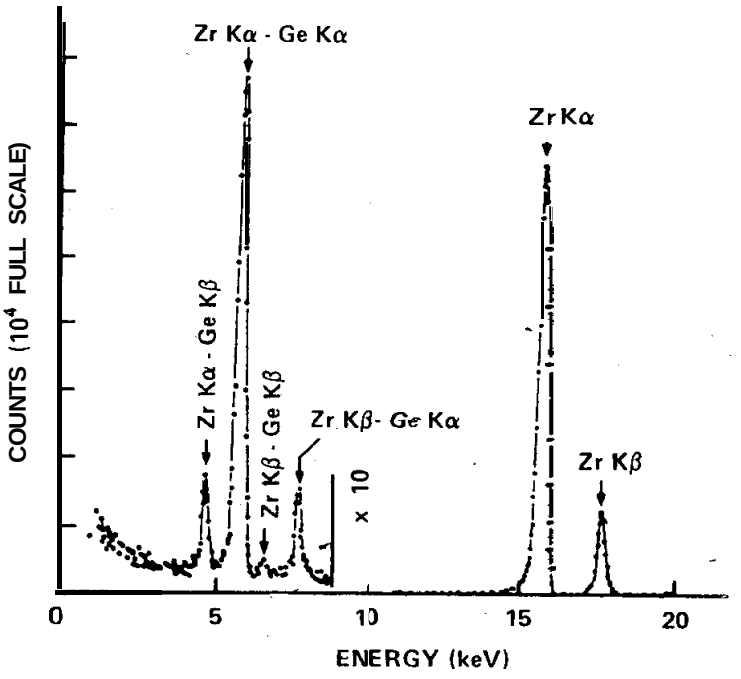
2.2.5 แบคกราวนด์ (background)

นิยามของคำว่าแบคกราวนด์ในสาขาวิชาที่ เกี่ยวข้องกับกัมมันตภาพรังสีคือ ปริมาณ กัมมันตภาพรังสีหรือพลังงานใดๆที่ เป็นส่วนรบกวนการนับวัดค่าพลังงานที่ต้องการสัง เกตุ เช่น อาจ เป็นพลังงานที่ถูกทำให้กระ เจิง เข้าสู่หัววัดหรือ เป็น เบรมสตราห์ลังก์ (bremsstrahlung) เป็นต้น แนวปฏิบัติในการวิ เคราะห์ทั่วไปถือว่า หัววัดจะตอบสนองสัญญาณของ เอ็กซ์ เรย์พลัง-งาน เดี่ยวโดยสร้างพีคมีรูปร่าง เป็นไปตาม เกา เซียน (Gaussian) แต่โดยแท้จริงแล้วมัก เกิด พลังงานอื่นจากหลายปรากฏการณ์และ เข้าสู่หัววัดใน เวลา เดียวกับที่ทำการสัง เกตุพีคที่สน ใจด้วย เสมอ แยกพิจารณาดังนี้

(1) พีค เอ็กซ์ เรย์ที่หลบหายไป

ตามทฤษฎีที่กล่าวว่า เมื่อ เอ็กซ์ เรย์ชนกับหัววัดและ เกิดปรากฏการณ์ดูดกลืนแบบโฟ โตอิ เล็กทริคในวงโคจรที่อยู่ใกล้ชิดนิว เคลียส จึง เกิดช่องว่างขึ้นในวงโคจรดังกล่าว ผลลัพท์ ในการ เติมช่องว่างนั้นมัก เกิด เอ็กซ์ เรย์ (ไม่ทุก เหตุการณ์ เสมอไป) ซิลิคอนมี K_α 1.74 keV ส่วน เจอร์มา เนียมคือ 9.8 keV ถ้าการดูดกลืนแบบโฟโตอิ เล็กทริค เกิดภายใน เนื้อหัววัดซึ่ง อยู่ระดับลึกจากผิวหน้า เอ็กซ์ เรย์ดังกล่าวนี้จะถูกดูดกลืนอีกครั้งหนึ่ง และจะรบกวนกับสัญญาณ จากพลังงานที่สน ใจศึกษา ในทางตรงข้าม ถ้าปรากฏการณ์ดังกล่าว เกิดบริ เวณใกล้ เคียงกับ

ผิวหน้าจะ เกิดผลอย่างไร? โอกาสหนึ่งที่เป็นไปได้คือ เอ็กซ์ เรย์มีโอกาสหลบหายไปจากหัววัด ซึ่งผลที่ เกิดตามมาคือพลังงานบริมาณดังกล่าวจะสูญหายไปจากหัววัด พีคจากการหลบหาย คือ 1.74 keV สำหรับซิลิคอน และ 9.8 keV สำหรับ เจอร์มา เนียม พีคดังกล่าวจะ เกิดภาย หลังพีคของพลังงาน เต็ม จะมีขนาด เป็นสัดส่วนกับยีลด์ฟลูออร์ เรส เซ็นส์ของช่อง ว่างในสารที่ใช้ ทำหัววัด และขึ้นอยู่กับความลึกที่ เกิดการดูดกลืนพลังงานดังกล่าว พีคจากการหลบหายจะมี ลักษณะปรากฏ เด่นชัดมาก เมื่อพลังงานโฟตอนมากกว่าความลึกที่ เกิดการดูดกลืนพลังงานตกกระ ทบพอดี ตัวอย่าง เช่น ในรูป 2.4 เป็นส เปคตรัมของ เอ็กซ์ เรย์จาก เซอร์โค เนียม (zirconium) ซึ่งใช้หัววัด เจอร์มา เนียม พีคจากการหลบหายของ K_α และ K_β ซึ่งถ้าใช้หัววัดซิลิคอนจะปรากฏน้อยกว่า เนื่องจากยีลด์ของวงโคจร K จะ เกิด เอ็กซ์ เรย์สำหรับ เจอร์มา เนียม มีค่าสูง ($\omega_K = 0.5$) ส่วนของซิลิคอนมีค่าต่ำ ($\omega_K = 0.06$)

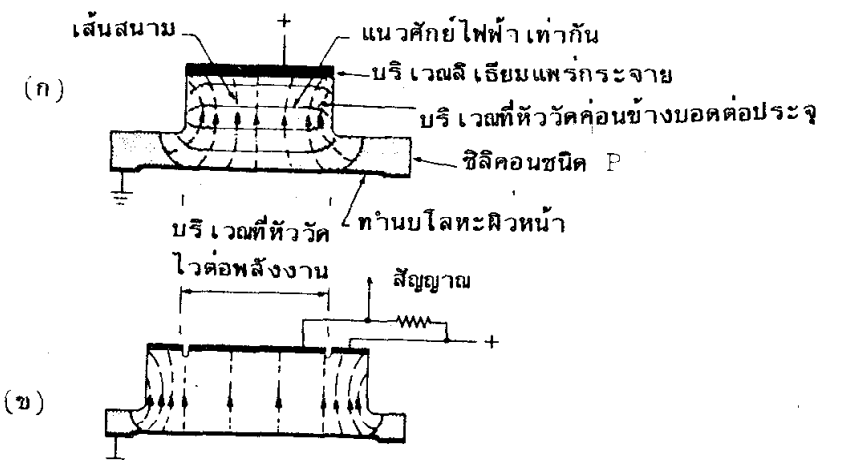


รูป 2.4 ส เปคตรัมของ เซอร์โค เนียม (zirconium) คือ Zr K_α และ K_β โดยใช้หัววัด เจอร์มา เนียม แสดงพีคที่หายไปจากหัววัด (escape peak)

