บทที่ 3

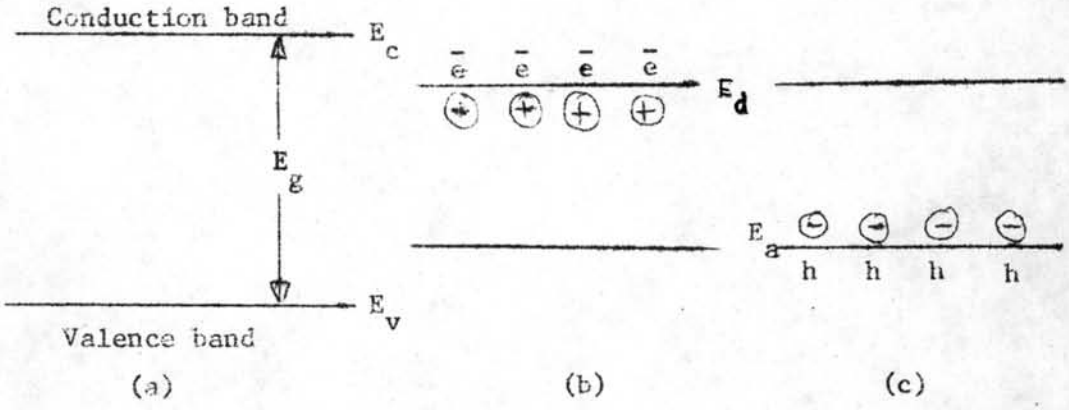
เครื่องวัดรังสี

หอสมุดกลาง จุฬาลงกรณมหาวิทยาลัย

3.1 หัววัดรังสีชนิด สารกึ่งตัวนำ

โครงสร้างของพวกสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) แสดงได้โดยแถบของพลังงาน 2 แถบ แถบแรกที่เรียกว่า วาเลนซ์แบนด์ (Valence band), E_v และแถบที่สองซึ่งมีพลังงานสูงกว่าเรียกว่า คอนดักชันแบนด์ (Conduction band), E_c แสดงดังภาพในรูปที่ 3 - 1 (a) แถบทั้งสองนี้แยกจากกันด้วยช่วงของพลังงาน (Energy Gap), E_g สำหรับซิลิคอน แถบช่วงของพลังงานมีค่า 1.1 eV* ของเจอร์มาเนียมมีค่าเท่ากับ 0.66 eV

รูปที่ 3 - 1 แสดงแถบของพลังงาน, ตัวจ่ายอิเลคตรอน (donor) และตัวรับอิเลคตรอน (acceptor) ของแถบที่มีสิ่งเจือปน



---

* eV : เป็นหน่วยพลังงานของอนุภาค เรียกว่า อิเลคตรอนโวล์ต (electron volt) 1 eV มีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} จูล

002564

การไหลของกระแสไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ มีได้ 2 วิธี คือ วิธีแรกอิเลคตรอนใด ๆในคอนดักชั่นแบนด์ จะเคลื่อนที่ได้โดยเสรี เมื่อได้รับสนามไฟฟ้า วิธีที่สอง อิเลคตรอนบางตัวถูกดึงจากวาเลนซ์แบนด์ ทำให้เกิดมีช่องว่างที่เรียกว่า โฮล (Hole) โฮลในวาเลนซ์แบนด์ จะเคลื่อนที่ได้โดยอิสระโดยการกระทำของสนามไฟฟ้าเช่นเดียวกับอิเลคตรอนในคอนดักชั่นแบนด์ ในผลึกอิเลคตรอนและโฮลทำให้เกิดขึ้นได้โดยการเจือสารไม่บริสุทธิ์ลงไป การเติมสิ่งเจือปนลงในผลึกนี้เรียกว่า การโดพ (Doping) พวกธาตุที่มีวาเลนซี 5 เช่น ฟอสฟอรัส อาเซนิค และ แอนติโมนี เมื่อเติมเข้าไปแล้วจะแทนที่อะตอมของซิลิคอน หรือ เจอร์มาเนียม ทำให้มีอิเลคตรอนเกินพอที่จะจับกับอะตอมอื่น 1 ตัว ในโครงสร้างของผลึก พลังงานเพียงเล็กน้อยสามารถที่จะทำให้อะตอมของสิ่งที่เจือไปในผลึก ให้อิเลคตรอนจากวาเลนซ์อิเลคตรอนแก่คอนดักชั่นแบนด์ จึงเรียกพวกนี้ว่าเป็นพวกที่ให้อิเลคตรอน (donor impurity) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 3 - 1 (b) เป็นผลทำให้มีประจุบวกของกลุ่มอะตอมที่เจือเข้าไปอยู่ในระดับอันหนึ่งของพลังงาน , E_d ซึ่งอยู่ต่ำลงมาจาก E_c E_d จะมีค่าน้อยกว่า E_c ถ้าเป็นซิลิคอน มีค่าประมาณ 0.04 eV และสำหรับเจอร์มาเนียมมีค่าประมาณ 0.01 eV

