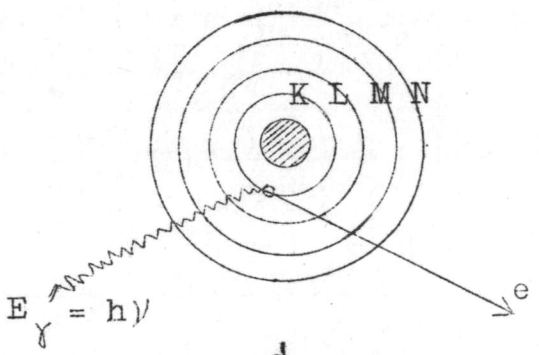
บทที่ 3

เครื่องวัดรังสี

3.1 การวัดพลังงานรังสีแกมมา

รังสีแกมมาเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าความถี่สูง ในการวัดพลังงานรังสีแกมมาจึงต้องใช้วิธีทางอ้อม โดยอาศัยการเกิดปฏิกริยาของรังสีแกมมาต่อวัตถุซึ่งมีอยู่หลายวิธี แต่ปฏิกริยาที่นำมาใช้เกี่ยวกับการวัดรังสีได้แก่

1. The Photoelectric Effect เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาเข้าไปในวัตถุแล้ว ถ่ายทอดพลังงานทั้งหมดของรังสีแกมมาให้แก่อีเลคตรอนที่วนรอบนิวเคลียส โดยเฉพาะอย่างยิ่งอีเลคตรอนในวง K และ L ซึ่งเป็นวงในมีพลังงานต่ำ ทำให้อีเลคตรอนหลุดออกมาจากวงโคจรออกไปภายนอกอะตอมเรียกว่า โฟโตอีเลคตรอน (Photoelectron) โฟโตอีเลคตรอนนี้จะทำให้เกิด secondary ionization อีกทีหนึ่ง



รูปที่ 3-1

The Photoelectric Effect

พลังงานรังสีแกมมา = พลังงานจลน์ของโฟโตอีเลคตรอนรวมกับพลังงานของอีเลคตรอนขณะที่อยู่ในวงรอบนิวเคลียส

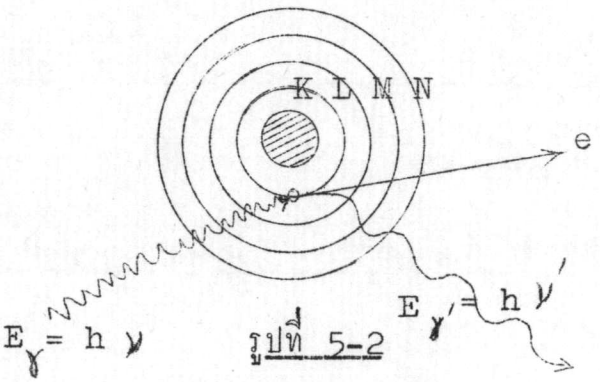
ผลของโฟโตอีเลคตริคเอฟเฟคนี้มักทำให้เกิดรังสีเอ็กซ์ขึ้น เนื่องจากอีเลคตรอนที่อยู่วงนอกอะตอมเข้ามาแทนที่โฟโตอีเลคตรอนแล้วถ่ายทอดพลังงานออกมาในรูปพลังงานรังสีเอ็กซ์

โอกาสของการเกิดโฟโตอีเลคตริคเอฟเฟคนี้แปรตามค่าของอะตอมมิคนัมเบอร์ (Atomic number) ยกกำลังสี่และแปรผกผันกับพลังงานรังสีแกมมายกกำลังสาม ดังนั้นโฟโตอีเลคตริคเอฟเฟคจะเกิดได้ง่ายจากรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำและ

ธาตุหนัก ๆ เป็นส่วนใหญ่

2. The Compton Effect เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมาถ่ายทอดพลังงานให้กับอีเลคตรอนวงรอบอะตอมแล้วยังมีพลังงานเหลืออยู่ ทำให้รังสีแกมมาออกมาจากอะตอมโดยมีพลังงานน้อยลง ดังสมการ

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + (h\nu/m_0c^2)(1-\cos\theta)}$$