(2) แบคกราวนด์ต่อ เนื่อง

สเปคตราของทุกๆฟลูออร์เรสเซนส์เอ็กซ์เรย์จะ เกิดมีส่วนที่ เป็นลักษณะแบบต่อ เนื่อง และกระจายอยู่ในบริเวณของพลังงานพีคที่ผู้วิเคราะห์สนใจ ถ้ามีแบคกราวนด์ดังกล่าวนี้ปริมาณมากๆอาจบดบังพีคที่ต้องการวิเคราะห์ได้ ดังนั้น เพื่อเพิ่มความไวในการวิเคราะห์ ต้องทราบสาเหตุและพยายามลดผลใดๆที่จะก่อให้เกิดแบคกราวนด์ อนึ่ง ขบวนการสมบูรณ์ซึ่งพลังงานโฟตอนถูกแปลง เป็นสัญญาณประจุนั้น ประกอบด้วยขั้นตอนลัดหลายๆแบบซึ่งมีโอกาสที่พลังงานอิเล็กตรอน โฮล และโฟตอน จะถูกผลิตขึ้นในผลึกหัววัด ถ้าปริมาตรที่ไวต่อสัญญาณ (อยู่ภายในหัววัด) มีการหลบหายของพลังงาน จะก่อให้เกิดแบคกราวนด์ซึ่ง เป็นสัญญาณที่มีอำพน เพียงบางส่วนของพลังงานตกกระทบ เท่านั้น แต่ในทางปฏิบัติ ขบวนการ เกิดแบคกราวนด์ดังกล่าวไม่ เป็นปัญหาสำคัญในการวิเคราะห์

แหล่งกำ เนิดหนึ่งของแบคกราวนด์ต่อ เนื่องคือ หัววัดอาจทำการจับ เก็บประจุได้อย่างไม่สมบูรณ์ เนื่องจากสนามไฟฟ้าสถิตย์ภายในหัววัดไม่ปกติ ในรูป 2.5 แสดงจีโอเมทรีทั่วไปที่ใช้ในงานวิเคราะห์เอ็กซ์เรย์ และ เส้นสนามไฟฟ้าภายในหัววัดถูกรบกวน ขบวนการจับ เก็บประจุจะ เกิดขึ้นในแนว เส้นสนามไฟฟ้าดังกล่าว ดังนั้น บางประจุอาจถูก เก็บไว้ที่ชั้นบริเวณผิวก็ได้



รูป 2.5 หัววัดซิลิคอนซึ่ง (ก) เกิดการรบกวนต่อสนามไฟฟ้าภายในหัววัด เนื่องจากช่องในหัววัด (ข) มีวงแหวนกันหัววัด เส้นสนามไฟฟ้า เป็นระเบียบภายในบริเวณที่หัววัดมีความไวต่อพลังงานตกกระทบ

เมื่อประจุเคลื่อนถึงบริเวณผิว มันจะถูกกักไว้เป็นเวลานานมากจนไม่สามารถจะไปรบกวนกับสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์ แต่มันจะก่อให้เกิดสัญญาณที่มีอำพนเพียงบางส่วนของสัญญาณปกติเท่านั้น ในหัววัดบางชนิดอาจเกิดเพียง 40% ของสัญญาณที่เกิดจากโฟตอน 20 keV กลายเป็นแบคกราวนด์ต่อเนื่อง วิธีแก้ไข อาจใช้คอลลิเมเตอร์เพื่อกำหนดให้บริเวณกึ่งกลางของหัววัด (ซึ่งไวต่อพลังงานโฟตอน) เท่านั้นที่มีโฟตอนตกกระทบ หรืออาจใช้วงแหวนซึ่งเป็นไฟฟ้าสถิตย์ทำหน้าที่กันหรือบังคับแนวทางตกกระทบของโฟตอน

2.3 พรีแอมพลิไฟเออร์ (Preamplifier)

ในงานวิเคราะห์สเปคตราเอ็กซ์เรย์ต้องอาศัยระบบอิเล็กทรอนิกส์ช่วยประมวลผลข้อมูล และหัววัดอาจส่งสัญญาณขนาดน้อยๆ จึงต้องมีการขยายสัญญาณดังกล่าว ขั้นตอนการขยายมักแยกเป็นส่วนก่อนเข้าวงจรขยายและวงจรขยายหลัก ส่วนแรกคือ "พรีแอมพลิไฟเออร์" นั่นเอง และส่วนที่สองคือ "แอมพลิไฟเออร์"

พรีแอมพลิไฟเออร์จะอยู่ใกล้ชิดหัววัด มีส่วนประกอบดังนี้

(1) ธาตุที่ทำหน้าที่ขยายสัญญาณ จะอยู่บริเวณผิวหน้าของอุปกรณ์นี้

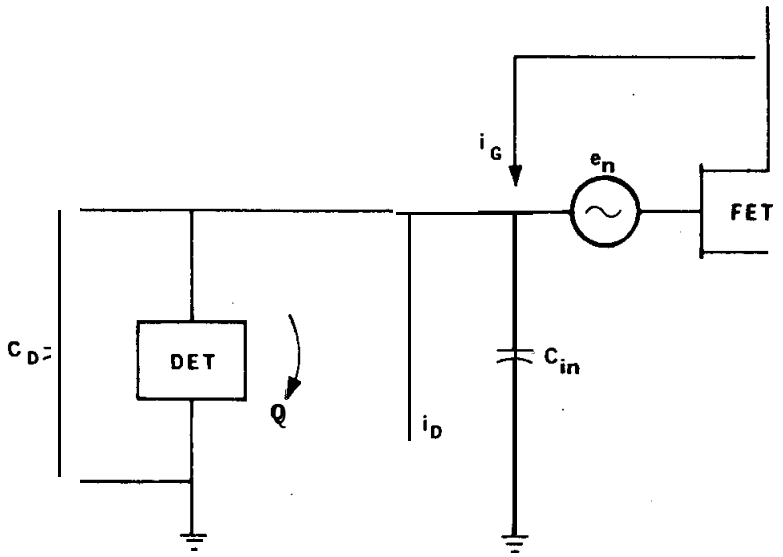
(2) ส่วนประกอบอื่นซึ่งติดตั้งใกล้เคียงกับหัววัด และถูกบรรจุอยู่ภายในไครโอสแตต (cryostat)