สำหรับธาตุที่มีวาเลนซ์ 3 เช่นโบรอน และ แกลเลียม ถ้าโดพเข้าไปในผลึกจะทำให้เกิดอิเลคตรอนหายไป 1 ตัว พลังงานเพียงจำนวนเล็กน้อยสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเลคตรอนในวาเลนซ์แบนด์ ขึ้นไปอยู่ที่ระดับของพลังงานอีกขั้นหนึ่ง , E_a ซึ่งอยู่เหนือแถบวาเลนซ์แบนด์ ขึ้นมาเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 3 - 1 (c) พวกนี้เรียกว่า เป็นพวกรับอิเลคตรอน (acceptor impurity) เช่นเดียวกัน E_a มีค่าสูงกว่า E_v สำหรับพวกซิลิคอนมีค่า 0.055 eV และพวกเจอร์มาเนียม มีค่าเท่ากับ 0.01 eV

สารกึ่งตัวนำกลุ่มที่มีพวกให้อิเลคตรอนมากกว่าพวกรับอิเลคตรอน เรียกว่า เป็นชนิดเอน (n - type) ประจุที่เป็นตัวที่เคลื่อนที่ คือ อิเลคตรอน สารกึ่งตัวนำที่มีพวกรับอิเลคตรอนมากกว่าพวกให้อิเลคตรอนเรียกว่าเป็นชนิดพี (p - type) ประจุที่เคลื่อนที่คือ โฮล

ภายในผลึกอาจจะมีการเปลี่ยนจาก ชนิดพี ไปเป็นชนิดเอนได้ เรียกว่า พีเอนจังชั่น (p - n junction) ซึ่งก่อให้เกิดบริเวณที่เรียกว่า depletion region** อยู่ตรงกลางรอยต่อระหว่างชนิดพีกับชนิดเอน เมื่อมีการให้สนามไฟฟ้าชนิดตรงข้าม (reverse bias voltage) ก็จะทำให้พีเอนจังชั่น ทำหน้าที่เป็นหัววัดรังสีได้ เพราะเมื่อกัมมันตภาพรังสีเข้ามาสู่บริเวณ depletion region ซึ่งทำหน้าที่เป็นบริเวณไว (sensitive region) ของหัววัด จะทำให้เกิดอิเลคตรอนและโฮล ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ส่งสัญญาณออกมาภายนอกได้

3.2 หัววัดรังสี Ge(Li)

3.2.1 ลักษณะของหัววัด

การทำหัววัดประเภทสารกึ่งตัวนำแบบหัวต่อ (Semiconductor-junction) โดยอาศัยวิธีการดริฟท์อิออน ได้ทำขึ้นครั้งแรกโดย Pell และต่อมาได้มีการปรับปรุงทางด้านนี้ การเกิดหัววัดรังสีชนิด Ge(Li) มีหลักการดังนี้(4)