รูปที่ 5-2 The Compton Effect

$h\nu$ = พลังงานเดิมของรังสีแกมมา

$h\nu'$ = พลังงานของรังสีแกมมาที่กลับออกมา

θ = มุมที่รังสีแกมมาเบี่ยงเบนไปจากเดิม

m_0 = มวลของอีเลคตรอนในสภาพปกติ

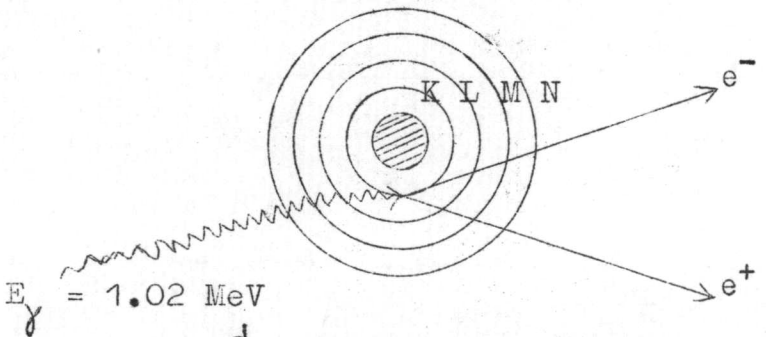
c = ความเร็วของแสง

อีเลคตรอนวงรอบอะตอมที่ได้รับพลังงานจากรังสีแกมมาก็จะหลุดออกมาด้วยโดยมีพลังงาน ดังสมการ

$$E_e = \frac{h\nu}{1 + m_0c^2/2h\nu}$$

โอกาสของการเกิดคอมป์ตันเอฟเฟคแปรผกผันกับพลังงานรังสีแกมมาและจะมีโอกาสมากสำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงานมากกว่า 1 MeV

3. Pair Production เกิดขึ้นเมื่อรังสีแกมมามีพลังงาน ขนาด 1.02 MeV เข้าไปในอะตอมของธาตุแล้วหายไป แล้วเกิดอีเลคตรอน (electron) และโพซิตรอน (positron) ซึ่งต่างก็มีพลังงานขนาด 0.51 MeV ขึ้นแทน โพซิตรอนที่เกิดขึ้นนี้มักจะมีชีวิตอยู่ไม่นานนักก็จะรวมกับอีเลคตรอน