(3) ส่วนประกอบที่เหลือของอุปกรณ์นี้จะถูกจัดให้อยู่ชิดกันมากที่สุดเท่าที่จะทำได้ และอยู่ภายนอกไครโอสแตต

เอ็กซ์เรย์สเปคโตรมีเตอร์ (X-ray spectrometer) สมัยใหม่ซึ่งมีเรโซลูชัน (resolution) สูง มักใช้ทรานซิสเตอร์ FETs (field-effect transistors) ซึ่งก่อสัญญาณรบกวนน้อย เมื่อใช้งาน ณ อุณหภูมิที่เหมาะสม (ประมาณ $140^{\circ}K$) โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้งานของหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำคือ $77^{\circ}K$ (ประมาณ) เพื่อลดปริมาณกระแสรั่ว (leakage current) และ FETs ต้องมีการเพิ่มอุณหภูมิอย่างช้าๆ เพื่อจัดปรับสภาพการหนีความร้อนของอุปกรณ์ให้อยู่ในสมดุลย์

การเลือกใช้ FETs ที่มีการรบกวนสัญญาณได้ต่ำนั้นทำยาก ตามท้องตลาดมักเป็นประเภทที่เหมาะสมต่อการทำงาน ณ อุณหภูมิต่ำ ข้อเสียของ FETs คือมีสารเจือที่ไม่สามารถควบคุมปริมาณได้ ซึ่งสารเจือดังกล่าวมีบทบาทต่อขบวนการในบริเวณกัมมันต (active) ของอุปกรณ์ซึ่งอาจสร้างหรือเกิดการรวมตัวกันใหม่ของโฮลและอิเล็กตรอน ลักษณะดังกล่าวจะเป็นการกรูกัน เคลื่อนที่ของกลุ่มพาหะประจุ ซึ่งมีความถี่อยู่ในช่วงกว้างซึ่งเครื่องขยายสังเกตุได้และการเกิดขึ้นกับอุณหภูมิ ผลเสียคือลดคุณสมบัติเรโซลูชันของระบบ

นอกจากนี้ การเลือกใช้ FETs ยังขึ้นกับการปรับ (matching) อุปกรณ์ให้มีความขัด (impedance) พอเหมาะกับหัววัด สัญญาณอินพุทของพรีแอมพลิไฟเออร์ประกอบด้วยประจุซึ่งถูกผลิตขึ้นจากบริเวณกัมมันตภาพของหัววัด รูป 2.6 แสดงแผนภาพพื้นฐานของตัวประกอบในวงจรอินพุทซึ่งจะส่งผลต่อเรโซลูชันพลังงานของสเปคโตรมิเตอร์ (spectrometer) แยกพิจารณาดังนี้



รูป 2.6 แหล่งกำเนิดของสัญญาณรบกวนในสเปคโตรมีเตอร์แบบสารกึ่งตัวนำ

(1) สัญญาณของหัววัด = Q

(2) ความจุของหัววัด = C_D

(3) ความจุของวงจรอินพุทของ FET = C_{in}

(4) กระแสรั่วของหัววัด = i_D

(5) กระแสรั่วของ FET gate = i_G

(6) สัญญาณรบกวนของ FET channel เกิดจากแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้ารบกวน = e_n และหาค่าจากความสัมพันธ์

$$\overline{e_n^2} = 4KR_F T\Delta f \qquad (2\text{-}1)$$

โดย K เป็นค่าคงที่โบลท์แมน (Boltman)

T เป็นอุณหภูมิ (^{o}K)

Δf เป็นแถบกว้างของระบบ

R_F เป็นความต้านทานสัญญาณรบกวนของ FET มีค่าโดยประมาณเป็น

$$R_F = 1/g \qquad (2\text{-}2)$$

โดย g เป็นความนำส่งผ่าน (transconductance)

จากการออกแบบ FET มักจะให้ g เชื่อมกับ C_{in} และในทางปฏิบัติถือว่า g/C_{in} เป็นค่าคงที่

เนื่องจากสัญญาณรบกวนในแชนเนล (channel) ของ FET ต้องนำมาพิจารณาด้วย ดังนั้น e_n เปรียบเสมือนแหล่งกำเนิดดังกล่าว แรงดันไฟฟ้าปริมาณนี้จะถูกเปรียบเทียบกับแรงดันไฟฟ้า $Q/(C_D + C_{in})$ อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน (สำหรับกรณีต้นกำเนิดรบกวนดังกล่าวนี้เท่านั้น) จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $Qg^{\frac{1}{2}}/(C_D + C_{in})$

ดังนั้นจึง เป็นสัดส่วนโดยตรงกับ $QC_{in}^{\frac{1}{2}}/(C_D + C_{in})$ ซึ่งค่าสูงสุดจะ เป็นกรณี $C_D = C_{in}$ ซึ่งอัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวนจะมีค่า เป็น $Q/C_D^{\frac{1}{2}}$ สรุปได้ว่า เรโซลูชันจะดี เยี่ยม เมื่อใช้หัววัดมีพื้นที่น้อยๆซึ่งจะลดค่า C_D ลงนั่น เอง อย่างไรก็ตาม ควรจะได้คำนึงถึง-ประสิทธิภาพของการตรวจ เอ็กซ์ เรย์ โดยทั่วไปอนุโลมใช้หัววัดขนาด เส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5-1 ซม. ซึ่งมีความจุ เป็น 1 พิโคฟารัด (pf) โดยประมาณ

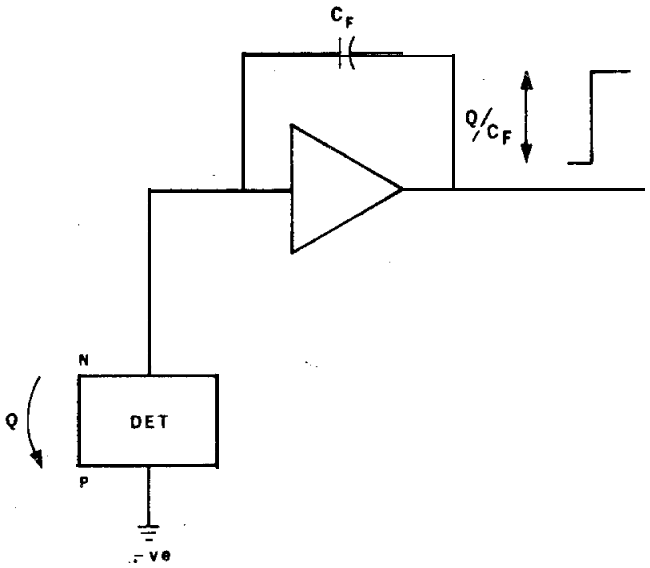
จากรูป 2.6 สัญญาณรบกวนไม่ได้ เกิดจาก เพียง e_n เท่านั้น ลักษณะการกรูกัน เคลื่อนที่ของพาหะประจุอาจ เกิดได้ทั้งในหัววัดและใน FET นอกจากนี้อาจ เป็นพวกธาตุวงจรในด้านอินพุท เช่น ตัวต้านทาน (resistor) เป็นต้น ทางทฤษฎีถือว่าแหล่งกำ เนิดสัญญาณรบกวนดังกล่าวขนานกันอยู่ในวงจรอินพุท ซึ่งถ้าจะพิจารณาแรงดันไฟฟ้าอินพุท เห็นได้ว่า เป็นสัดส่วนกับ $1/(C_D + C_{in})$