พิจารณาแท่งเจอร์มาเนียมชนิดที่มีพวกรับอิเลคตรอนกระจายอย่างสม่ำเสมอ เมื่อลิเธียมซึ่งทำหน้าที่เป็นพวกให้อิเลคตรอน ถูกทำให้กระจายเข้าไปทางด้านใดด้านหนึ่งของแท่งเจอมาเนียมนี้ ลักษณะโปรไฟล์ของพวกให้และพวกรับอิเลคตรอน (donor - acceptor profile) ดังแสดงตามภาพในรูปที่ 3 - 2 (a) เมื่อตรงรอยต่อ (junction) ถูกให้สนามไฟฟ้าและขณะเดียวกันก็เพิ่มอุณหภูมิในช่วงเวลาอันสั้น ซึ่งเรียกว่าการดริฟท์ (drifting) ผลของโปรไฟล์ของพวกให้และพวกรับอิเลคตรอนจะถูกเปลี่ยนเป็นรูปที่ 3 - 2 (b) ณ บริเวณรอยต่อที่จำนวนพวกให้อิเลคตรอนและพวกรับอิเลคตรอนมีจำนวน

** depletion region ; เป็นอาณาบริเวณตรงรอยต่อ (junction) ระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดเอนกับชนิดพี ภายในอาณาบริเวณนี้จะมีจำนวนอิเลคตรอนและจำนวนโฮลเท่ากัน ซึ่งสามารถทำหน้าที่เป็นสารไม่บริสุทธิ์คอยดัก (trap) อิเลคตรอน และโฮลที่เกิดจากพลังงานกัมมันตภาพรังสี

เท่ากันจะเกิดการชดเชย (Compensate) ซึ่งกันและกัน เป็นผลทำให้เกิด intrinsic region *** ก็คือบริเวณไวของหัววัดนั่นเอง และเมื่อนำหัววัดรังสี Ge(Li) ไปใช้ในการวัดกัมมันตภาพรังสีจำเป็นต้องให้สนามไฟฟ้าชนิดตรงข้าม ซึ่งผลที่ได้จะทำให้หัววัดมีลักษณะตามรูปที่ 3 - 2(c) ซึ่งจะเห็นได้ว่าสนามไฟฟ้าบริเวณ intrinsic regionมีค่าคงที่ เป็นผลทำให้ความเร็วของโฮล(hole mobility) , (ซ.ม/วินาที) (โวลต์/ซ.ม)$^{-1}$ ในบริเวณ intrinsic region มีค่าเท่ากัน จึงทำให้ค่า pulse rise time **** ของโฮลที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสีเข้ามาในหัววัดมีค่าใกล้เคียงกันมาก ผลก็คือ สะดวกต่อการเลือกค่า เวลาคงที่ (time constant) ซึ่งเป็นผลคูณของ RC ของพรี - แอมพลิไฟเออร์ (preamplifier) ที่เหมาะสม เพื่อให้หัววัดมีประสิทธิภาพสูงในการส่งสัญญาณออกมา

สำหรับหัววัดรังสี Ge(Li) ที่ใช้สำหรับงานวิจัยนี้สร้างโดยบริษัท Ortec เรียกว่า True Right Circular Cylinder (TRCC) Coaxial detector ทำจากชนิดพีของเจอร์มาเนียม ซึ่งมีคุณภาพสูงมาก และพวกให้อิเลคตรอนเป็นลิเธียม ซึมผ่านเข้าไปจากส่วนนอกของผลึกและเข้าไปหาแกนกลางของผลึกโดยการใช้สนามไฟฟ้าสูง ๆ และควบคุมด้วยความระมัดระวัง ซึ่งแสดงให้เห็นส่วนข้างใน ดังรูปที่ 3 - 3

จากรูปที่ 3 - 3 ; " A " แสดงถึงส่วนที่เรียกว่า intrinsic region

" B " แสดงถึงสารชนิดเจอร์มาเนียมที่มีพวกรับอิเลคตรอนกระจายอย่างสม่ำเสมอ

" C " เป็นส่วนผิวนอก คือสารพวกให้อิเลคตรอนซึ่งเป็นส่วนของลิเธียมจะซึมเข้าไป

*** intrinsic region ; มีลักษณะเช่นเดียวกับ depletion region แต่อิเลคตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นตรงรอยต่อ ไม่สามารถที่จะดักอิเลคตรอนและโฮลที่เกิดจากกัมมันตภาพรังสีได้ เปรียบเสมือนเป็นบริเวณที่มีสารไม่บริสุทธิ์อยู่ในเนื้อแท้ของผลึก