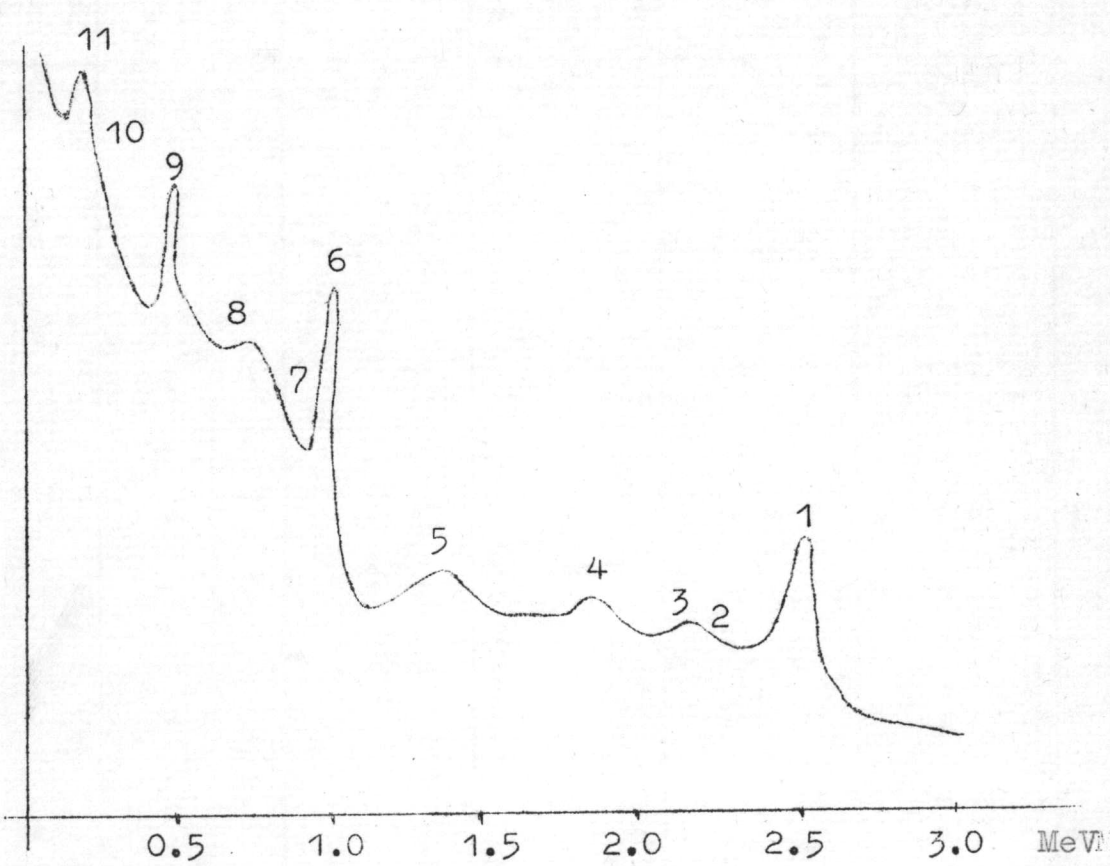


รูปที่ 5-3 Pair Production

กลายเป็นรังสีแกมมาตามขบวนการที่เรียกว่าแอนนิฮิเลชั่น (Annihilation)

โอกาสในการเกิดแพรโปรตัดชั่นนี้แปรตามอะตอมมิคนัมเบอร์ยกกำลังสอง และมักจะเกิดกับธาตุหนัก ๆ

รังสีแกมมาจะให้ผลต่อวัตถุดังที่ได้กล่าวแล้ว ถ้าเราวัดรังสีแกมมาด้วยเครื่องวัดแบบซิลทิลเลชั่น (Scintillation Detector) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานรังสีแกมมาให้ออกมาในรูปของพลังงานแสงสว่าง หรือเซมิคอนดัคเตอร์ดีเทคเตอร์ (Semi-Conductor Detector) ซึ่งเปลี่ยนรูปพลังงานรังสีแกมมาออกมาในรูปของคู่อีเลคตรอน-โฮลด์ ซึ่งจะได้กล่าวต่อไป เมื่อนำผลการวัดต่อกับมัลติชันแนล-อะนัลไลเซอร์ (Multichannel Analyzer) จะเห็นพลังงานของรังสีแกมมาในรูปของยอดแหลมของพลังงาน (peak) ต่าง ๆ ดังรูปที่ 3-4