พรีแอมพลิไฟ เออร์ส่วนใหญ่จะมีกลไกการทำงานแบบไวต่อสัญญาณแรงดันไฟฟ้า แต่ เอาท์พุทของระบบดังกล่าวจะมีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าขึ้นกับความจุของหัววัด ผล เสียคือ เกิดการคลาด เคลื่อนของอำพนสัญญาณ เอ็กซ์ เรย์ส เปคโตรมี เตอร์มักใช้โอ เปอ เรชันนัลแอมพลิไฟ เออร์ (operational amplifier) แบบป้อนกลับ โดยมีธาตุวงจรที่ทำหน้าที่ป้อนกลับคือตัวจุ ดังแสดงในรูป 2.7 ซึ่งสัญญาณ เอาท์พุทจะ เป็นสัดส่วนกับปริมาณประจุที่ไหลผ่านหัววัด ความจุของหัววัดแปรค่า (ในขอบข่ายจำกัดที่ยอมรับ) ซึ่งไม่ก่อให้ เกิดการ เปลี่ยนแปลงใดๆต่อสัญญาณ เอาท์พุท (ความจริงน่าจะมีผลต่ออัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน ซึ่งผลต่อไปคือค่า เรโซลูชัน) ถ้าให้ V_o เป็นสัญญาณ เอาท์พุทจากสภาวะที่ไวต่อประจุ

$$V_0 = Q/C_F \qquad (2\text{-}3)$$

ซึ่ง C_F เป็นค่าความจุป้อนกลับ

ในปัจจุบัน เอ็กซ์ เรย์ส เปคโตรมี เตอร์ใช้สัญญาณช่วยในการจ่ายประจุ (discharge) ของ C_F เนื่องจากวงจรตามรูป 2.7 จะทำการนับวัดทุกประจุที่ไหลผ่านหัววัด ซึ่งอาจ เป็น

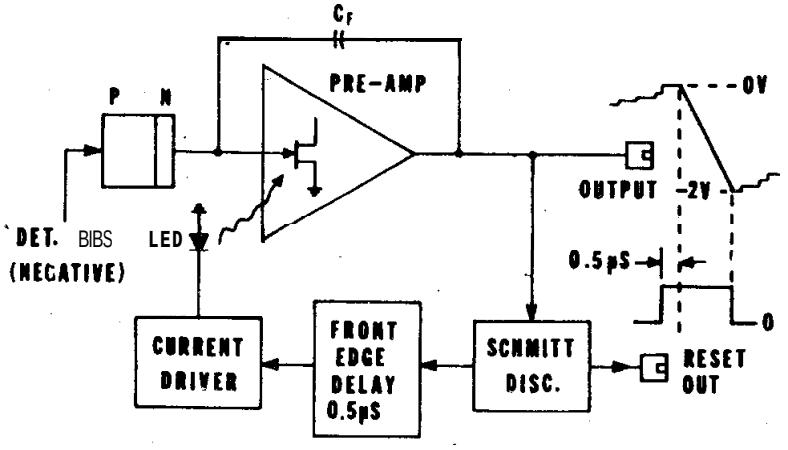


รูป 2.7 พรีแอมพลิไฟเออร์แบบไวต่อประจุ

ประจุจากกระแสรั่วและจากการแตกตัวภายในหัววัด เนื่องจากพลังงานกัมมันตภาพ เอาท์พุทจากหัววัดจะมากกว่าที่ควร เป็น ตัวจุ C_F อิ่มตัว เร็ว ต้องหาวิธีแก้โดยให้ C_F ปล่อยหรือจ่ายประจุออกไป เพื่อรักษาพรีแอมพลิไฟเออร์ให้อยู่ในช่วงทำงานลักษณะ เป็น เส้นตรง (linear) ถ้าใช้ตัวต้านทานมีค่าสูงต่อขนาน C_F เพื่อ เป็นแนวทางของประจุที่ถูกปล่อยออก แต่ตัวต้านทานดังกล่าวจะประพฤติ เสมือน เป็นแหล่งกำ เนิดสัญญาณรบกวนและจะ เพิ่มความจุในวงจรอินพุทอีก นอกจากนี้ ตัวต้านทานค่าสูงๆมักไม่ประพฤติ เป็นตัวต้านทานบริสุทธิ์ ทำให้ เรโซลูชัน ณ ค่านับวัดสูงๆไม่ดี

การใช้สัญญาณ เพื่อให้ C_F ปล่อยประจุออก เป็นช่วงๆมีกลไกการทำงานดังนี้ คือ ถ้าพรีแอมพลิไฟเออร์มี เอาท์พุทถึงค่าสูงสุดของไฟกระแสตรง ดิสคริมิ เน เตอร์ (discriminator) จะ เริ่มตัดสัญญาณและ เริ่มต้นขบวนการสะสมประจุ ในช่วง เวลานี้จะมีการสร้างสัญญาณขึ้น เพื่อให้ C_F คายประจุ และช่วงนี้ (เป็น เวลาประมาณ 2-3 ไมโคร เซคคอนด์) จะไม่มีการประมวลผลของสัญญาณอินพุท ซึ่งถ้าระบบไม่รับอินพุทย่อมไม่ เกิดสัญญาณรบกวนใดๆ โครงร่างของวงจรไฟฟ้าแสดงในรูป 2.8 ใช้ไดโอด เปล่งแสงหรือที่ เรียก LED (light-

emitting diode) เป็นตัวก่อให้เกิดกระแสรั่วชั่วขณะหนึ่ง และไหลเข้าสู่เดรน (drain) ของ FET และไปยังเกท (gate) เรียกวิธีการนี้ว่าการป้อนกลับ "pulsed-light" หรือ "pulsed-opto"



รูป 2.8 โครงร่างของวงจรพรีแอมพลิไฟเออร์ซึ่งใช้สัญญาณแสงป้อนกลับ LED จะทำงานเมื่อเอาท์พุทของตัวรวบรวมประจุมีประจุอยู่มากเกินระดับของ Schmitt discriminator