**** pulse rise time ; ช่วงเวลาที่จำนวนอิเลคตรอนและโฮลภายในหัววัดซึ่งเกิดจากหนึ่งอนุภาคของกัมมันตภาพรังสีส่งสัญญาณออกจากหัววัดได้หมด

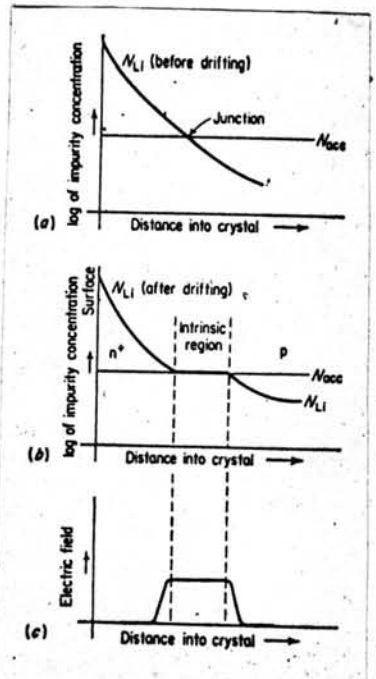
โครงสร้างอะตอมของ intrinsic เจอร์มาเนียม ต้องการอุณหภูมิต่ำ ๆ เพื่อที่จะรักษาให้อะตอมของลิเธียมอยู่ที่ และเพื่อลดสัญญาณรบกวนที่ออกจากหัววัดซึ่งเป็นผลต่อกำลังการแยกของหัววัด สภาวะเช่นนี้ต้องอยู่ที่อุณหภูมิของไนโตรเจนเหลว คือ - 196° C

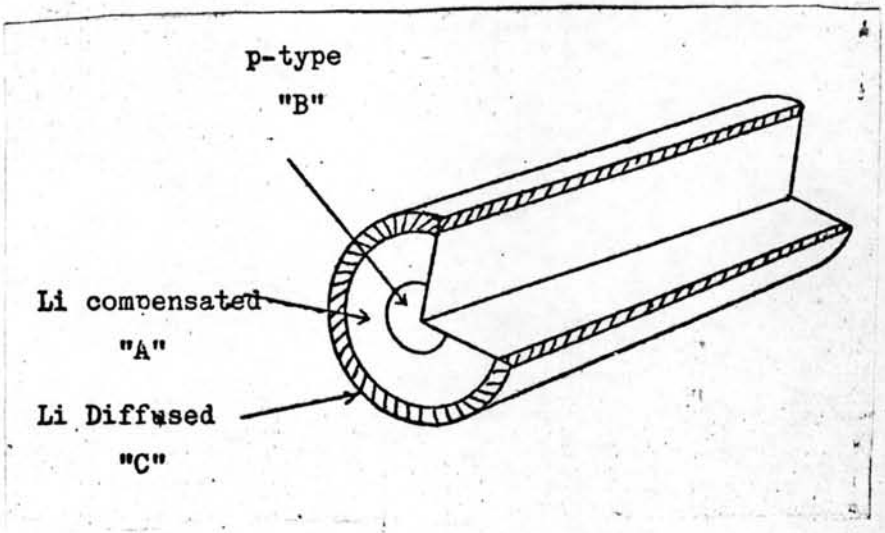
การต่อวงจรอิเลคโทรนิคเข้ากับหัววัดรังสี Ge(Li) แสดงในรูปที่ 3 - 4

รูปที่ 3-2[4] แสดงลักษณะการเปลี่ยนโปรไฟล์ของกลุ่มพวกให้อิเลคตรอนและกลุ่มพวกรับอิเลคตรอน