รูปที่ 3-4 Spectrum ของพลังงานรังสีแกมมา

รายละเอียดของยอดพลังงานต่าง ๆ ในรูปที่ 3-4 อธิบายได้ดังนี้

หมายเลข 1. Photopeak ขนาด 2.50 MeV

หมายเลข 2. Compton edge ของ หมายเลข 1

หมายเลข 3. Compton peak ของ หมายเลข 1

หมายเลข 4. Single escape peak จากการเสียไป 1 photon

= 2.50 - 0.51 = 1.99 MeV

หมายเลข 5. Double escape peak จากการเสียไป 2 photon

= 2.50 - 1.02 = 1.48 MeV

หมายเลข 6. Photopeak พลังงานต่ำขนาด 1 MeV

หมายเลข 7. Compton edge ของ หมายเลข 6

หมายเลข 8. Compton peak ของ หมายเลข 6

หมายเลข 9. 0.51 MeV peak ของ annihilation

หมายเลข 10. Compton edge ของ หมายเลข 9

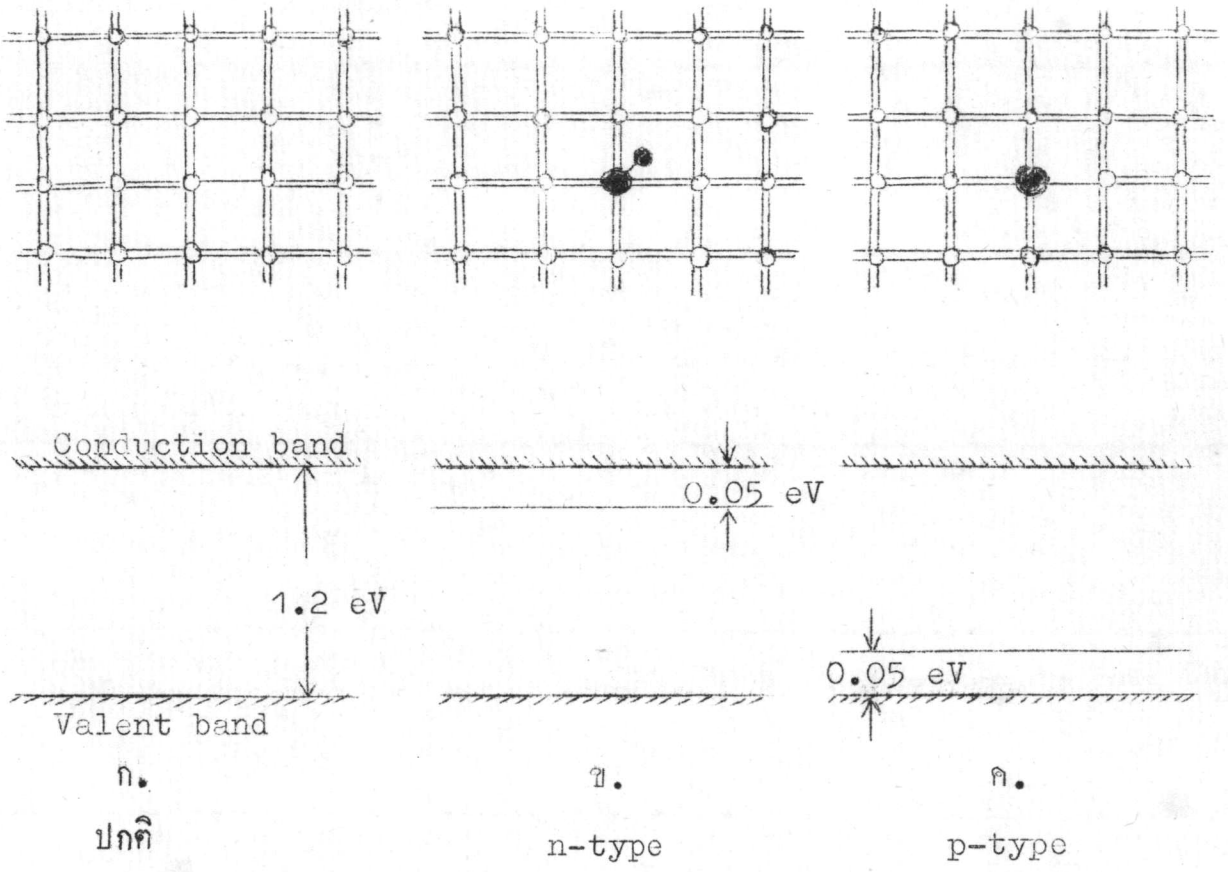
หมายเลข 11. Back scattering peak จากสิ่งแวดล้อม

จากรูปนี้จะเห็นได้ว่ารังสีที่มีพลังงานต่ำจะถูกรบกวนด้วยรังสีที่มีพลังงานสูงกว่า

3.2 หัววัดรังสีชนิดเซมิคอนดักเตอร์

3.2.1 สารเซมิคอนดักเตอร์และการเติมสิ่งเจือปน (Semiconductor and Doping)

ผลึกของธาตุซิลิกอน (Silicon; Si) เจอร์มาเนียม (Germanium; Ge) เป็นธาตุที่มีวาเลนซี 4 จับกันอยู่แบบโควาเลนท์ (Covalent Bond) ทำให้ไม่แสดงคุณสมบัติเป็นตัวนำหรือฉนวนที่ดี แต่ก็มีบางส่วนที่ไม่เกิดการจับตัวกันอย่างสมบูรณ์ ทำให้แสดงคุณสมบัติเป็นตัวนำบ้างในบางขณะซึ่งเราอาจจะแสดงแถบของพลังงานของสารพวกนี้ด้วย Conduction band และ Valence band ปรากฏว่าความกว้างของแถบพลังงานนี้จะมีค่า 1.2 eV สำหรับธาตุซิลิกอน และ 0.78 eV สำหรับธาตุเจอร์มาเนียม ในรูป 3-5 แสดงสมบัติของธาตุซิลิกอน



รูปที่ 3-5 ธาตุซิลิกอนและการเติมสิ่งเจือปน

ตามรูป 3-5 ก. แสดงถึงสภาพปกติของธาตุซิลิกอนซึ่งมีช่วงกว้างระหว่างคอนดัคชั่น แบนด์ และ เวเลนท์ แบนด์ 1.2 eV