จากรูป 2.8 หัววัด (รอยต่อ PN) ต่อกับเกทของ FET โดยมีการป้อนไบแอสแบบลบให้กับด้าน P ของหัววัด ตัวจุ C_F ทำหน้าที่รวบรวมหรือสะสมประจุทั้งจากกระแสรั่วและจากโฟตอน ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท มี Schmitt trigger ทำหน้าที่ขลิบสัญญาณที่มีขนาดสูงหรือต่ำเกินไป กล่าวคือ ถ้าค่าสูงไป LED จะเริ่มทำงาน (ในช่วงเวลาคล้อยไปเล็กน้อย) แสงจาก LED จะส่งตรงไปยัง FET ก่อให้เกิดกระแสจากแสงไหลจากเดรนไปยังเกตของ FET กระแสนี้จะถูกสะสมโดย C_F ทำให้แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทตกฮวบฮาบลงจนถึงระดับต่ำสุดที่กำหนดไว้ในวงจร Schmitt trigger ณ จุดดังกล่าวนี้ แสงจะดับทันที ซึ่งวงจร Schmitt มักออกแบบให้ระดับสูงและต่ำของแรงดันไฟฟ้าที่กำหนดมีค่าแตก-

ต่างกัน 2 โวลท์ และ C_F มีขนาดประมาณ 0.1-0.2 พิโคฟารัด (pF) จะทำการปล่อยประจุในช่วงเวลา 2-3 ไมโครเซคคอนด์ โดยทั่วไป วัฏของการปล่อยประจุจะเริ่มต้นขบวนการใหม่ทุกๆ 10-100 msec ดังนั้น ค่านับวัดที่สูญหายไปในช่วงเวลาดังกล่าวจึงน้อยมาก

2.4 แอมพลิไฟเออร์ (Amplifier)

อุปกรณ์ขยายสัญญาณหรือมักเรียกทับศัพท์เป็น "แอมพลิไฟเออร์" ที่ใช้ในเอ็กซ์เรย์สเปคโตรมีเตอร์ต้องมีคุณสมบัติ ดังนี้

(1) อัตราขยายพอสมควร

(2) มีความเที่ยงตรงในการขยายสัญญาณได้ดี

(3) จัดรูปร่างของสัญญาณ

(4) ไม่ก่อผลใดๆที่จะเป็นการลดค่าเรโซลูชัน

โดยทั่วไป พรีแอมพลิไฟเออร์จะมีความขัดอินพุทต่ำๆ เพื่อปรับให้เข้ากับหัววัดและมีความขัดเอาท์พุทต่ำ (แต่สูงกว่าด้านอินพุท) เพื่อขับเคเบิล (cable) ต่อไปยังแอมพลิไฟเออร์หลัก ในการนี้ อาจมีการขยายบ้างเล็กน้อย แต่การขยายสัญญาณจะถูกขยายที่แอมพลิไฟเออร์หลัก หัววัดเป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณ ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 200-300 ตัว (เช่น เอ็กซ์เรย์ 1 keV จะมีประมาณ 300 อิเล็กตรอน) และมีความจุประมาณ 1 pF โดยทั่วไปแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของการรวบรวมประจุจะอยู่ในช่วง 50 μV แอมพลิไฟเออร์หลักจะส่งสัญญาณเอาท์พุทไปยังระบบประมวลผลข้อมูล ประมาณ 2-3 โวลท์ จากการสมมุติค่าโดยประมาณดังกล่าว อัตราขยายของแอมพลิไฟเออร์มีค่าประมาณ 10^5

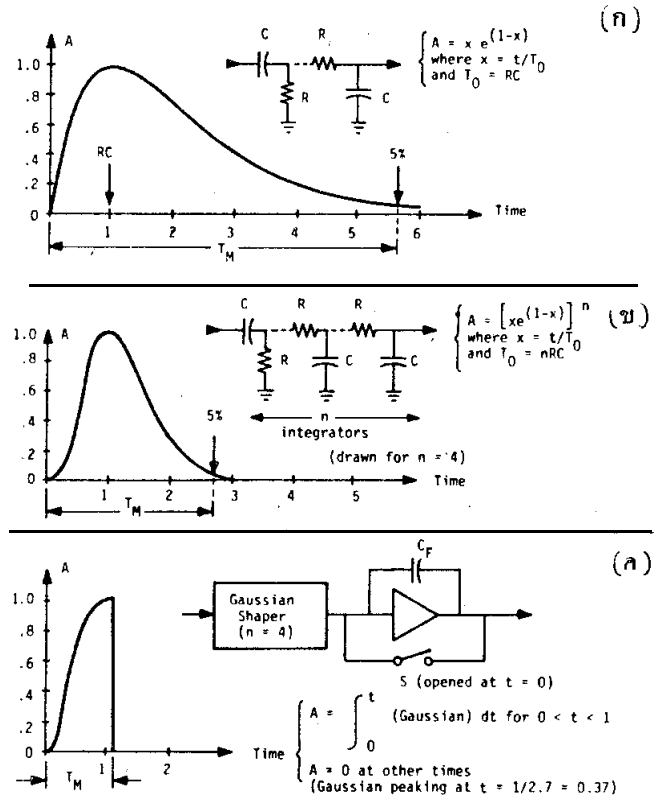
คุณสมบัติข้อสองคือความเที่ยงตรงในการขยายสัญญาณ โดยทั่วไปถ้าวิเคราะห์โดยใช้คอมพิวเตอร์ ยอมให้เบี่ยงเบนได้ 1% เมื่อเปรียบเทียบอำพนของสัญญาณที่ต้องการวิเคราะห์กับการตอบสนองสัญญาณจริงของอุปกรณ์ ถ้าสัญญาณจากแอมพลิไฟเออร์ไม่เที่ยงตรง ผลจะส่งไปยังสเปคตรา

นอกจากนี้ คุณสมบัติสำคัญอีกประการหนึ่งคือ ความสามารถในการรับสัญญาณขนาดมากๆ กล่าวคือ ถ้ามีสัญญาณปริมาณมากๆ เข้าสู่แอมพลิไฟเออร์ จะต้องมีการปรับสภาพภายในอุปกรณ์นี้ในช่วงเวลาสั้นๆ เพื่อจะรับสัญญาณชุดใหม่ได้ และยังไม่ก่อสัญญาณเอาท์พุทที่เป็นตัวรบกวนใดๆ คุณสมบัติเช่นนี้จำเป็นอย่างยิ่งต่อระบบจัดรับสัญญาณใหม่ ทั้งนี้เนื่องจากถ้าเกิดการปล่อยประจุของตัวจุป้อนกลับในพรีแอมพลิไฟเออร์ จะเกิดสัญญาณปริมาณมากแต่มีขั้วตรงข้ามกับสัญญาณปกติ (คือจากโฟตอน)

ส่วนคุณสมบัติการจัดรูปร่างสัญญาณ จะส่งผลต่อเรโซลูชันของระบบลักษณะการทำงานของคุณสมบัตินี้คือ ระบบจัดรูปร่างสัญญาณจะแปลสัญญาณอินพุท (รูปร่างเป็นระดับความสูงของแรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูป 2.7 ด้านขวา) ให้กลายเป็นสัญญาณคลื่นที่มีช่วงเวลาการก่อ (rise time) และช่วงเวลาสร้างสัญญาณอย่างสมบูรณ์ตามขอบเขตจำกัด ซึ่งถ้าใช้เวลาสั้นๆ ในการสร้างสัญญาณที่สมบูรณ์จะแก้ปัญหาการแทรกสอดของสัญญาณได้ แต่ถ้าต้องการให้เรโซลูชันดีต้องใช้เวลานาน ดังนั้น ต้องแบ่งความต้องการระหว่างเรโซลูชันและค่านับวัดสูงๆให้พอเหมาะ เพื่อง่ายต่อการเข้าใจกลไกการจัดรูปร่างสัญญาณ นิยามบางพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องคือ