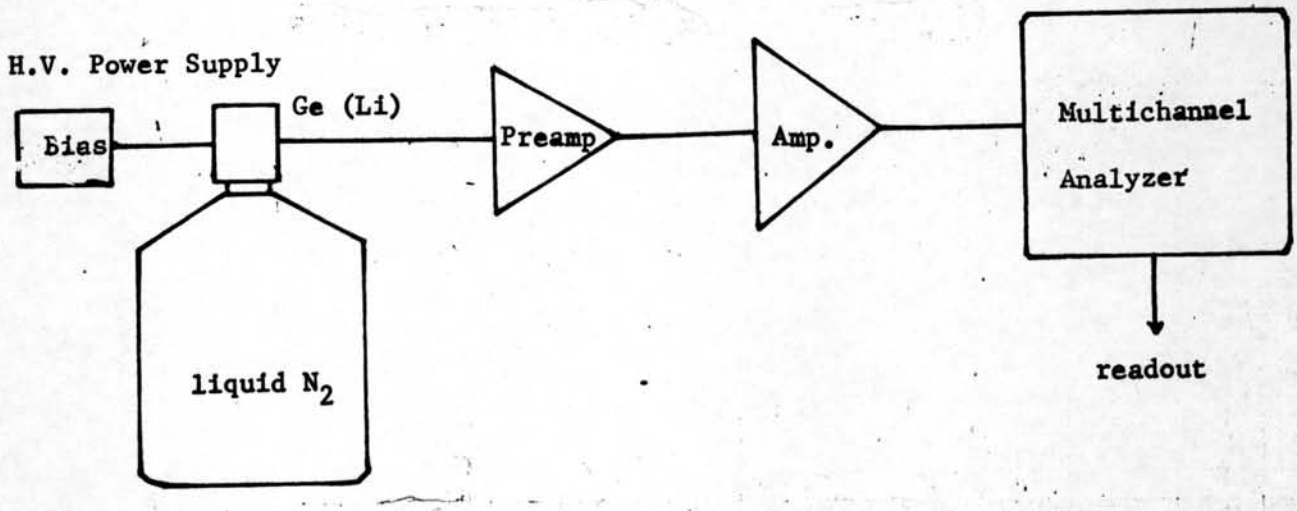
N_{acc} = ปริมาณความเข้มข้นของกลุ่มพวกรับอิเลคตรอน

N_{Li} = ปริมาณความเข้มข้นของกลุ่มพวกให้อิเลคตรอน (ลิเธียม)





รูปที่ 3-3 แสดงภาพผ่าซีกของหัววัดรังสี Ge(Li)



รูปที่ 3-4 แสดงผังวงจรของระบบหัววัดรังสี Ge(Li)

3.2.2 การเกิดอิเลคตรอนและโฮลในหัววัดโดยกัมมันตภาพรังสีแกมมา

เมื่อกัมมันตภาพรังสีแกมมาเข้ามาในหัววัดจะเกิดปฏิกิริยากับสารที่ใช้ทำหัววัดขึ้นเป็น 3 แบบ คือ