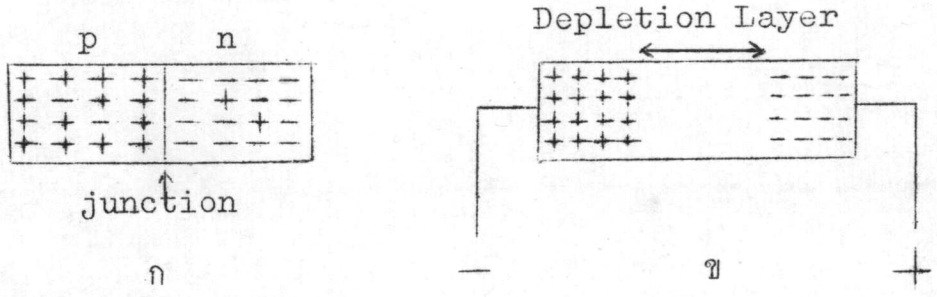
ถ้าเรานำธาตุที่มีวาเลนซี 5 เช่น ฟอสฟอรัส, อาเซนิค และ แอนติโมนี จำนวนน้อย ๆ มาเติมหรือแทรกเข้าไประหว่างอะตอมของธาตุซิลิกอนแล้วก็จะทำให้อีเลคตรอนเหลือจากการจับคู่กับอะตอมอื่นอยู่ 1 ตัว ทำให้ธาตุซิลิกอนที่ถูกเจือแล้วนี้ทำหน้าที่เป็นตัวนำให้อีเลคตรอนได้ดียิ่งขึ้นหรือกล่าวได้ว่าทำให้ช่วงกว้างของคอนดัคชั่นแบนด์ และวาเลนซ์แบนด์ลดลงเหลือเพียง 0.05 eV เท่านั้น ชิลิกอนที่เติมธาตุวาเลนซี 5 จนมีอีเลคตรอนเหลือนี้เรียกว่าเป็นพวกให้อีเลคตรอน (doner)

หรือ n-type semi-conductor

ในทางตรงกันข้าม ถ้าเติมธาตุที่มีวาเลนซี 3 เช่น โบรอน, แกลเลียม ลงไปในผลึกซิลิกอนเล็กน้อยก็จะมีผลทำให้ผลึกขาดอีเลคตรอนไป ทำให้มีความสามารถรับอีเลคตรอนได้ (Accepter) ความสามารถรับอีเลคตรอนนี้มักเรียกกันว่าโฮลด์ (hole) ซึ่งจะทำหน้าที่คล้ายประจุไฟฟ้าบวก ธาตุซิลิกอนที่เติมธาตุวาเลนซี 3 นี้เรียกว่า p-type semiconductor ซึ่งเราอาจจะกล่าวได้ว่าช่วงกว้างของคอนดัคชั่นแบนด์ และวาเลนซ์แบนด์อยู่ห่างกันเพียง 0.05 eV จากวาเลนซ์-แบนด์ เท่านั้น

3.2.2 <u>การวัดรังสี</u>

ถ้าเรานำผลึก n-type และ p-type ที่กล่าวแล้วนั้นมาต่อกันดังรูปที่ 3-6 ก. จะมีการกระจายของอีเลคตรอนและโฮลด์บางส่วนผ่านรอยต่อ (junction) ของ p-n type นั้นได้



<u>รูปที่ 3-6</u> p-n type semi-conductor

ถ้าต่อศักดาไฟฟ้าบวก (+) เข้าที่ปลายของ n-type และต่อศักดาไฟฟ้าลบ (-) ที่ปลายของ p-type ก็จะทำให้อีเลคตรอนและโฮลด์ไปออกันอยู่ที่ปลายของ n-type และ p-type ตามลำดับ ทำให้เกิดช่วงว่างตรงรอยต่อ ไม่มีทั้งอีเลคตรอนและโฮลด์เรียกว่า Depletion layer ซึ่งจะทำหน้าที่คล้าย ๆ ฉนวน

กั้นอยู่

เมื่อ Depletion layer นี้ได้รับรังสีก็จะทำให้เกิดคู่ของอีเลคตรอน-โฮลล์ ตามปฏิกริยาของรังสีนั้น ๆ เกิดสัญญาณไฟฟ้าตามขนาดของรังสีส่งเป็นสัญญาณไปยังเครื่องมือทางอีเลคโทรนิคส์ ซึ่งเป็นส่วนช่วยเหลือต่อไป

3.2.3 ข้อดีของหัววัดแบบเซมิคอนดัคเตอร์

หัววัดแบบเซมิคอนดัคเตอร์นี้มีข้อดีกว่าหัววัดแบบอื่น ๆ หลายประการคือ

1. วัดได้ละเอียด ในการทำให้เกิดคู่อีเลคตรอน-โฮลดนั้นปรากฏว่าใช้พลังงานเพียง 3.5 eV/pairs เท่านั้น เมื่อเทียบกับแกสซึ่งต้องใช้ถึง 36 eV/pairs แล้วนับว่าเครื่องวัดแบบนี้สามารถใช้วัดพลังงานได้ละเอียดมาก