T_m = ช่วงเวลาในการนับวัด กำหนดให้เป็นเวลาที่สัญญาณเริ่มก่อและถึงจุดสูงสุด จากนั้นตกลงถึง 5% ของค่าสูงสุด แสดงในรูป 2.9 วงจรจัดรูปร่างสัญญาณจะมีลักษณะเป็น (passive) กล่าวคือ จะประกอบด้วยธาตุวงจรซึ่งมีค่าตรึง-ไม่แปรตามเวลา วงจรอินทีเกรต RC และวงจรดิฟเฟอร์เรนจิเอต (differentiate) ในรูป 2.9 (ก) แสดงหางของสัญญาณด้านขวา

ในรูป 2.9 (ข) ใช้วงจร RC หลายวงจร ปรับสัญญาณได้เกือบสมมาตร เห็นได้ว่า ยิ่งเพิ่มตัวรวมสัญญาณ (integrator) สัญญาณจะมีรูปร่างใกล้เคียงเส้นกราฟแบบเกาเซียน (Gaussian) ยิ่งมีคุณสมบัติสมมาตรจะยิ่งใกล้เคียงสภาพกลางระหว่างเรโซลูชันพลังงานและการทำงานเมื่ออัตรานับวัดมีค่าสูง จึงเป็นที่นิยมใช้อย่างแพร่หลาย ซึ่งบางกรณีอาจดัดแปลงวงจรบ้าง แต่ยังคงสภาพที่ประกอบด้วยหลายอินทีเกรเตอร์อยู่



รูป 2.9 วงจรการจัดรูปร่างสัญญาณที่ใช้ในแอมพลิไฟ เออร์

(ก) RC ดิฟ เฟอร์ เรนจิ เอ เตอร์ - RC อินที เกร เตอร์

(Y) RC ดิฟ เฟอร์ เรนจิ เอ เตอร์ - RC อินที เกร เตอร์ท วีคูณ

(ค) เกตท์อินที เกร เตอร์

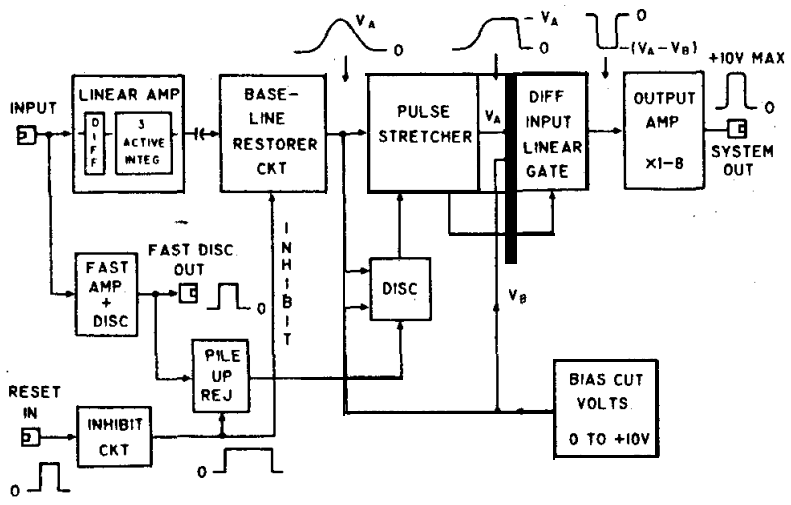
ส่วนรูป 2.9 (ค) เป็นระบบที่ซับซ้อนกว่าสองระบบแรก และคาดว่าจะยังไม่ เป็นที่นิยมใช้ ลักษณะการทำงานดีกว่าสองระบบแรก ค่าของสัญญาณที่ได้จากส่วนประกอบย่อยๆ จะถูกจัดรูปร่างให้มีการกระจายแบบ เกา เซียนโดยส่วนจัดรูปร่างสัญญาณกัมมันตซึ่งถูกกำหนดให้ทำงาน (switch on) ในช่วง เวลาที่สอดคล้องกับสัญญาณที่ได้รับ เรียกชื่อ เป็นอินที เกร เตอร์แบบ เกต (gated integrator)

อย่างไรก็ตาม การเลือกค่า T_m ที่เหมาะสมเป็นสิ่งจำเป็น (จากรูป 2.9) เนื่องจาก T_m เป็นตัวควบคุมเรโซลูชันพลังงาน หรืออาจกล่าวได้ว่า T_m คือลักษณะสมบัติเวลาของสัญญาณเอาท์พุท ซึ่งรายละเอียดในบทนี้ได้กล่าวถึงสัญญาณรบกวนที่เกิดจากวงจรหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เท่านั้น ไม่รวมถึงสถิติการนับวัดของหัววัด

2.5 ระบบการประมวลสัญญาณ

ในตอนที่แล้วได้กล่าวถึงระบบอิเล็กทรอนิกส์ของแอมพลิไฟเออร์ซึ่งรับสัญญาณจากพรีแอมพลิไฟเออร์ วงจรสมบูรณ์ของอิเล็กทรอนิกส์ในเอ็กซ์เรย์สเปคโตรมีเตอร์แสดงในรูป 2.10 แยกอธิบายรายละเอียดของส่วนต่างๆ ดังนี้

1 พรีแอมพลิไฟเออร์รับสัญญาณจากหัววัด แล้วส่งต่อไปยังแอมพลิไฟเออร์หลัก



รูป 2.10 ระบบอิเล็กทรอนิกส์ในเอ็กซ์เรย์สเปคโตรมีเตอร์สมบูรณ์

(2) แอมพลิไฟเออร์หลักทำหน้าที่แยก-ขยาย-และจัดสัญญาณให้มีการกระจายแบบเกาเซียน จากนั้นส่งสัญญาณต่อไปยังเบสไลน์รีสตอเรอร์ (baseline restorer)