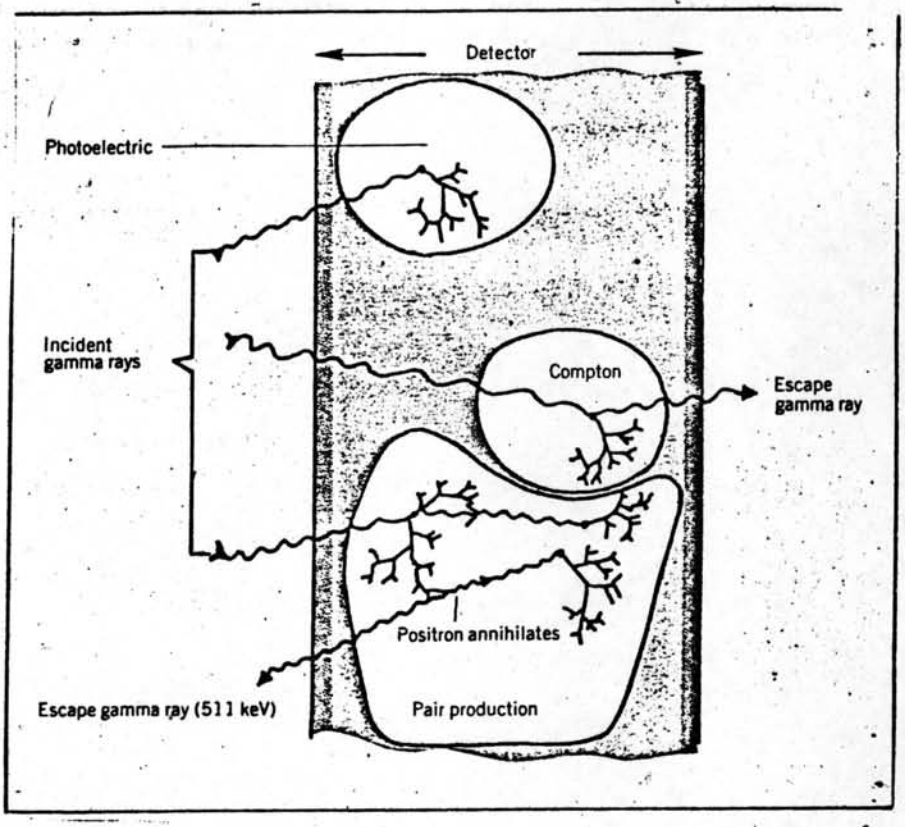
1. ปฏิกิริยาโฟโตอิเลคตริค (photoelectric effect)
2. ปฏิกิริยากระเจิง (Compton effect)
3. ปฏิกิริยาการเกิดอิเลคตรอนคู่ (pair production)

ผลของปฏิกริยาทั้ง 3 แบบ แสดงดังภาพในรูปที่ 3 - 5

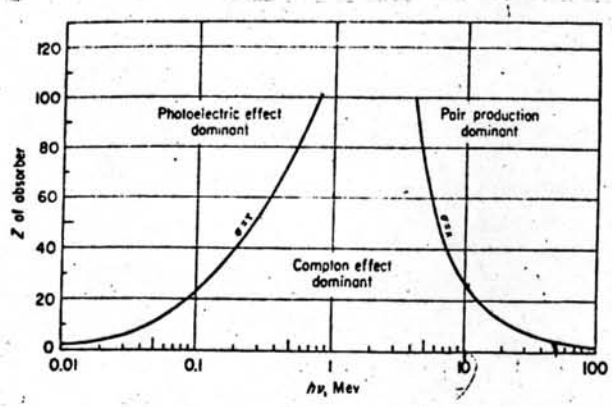
คุณสมบัติข้อหนึ่งของสารที่ใช้ทำหัววัดควรมีค่าเลขอะตอม ที่มีแนวโน้มซึ่งจะทำให้เกิดปฏิกิริยาโฟโตอิเลคตริคมากกว่าปฏิกิริยากระเจิงและปฏิกิริยาการเกิดอิเลคตรอนคู่ เพราะผลของปฏิกิริยาโฟโตอิเลคตริคจะทำให้เกิดจำนวนอิเลคตรอนและโฮลเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของกัมมันตภาพรังสีแกมมาที่เข้ามาซึ่งจะทำให้หัววัดมีกำลังการแยกสูงมากกว่าผลของปฏิกิริยาอย่างอื่น โดยทั่วไปจะเลือกเจอมาเนียมและซิลิคอน เนื่องจากค่าเลขอะตอมของซิลิคอนน้อยกว่าเจอมาเนียมและปฏิกิริยาโฟโตอิเลคตริคของกัมมันตภาพรังสีที่เข้ามาในหัววัดจะขึ้นอยู่กับค่าเลขอะตอม ยกกำลังห้า (z^5) จึงทำให้หัววัดรังสี Ge(Li) มีประสิทธิภาพสูงกว่าหัววัดที่ทำด้วยซิลิคอน นอกจากนี้พลังงานสูงสุดของกัมมันตภาพรังสีที่วัดได้โดยหัววัด Ge(Li) จะมีค่าเป็นสองเท่าของที่วัดได้โดยหัววัดที่ทำด้วยซิลิคอน ซึ่งพิจารณาได้จากภาพในรูปที่ 3 - 6