2. ความไวในการวัดสูง การเคลื่อนที่ของอีเลคตรอนในหัววัด(mobility) ประมาณ 1500 ซม.^{2} ต่อโวลท์ต่อวินาที และของโฮลดมีความไว 500 ซม.^{2} ต่อโวลท์ต่อวินาที เวลาที่วิ่งในหัววัดจะใช้เวลาเพียง 10^{-8} วินาทีต่อการวัดครั้งหนึ่ง ๆ ซึ่งนับว่ามีความไวสูงมาก

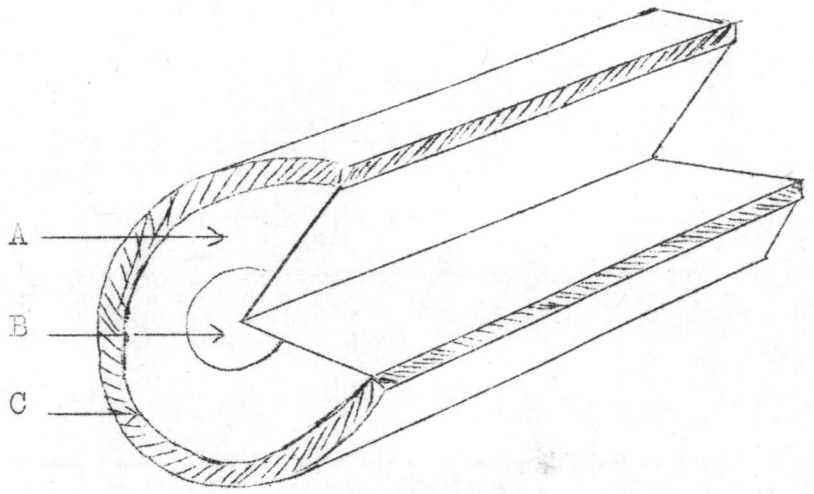
3. กำลังแยกช่วงพลังงาน (Energy Resolution) สูงสามารถแยกพลังงานรังสีแกมมาได้ละเอียดมาก

4. หัววัดมีขนาดเล็ก

3.3 หัววัด Ge(Li)

หัววัดเซมิคอนดัคเตอร์ที่ใช้ในการวัดรังสีในการวิจัยนี้เป็นแบบ p-i-n junction ทำจาก p-type ของเจอร์มาเนียมซึ่งมีคุณภาพสูงและมี n-type เป็นลิเซียมซึมผ่านเข้าไปจากส่วนนอกของผลึกเข้าไปหาแกนกลางของผลึกโดยการใช้สนามไฟฟ้าสูง ๆ และควบคุมด้วยความระมัดระวัง

รูปที่ 3-7 แสดงให้เห็นส่วนภายในของหัววัด Ge(Li) แบบที่เรียกว่า True Right Circular Cylinder (TRCC) Coaxial Detector ซึ่งสร้างโดยบริษัท Ortec



รูปที่ 3-7 ภาพผ่าซีกของหัววัด Ge(Li)

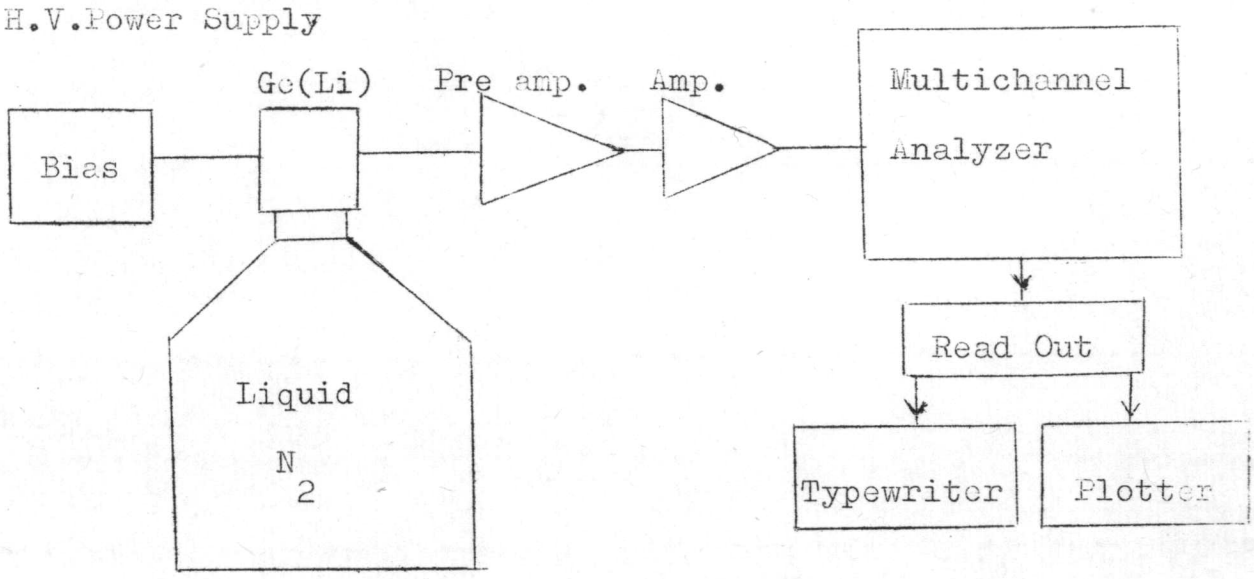
A เป็นส่วนที่เรียก intrinsic region เป็น Li compensator