(3) เบสไลน์รีสตอเรอร์ทำหน้าที่กำหนดระดับต่ำสุดของสัญญาณ จากอุปกรณ์ส่วนนี้ไปยัง

ตัวแปลงสัญญาณอนาลอก เป็นดิจิตอลต้องมีการต่อกระแสตรง เลี้ยงและแนว เส้นต่ำสุด (baseline) ที่กำหนดโดยอุปกรณ์นี้จะ เป็นค่าที่ใช้ในการวัดอำพนของสัญญาณตลอดระบบการนับวัด ปัญหาคือถ้า มีการกรูสัญญาณ เข้าสู่อุปกรณ์ดังกล่าวในตอน 2.4 แล้ว จะมีผลต่อ เบสไลน์หรือไม่? คำตอบคือ ถ้ามี เหตุการณ์ดังกล่าว (ปกติ เกิด เมื่ออัตรานับวัดมีค่าสูง) ย่อมมีผลต่อ เบสไลน์แน่นอน และผล ต่อไปคือค่า เรโซลูชันพลังงาน ดังนั้นรีสตอ เรอร์ต้องได้รับการออกแบบ เพื่อ เลี่ยงหรือลดสภาพ การกรูดังกล่าวของสัญญาณให้มีค่าน้อยที่สุด เพื่อจะไม่ส่งผลต่อรูปร่างสัญญาณที่ส่งออก (หรืออาจ มีแต่น้อยมากจนละทิ้งได้) โดยทั่วไป รีสตอ เรอร์จะประพฤติตน เป็นแคลมป์ (clamp) ต่อ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ เป็นลบ กรณีพรีแอมพลิไฟ เออร์อยู่ในจุด เวลา เริ่มต้นใหม่ (reset) จะ เกิดสัญญาณลบมากซึ่งย่อมส่งผลต่อ เบสไลน์ แต่กริยาแคลมป์ของรีสตอ เรอร์จะถูกตัดระหว่างช่วง เวลาที่พรีแอมพลิไฟ เออร์ เริ่มต้นทำงานใหม่ และคล้อยจากช่วง เวลาดังกล่าวอีก เล็กน้อย

(4) ฟาสต์แอมพลิไฟ เออร์ (fast amplifier). ทำหน้าที่ขยายสัญญาณสั้นๆซึ่ง เกิดจาก พรีแอมพลิไฟ เออร์ ในบล็อคนี้ยังรวมถึงฟาสต์ดิสคริมิ เน เตอร์ (fast discriminator) ซึ่ง ทำหน้าที่จัดหาสัญญาณที่สมนัยกับสัญญาณรูปร่างแบบ เกา เซียนซึ่งผลิตโดยแอมพลิไฟ เออร์หลัก สัญญาณ เหล่านี้อาจ เรียกชื่อ เป็น "สัญญาณฟาสต์" (fast signal) และมักถูกใช้ เพื่อทำหน้าที่ภายนอก ระบบ เช่น เพื่อกันการ เกิดสัญญาณปริมาณมากๆ

(5) วงจรป้องกันสัญญาณปริมาณมากๆ (pile-up rejection circuit) ซึ่งในแผน ภาพ เขียน เป็นบล็อค "PILE UP REJ" ทำหน้าที่สำรวจการซ้อนหรือรบกวนของสัญญาณฟาสต์ 2 สัญญาณ ถ้าพบว่ามีกรณีดังกล่าวอาจกำจัดทั้งสองสัญญาณนั้น หรือมี เพียงสัญญาณ เดียวที่ถูก กำจัดออกไป กล่าวคือ เกิดมี 2 สัญญาณฟาสต์ที่ก่อขึ้นใน เวลาสั้นๆจนระบบไม่สามารถแยกแต่ ละสัญญาณจึง เกิดการซ้อนหรือการรบกวนของทั้งสองสัญญาณดังกล่าว ซึ่ง เป็นกรณีการนับวัดความ สูงของสัญญาณแบบซ้ำๆ เหตุผล เพื่อกันการไหม้ของตัวกำจัดสัญญาณ (ในแผนภาพคือ DISC) ดังนั้น จะ เป็นตัวกันสัญญาณที่จะ เดินทางสู่บล็อค เสริมสัญญาณ

(6) วงจร เสริมสัญญาณ (stretcher circuit) ได้รับการป้อนสัญญาณจาก เบสไลน์ รีสตอ เรอร์ สัญญาณนี้จะต้องมีขนาดสูงกว่า เบสไลน์และไม่ถูกแทรกแซงหรือรบกวนจากสัญญาณ อื่น วงจร เสริมสัญญาณจะช่วย เสริมให้มีค่าอำพน เท่าพีค (peak) หรือค่าสูงสุด

(7) ดิฟเฟอร์เรนเชียลลิเนียร์เกต (differential linear gate) ทำหน้าที่สร้างสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ในรูป 2.10 เขียนย่อเป็น "DIFF INPUT LINEAR GATE" ส่งสัญญาณออกไปยังหน่วยเอาท์พุทของแอมพลิไฟเออร์ สัญญาณเหล่านี้มีอำพนขนาดเดียวกับความสูงของสัญญาณพีคลบด้วยระดับไบแอสของดิสคริมิเนเตอร์ ส่วนของสัญญาณที่สูงระดับไบแอสเท่านั้นที่จะผ่านไปยังบล็อคเอาท์พุทแอมพลิไฟเออร์

(8) เอาท์พุทแอมพลิไฟเออร์ (output amplifier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณให้ตรงกับช่วงอำพนของสัญญาณของหน่วยวิเคราะห์สัญญาณ (pulse height analyzer)

นอกจากนี้ ในการทดลองเอ็กซ์เรย์สเปคโตรมิเตอร์ต้องคำนึงถึงค่า "เดดไทม์" (dead time) ซึ่งเป็นช่วงที่ระบบไม่ทำการนับวัดสัญญาณ เนื่องจากอยู่ในระหว่างการบันทึกสัญญาณนับวัดที่เข้าสู่ระบบก่อน วิธีหนึ่งที่ใช้เป็นเทคนิคแก้หรือชดเชยช่วงเวลาดังกล่าวที่มีการสูญเสียอัตรานับวัดโดยจัดปรับเวลาในการนับวัด

2.6 ผลของเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดสัญญาณต่อระบบนับวัด

ถ้าออกแบบการทดลองซึ่งก่อให้เกิดอัตราการสลายตัวเร็ว กล่าวคือ มีการปล่อยรังสีเอ็กซ์ปริมาณมากเข้าสู่หัววัด วงจรที่ป้องกันการกรูสัญญาณดังอธิบายแล้วในตอน 2.5 จะทำหน้าที่กันหรือปฏิเสธการนับวัดของสัญญาณดังกล่าว จึงมีเพียงสัญญาณปริมาณน้อยๆ เท่านั้นที่เข้าสู่วงจรวิเคราะห์สัญญาณ จากการทดลองพบว่า ถ้าสัญญาณอินพุทอัตราต่ำ ค่าอัตรา-เอาท์พุทจะตามอัตราอินพุท (คือเป็นสัดส่วนโดยตรงนั่นเอง) แต่ถ้าสัญญาณอินพุทมีอัตราสูง (หรือสูงมาก) อัตราเอาท์พุทจะลดค่าลงอย่างรวดเร็ว ดังนั้น การกำหนดปริมาณรังสีเอ็กซ์จากสารตัวอย่างจึงจำเป็นต้องคำนึงถึงกรณีดังกล่าว ซึ่งต้นเหตุสำคัญคือการเลือกวิธีการกระตุ้นให้เกิดเอ็กซ์เรย์นั่นเอง เช่น พวกธาตุหนักซึ่งใช้ต้นกำเนิดที่กระตุ้นอย่างต่อเนื่อง ย่อมเกิดรังสีเอ็กซ์ความเข้มสูงและต่างกรูเข้าสู่หัววัด เป็นต้น เพื่อแก้ไขข้อบกพร่องดังอธิบายแล้วข้างต้น ทำโดยเลือกใช้ระบบการนับวัดที่มีประสิทธิภาพสูง แต่คุณสมบัตินี้จะต้องเป็นระบบ