3.2.3 ความสามารถในการแยกสัญญาณของหัววัด

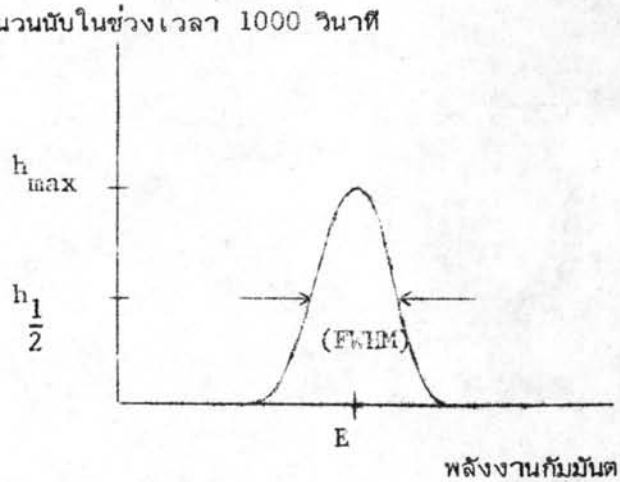
ความสามารถในการแยกสัญญาณที่ส่งออกมาจากหัววัด เนื่องจากการแยกของพลังงานรังสีแกมม่า (Energy Resolution) จะมีค่ามากหรือน้อยพิจารณาได้จากช่วงกว้างของสัญญาณซึ่งเกิดจากกัมมันตภาพรังสีที่มีพลังงานเดียวกัน มีรูปร่างตามรูปที่ 3 - 7



รูปที่ 3-5[5] แสดงปฏิกิริยาแบบต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในหัววัดรังสี เนื่องจากกัมมันตภาพรังสีแกมมาที่เข้ามา



รูปที่ 3-6[6] แสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานกัมมันตภาพรังสีแกมมากับค่าเลขอะตอมของสารที่ใช้ทำหัววัด



รูปที่ 3 - 7 แสดงภาพของสัญญาณที่ส่งออกมาจากหัววัดกัมมันตภาพรังสีซึ่งมีพลังงานเดียวกัน

Full Width Half Maximum (FWHM) คือ ขนาดช่วงกว้างของสัญญาณ ณ ความสูง $h_{\frac{1}{2}}$ สำหรับกัมมันตภาพรังสีแกมมาพลังงาน E keV สามารถหาได้จาก

$$FWHM = 2.36(E\varepsilon)^{\frac{1}{2}} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (3.1)$$

E = พลังงานของกัมมันตภาพรังสีแกมมาที่เข้ามาในหัววัด

ε = พลังงานเฉลี่ยสำหรับการเกิดอิเลคตรอนและโฮล 1 คู่ ของสารที่ใช้ทำหัววัด

ในกรณีของหัววัดชนิด Ge(Li) ค่า ε = 2.84 eV แต่หัววัดประเภทอาศัยการแตกตัวของก๊าซ (Gas Ionization Chamber) ค่า ε = 30 eV และหัววัดประเภทระบบเรืองแสง (Scintillation system) ค่า ε = 500 eV เพราะฉะนั้นจากสมการที่ (3.1) จะเห็นได้ว่า FWHM ของหัววัดชนิด Ge(Li) มีค่าน้อยที่สุดนั่นก็แสดงว่า ความสามารถในการแยกสัญญาณของหัววัดชนิด Ge(Li) มีค่าสูงสุด และสำหรับที่พลังงานต่ำ ๆ ของกัมมันตภาพรังสีแกมมา ความสามารถในการแยกสัญญาณจะมีค่าสูงกว่าที่พลังงานสูง ๆ

ด้วยเหตุนี้จึงสรุปได้ว่าหัววัดรังสีชนิด Ge(Li) เป็นหัววัดที่มีกำลังการแยก, ประสิทธิภาพและช่วงกว้างของพลังงานกัมมันตภาพรังสีแกมมาที่วัดได้สูงพอที่จะนำมาใช้ในงานวิจัยเกี่ยวกับการหาปริมาณตะกั่ว - 214 และบิสมัท - 214 ในบรรยากาศกรุงเทพฯ