B เป็นสารชนิด p-type แบบเจอร์มาเนียมอยู่แกนกลาง

C เป็นส่วนผิวนอกเป็นสารชนิด n-type ซึ่งเป็นส่วนที่ลิเธียมจะซึมเข้าไป

โครงสร้างของอะตอมของ intrinsic germanium ต้องการอุณหภูมิต่ำ ๆ เพื่อที่จะรักษาให้อะตอมของลิเธียมอยู่ที่สภาวะเช่นนี้ ต้องอยู่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลวคือ -196° ซ. โดยมีระบบความเย็น (Cryostat) และถังเก็บไนโตรเจนเหลว

การต่อวงจรอีเลคโทรนิคส์ เข้ากับหัววัด Ge(Li) แสดงดังรูป 3-8



รูปที่ 3-8 ผังวงจรของระบบหัววัดรังสี Ge(Li)

3.3.1 Energy Resolution ของ Ge(Li) Detector

ค่ากำลังแยกพลังงานของหัววัด Ge(Li) จะมีขีดจำกัดอันหนึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณของคู่ประจุไฟฟ้า (ion pairs) ที่เกิดขึ้นจากพลังงานของรังสีแกมมาที่เข้าไป ขีดจำกัดนี้ยังขึ้นอยู่กับค่าที่เรียกว่า Fano factor ด้วย เนื่องจากพลังงานรังสีแกมมาที่รับไว้ในหัววัดนี้ส่วนหนึ่งจะทำให้เกิดคู่ของประจุไฟฟ้า (ion pairs) อีกส่วนหนึ่งจะทำให้โครงสร้างของผลึกมีอุณหภูมิสูงขึ้น

ให้ C เป็นพลังงานเป็น eV ที่ทำให้เกิดประจุไฟฟ้า 1 คู่ในเจอร์มาเนียม

E เป็นพลังงานรังสีแกมมาทั้งหมด

Y เป็น yield ที่จะเกิดคู่ประจุไฟฟ้าขึ้น

เมื่อพลังงานทำให้เกิดคู่ประจุไฟฟ้าทั้งหมด

$$Y = \frac{E}{C}$$

Fano factor, F มีค่าเท่ากับ variance σ^2 ของ yield ต่อ yield ของการเกิดคู่ประจุไฟฟ้า

$$F = \frac{\sigma^2}{E/C}$$

$$\sigma^2 = \frac{EF}{C}$$

$$C\sigma = \sqrt{CEF}$$

จาก S.O.W Antman, Nuclear Instrument and Methods, 40 (1966), 272

$$C = (2.98 \pm 0.01) \times 10^{-3} \text{ KeV/ion pairs}$$

ค่าของการแยกพลังงานของหัววัด Ge(Li) นิยมบอกกันเป็นค่า Full Width Half Maximum, FWHM ซึ่ง $= 2.355\ C\sigma$