ที่ซับซ้อนพอสมควร ตัวอย่าง เช่นแสดงในรูป 2.10 หรือ เลือกใช้ เทคนิคการกระตุ้นด้วยหลอดเอ็กซ์เรย์ หรือลำอนุภาค เป็นต้น

2.7 การประมวลผลข้อมูล

เอาท์พุทของระบบอิ เล็กทรอนิกส์ในรูป 2.9 ประกอบด้วยสัญญาณซึ่งอำพนแปรค่าการกระจายพลังงานของโฟตอนในส เปคตรัมฟลูออร์ เรส เซนส์ เพื่อจะแสดงผลหรือแปลความหมายของข้อมูล ได้ทำการแปลงอำพนของสัญญาณดังกล่าวให้อยู่ในรูปตัว เลข และ เก็บข้อมูลไว้ในลักษณะฮิสโตแกรม (histogram) หรือคล้ายสภาพคู่สิ้นชักนั่น เอง ส เปคตรัมความสูงของสัญญาณแบบฮิสโตแกรมนี้พร้อม เสมอที่จะถูกนำไปทดสอบหรือตีความหมาย

ลักษณะการทำงานดังกล่าวมักสมบูรณ์อยู่แล้วในระบบการวิ เคราะห์ข้อมูลแบบมัลติ-แชน เนล อาจ เป็น 1024 แชน เนลซึ่งนับวัดพลังงาน เอ็กซ์ เรย์ได้ในช่วง 30 keV หรือน้อยกว่า กล่าวคือ พีค เกา เซียนขนาดกว้าง 200 eV ณ บริ เวณเหนือจุดกึ่งพีค (half-maximum point) อาจแสดงใน 7 แชน เนล ซึ่งส่วนใหญ่จะวิ เคราะห์ข้อมูลด้วยระบบคอมพิว เตอร์ งานที่ได้ เช่น แสดงภาพความ เข้ม เป็นส เปคตรัมแบบ เกา เซียน คำนวณความ เข้มและอาศัยข้อมูลนี้ย้อนคำนวณกลับ เป็นความ เข้มข้นของธาตุ เธรส

2.8 บทสรุป

ในงานวิ เคราะห์โดย เทคนิค เอ็กซ์ เรย์ฟลูออร์ เรส เซนส์ นิยมใช้หัววัดสารกึ่งตัวนำ Si(Li) ควบคู่กับอุปกรณ์วิ เคราะห์สัญญาณแบบมัลติแชน เนลและคอมพิว เตอร์ พลังงาน เอ็กซ์ เรย์จากสารตัวอย่างจะมีการกระจายค่าแบบ เกา เซียน ส่วนแบคกราวนด์แยกออก เป็น 2 ประ เภทตามแหล่งกำ เนิดดังนี้

(1) พีค เอ็กซ์ เรย์ที่หลบหายไป

(2) แบคกราวนด์ต่อ เนื่อง

ระบบนับวัดและจับ เก็บสัญญาณ เอ็กซ์ เรย์มักประกอบด้วยวงจรขยาย 2 ส่วน ส่วนแรกทำหน้าที่คล้ายกับหัวกลาง เชื่อมทาง เดินของสัญญาณจากหัววัด ไปยังวงจรขยายหลัก ซึ่งอาจมีการขยายบ้าง เล็กน้อย ส่วนสำคัญคือส่วนที่สองของวงจรขยาย ทำหน้าที่ขยายและจัดรูปร่างสัญญาณ เป็นหลัก ซึ่งในสองวงจรดังกล่าวยังประกอบด้วยวงจรกำจัดสัญญาณ ดังแสดงในรูป 2.8 และ 2.9 ในรูป 2.10 แสดงแผนภาพของระบบการประมวลสัญญาณซึ่งแยก เป็นส่วนประกอบย่อยๆ 7 ส่วน

ประสิทธิภาพในการนับวัด เอ็กซ์ เรย์ขึ้นกับหลายตัวประกอบ ดังนี้

(1) เทคนิคการกระตุ้นให้ เกิด เอ็กซ์ เรย์ในสารตัวอย่างต้อง เหมาะสมกับชนิดของสารตัวอย่าง เช่น สารตัวอย่างอาจ เป็นโลหะหนัก หรือ เป็นธาตุ เบา

(2) หัววัดที่ใช้ในการนับวัดสัญญาณจากข้อ (1)

(3) ระบบการจับ เก็บและแสดงผลข้อมูล ซึ่งต้องใช้ควบคู่กับส่วนประกอบที่ (2) ถ้าต้องการประสิทธิภาพดี เยี่ยม แน่นอนว่าระบบจะต้องซับซ้อน

(4) จีโอ เมทรีของการทดลอง

แบบฝึกหัดบทที่ 2

1. สารกึ่งตัวนำที่ใช้ทำหัววัดกัมมันตภาพรังสีมีอะไรบ้าง? เหตุใดจึงต้องมีการเติมสารเจือ

2. อธิบายกลไกการเกิดสัญญาณจากการที่กัมมันตภาพรังสีชนกับหัววัด

3. อธิบายความหมายของ (1) เรโซลูชันของหัววัด

(2) แบคกราวนด์ในสเปคตรัม

(3) ความสัมพันธ์ของข้อ (1) และ (2)

4. พีค เอ็กซ์เรย์ที่หลบหายนั้น เกิดจากอะไร ผู้ทำการวิเคราะห์จะตรวจวัดพีคดังกล่าวได้อย่างไร?

5. ตามความเห็นของท่าน "บริเวณบอดของหัววัด" หมายถึงอะไร? เกิดจากอะไร?

6. พรีแอมพลิไฟเออร์มีหน้าที่อย่างไรในระบบนับวัดกัมมันตภาพรังสี

7. แอมพลิไฟเออร์ที่ดีควรมีคุณสมบัติอย่างไร และคุณสมบัติเหล่านั้นจำเป็นอย่างไรสำหรับเอ็กซ์เรย์สเปคโตรมีเตอร์

6. ร่างแผนภาพแสดงระบบการประมวลสัญญาณของเทคนิค FEA พร้อมทั้งอธิบายรายละเอียดของแต่ละส่วนประกอบ

9. ประสิทธิภาพของระบบนับวัดในเทคนิค FEA สัมพันธ์กับเทคนิคการกระตุ้นให้เกิดเอ็กซ์เรย์ฟลูออร์เรสเซนส์อย่างไร?