FWHM in KeV สำหรับรังสีแกมมาที่มีพลังงาน E KeV

$$\text{FWHM} = 2.355 \sqrt{CEF} \qquad (3\text{-}2)$$

$$= 2.355 \sqrt{0.00298\ EF}$$

$$= 0.1286 \sqrt{EF} \qquad (3\text{-}3)$$

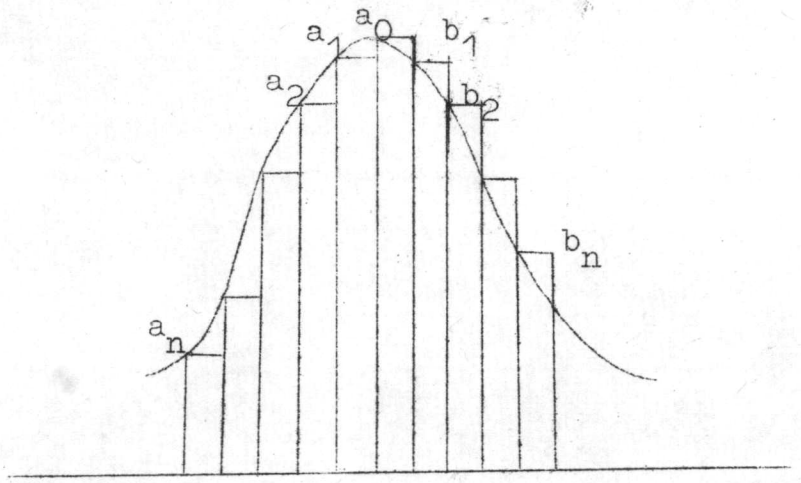
สำหรับเจอร์มาเนียม ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว 77° K

Fano factor, F = 0.13

3.1 การคำนวณหาพื้นที่ใต้ Peak ของแกมมาสเปคตรัม

การหาความแรงของรังสีแกมมาเพื่อดูชนิดของธาตุหรือหาปริมาณของธาตุ โดยการเปรียบเทียบ peak จากแกมมาสเปคตรัมนั้น ถ้าในสารที่วิเคราะห์มีธาตุอยู่หลาย ๆ ธาตุ peak ของรังสีแกมมาที่มีค่าพลังงานน้อยกว่าจะถูกรบกวนด้วย peak ของรังสีแกมมาที่มีพลังงานสูงกว่า ดังได้แสดงในรูปที่ 3-4 แล้ว การแก้การกวนนี้ นิยมใช้การคำนวณพื้นที่ภายใต้ peak ที่เรียกว่า base area แล้วหัก

ออกจากพื้นที่ทั้งหมดของ peak ตามวิธีของ Covell ดังรูปที่ 3-9



รูปที่ 3-9 Pulse Height Analysis ของแกมมาสเปคตรัม

a_o = จำนวนที่นับได้มากที่สุดของ peak

$a_1, a_2, .. a_n$ = จำนวนที่นับได้จาก channel ที่น้อยกว่า a_o

$b_1, b_2, .. b_n$ = จำนวนที่นับได้จาก channel ที่มีค่ามากกว่า a_o

P = เป็นจำนวนที่นับได้ทั้งหมดตั้งแต่ a_n ถึง b_n

Q = เป็นจำนวนที่นับได้ของ base area

N = เป็นจำนวนสุทธิ

$$P = a_o + \sum_{i=1}^{n} a_i + \sum_{i=1}^{n} b_i$$

$$Q = \frac{(2n - 1)(a_n + b_n)}{2} + (a_n + b_n)$$

$$= \frac{(2n + 1)(a_n + b_n)}{2}$$

$$N = P - Q$$

$$= a_o + \sum_{i=1}^{n} a_i + \sum_{i=1}^{n} b_i - (n + \tfrac{1}{2})(a_n + b_n) \quad (3-4)$$

3.5 การสร้าง Calibration Data

Calibration Data เป็นตารางที่เทียบระหว่าง channel ที่เกิด peak ต่าง ๆ กับพลังงานรังสีแกมมานั้น ดำเนินการหาได้ดังนี้

1. ตั้ง High Voltage Power Supply ให้ถูกต้อง ในเครื่องที่ใช้ใช้ 2000 โวลท์

2. ตั้ง Coarse Gain ที่ต้องการทำ Calibration Data และ Fine Gain 1.5

3. ใช้สารกัมมันตรังสีที่ทราบค่าพลังงานแน่นอนจากแหล่งกำเนิดรังสี เช่น Cs^{137}, Mn^{54}, Co^{60}, Na^{22} เป็นต้นกำเนิดรังสี โดยใช้วัดด้วย Ge(Li) Detector แต่ละครั้งด้วยเวลาเท่า ๆ กัน

4. จาก channel ที่ได้จากพลังงานที่ทราบของต้นกำเนิดรังสีต่าง ๆ นำไป plot บนกราฟแบบ linear ระหว่าง channel กับพลังงาน จะได้ Calibration Curve ของ Ge(Li) Detector ที่ Gain นั้น

5. จาก Calibration Curve นำไปทำตารางเทียบระหว่าง channel และพลังงานต่อไป