

## บทที่ 2

### กลไกของหัววัดกัมมันตรังสี

#### 2.1 บทนำ

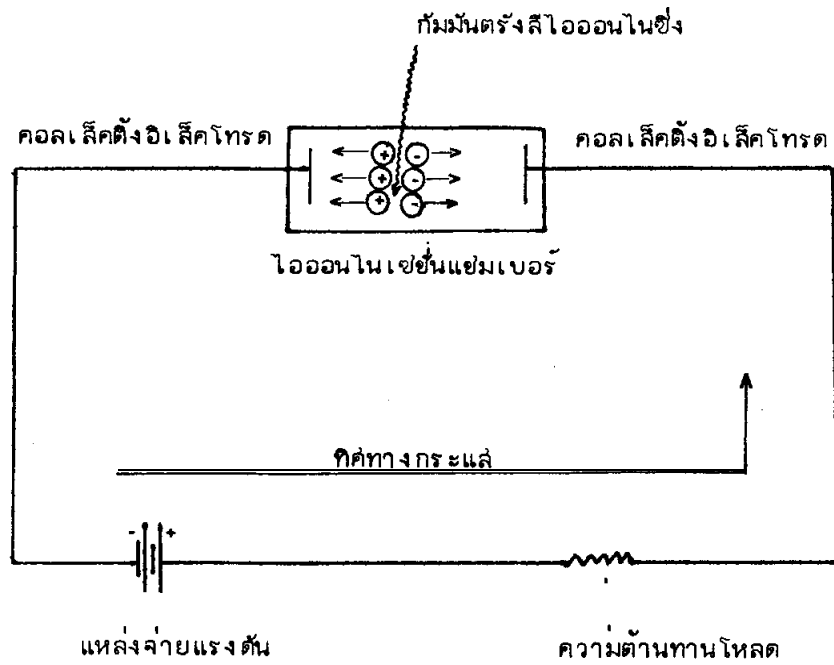
หัววัดกัมมันตรังสีเป็นส่วนสำคัญของระบบนับวัดกัมมันตรังสี (ทั้ง *in vivo* และ *in vitro*) การศึกษาเพื่อทำความเข้าใจกับกลไกของหัววัดกัมมันตรังสีนับเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง ในหัวข้อต่อไปนี้จะได้กล่าวถึงรายละเอียดของกลไกของหัววัดกัมมันตรังสีชนิดต่างๆ ซึ่งแยกเป็นหัววัดที่เติมด้วยแก๊ส (*Gas-filled detector*) หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ และหัววัดแบบซินทิลเลชัน (*scintillation detector*) โดยที่หัววัดแบบเติมด้วยแก๊สยังได้แยกออกเป็นหัววัดไอออนไนเซชันแอมเบอร์ (*ionization chamber*) หัววัดแบบพรอพอร์ชันนัล (*proportional counter*) และหัววัดแบบไกเกอร์-มูลเลอร์ (*Geiger-Muller counter*) ซึ่งเป็นพื้นฐานในการศึกษาบทที่ 3 ต่อไป

#### 2.2 หัววัดที่บรรจุด้วยแก๊ส (*Gas-filled detectors*)

##### 2.2.1 ไอออนไนเซชันแอมเบอร์ (*ionization chamber*)

อุปกรณ์ใดๆที่ใช้วัดปริมาณกัมมันตรังสี มักจะวัดสัญญาณไฟฟ้าที่เกิดจากลำรังสีที่ทำปฏิกิริยากับสารที่บรรจุอยู่ในหัววัดสัญญาณ เครื่องมือที่ใช้หลักการดังกล่าวง่ายที่สุดคือไอออนไนเซชันแอมเบอร์ซึ่งวัดปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลในวงจรภายนอกเมื่อเกิดการแตกตัวออกเป็นไอออนหรือเรียกว่าเกิดอิเล็กตรอนอิสระขึ้นในแก๊สที่ใช้บรรจุอยู่ในปริมาตรนั้น (ดูรูปที่ 2.1) ทั้งนี้ต้องอาศัยการป้อนด้วยแรงดันไฟฟ้าขนาดสูง (*high voltage*) ที่พอเหมาะ กล่าวคืออิเล็กตรอนอิสระที่

เกิดขึ้นจะถูกจับเก็บไว้โดยไม่มีการสูญเสียเนื่องจากการกลับคืนไปรวมตัวใหม่ (*recombination*) เพื่อจะให้เกิดอะตอมที่มีสภาวะปกติ และในทางตรงข้ามคือไม่มีการเพิ่มจำนวนอนุภาคของอิเล็กตรอนอันเกิดจากการแตกตัวทุติยภูมิซึ่งเป็นผลมาจากขบวนการจับเก็บอิเล็กตรอน จึงกล่าวได้ว่ากระแสที่ไหลในแชนเนลและค่าแรงดันที่ป้อนเข้าไปเป็นดัชนีของฟลักซ์รังสีที่เคลื่อนผ่านแชนเนล



รูป 2.1 แผนผังอย่างง่ายของไอออนไนเซชันแชนเนล กัมมันตรังสีผ่านเข้าในหัววัดจะทำให้อะตอมหรือโมเลกุลของแก๊สแตกตัวภายในหัววัด อิเล็กตรอนอิสระถูกจับเก็บโดยอิเล็กโทรดบวก จึงเกิดกระแสในวงจร สัญญาณออกคือแรงดันตกคร่อมความต้านทานโหลด เมื่อมีกระแสไหลในวงจร

แต่การวัดฟลักซ์รังสีด้วยไอออนไนเซชันแชนเนลก็มีข้อจำกัดเนื่องจากต้องอาศัยต้นกำเนิดรังสีที่มีความเข้มข้นรังสีพอเหมาะ เพื่อจะทำให้เกิดกระแสออกที่สามารถบันทึกค่าได้เอง -

จากกระแสดังกล่าวมีค่าน้อยมาก ซึ่งดูเหมือนว่าหัววัดรังสีแบบนี้ไม่มีความไวในการวัดปริมาณรังสี นอกเสียจากว่าต้นกำเนิดรังสีจะมีความเข้มข้นรังสีมาก

### 2.2.2 หัววัดพรอพพอร์ชันนัล (*proportional counter*)

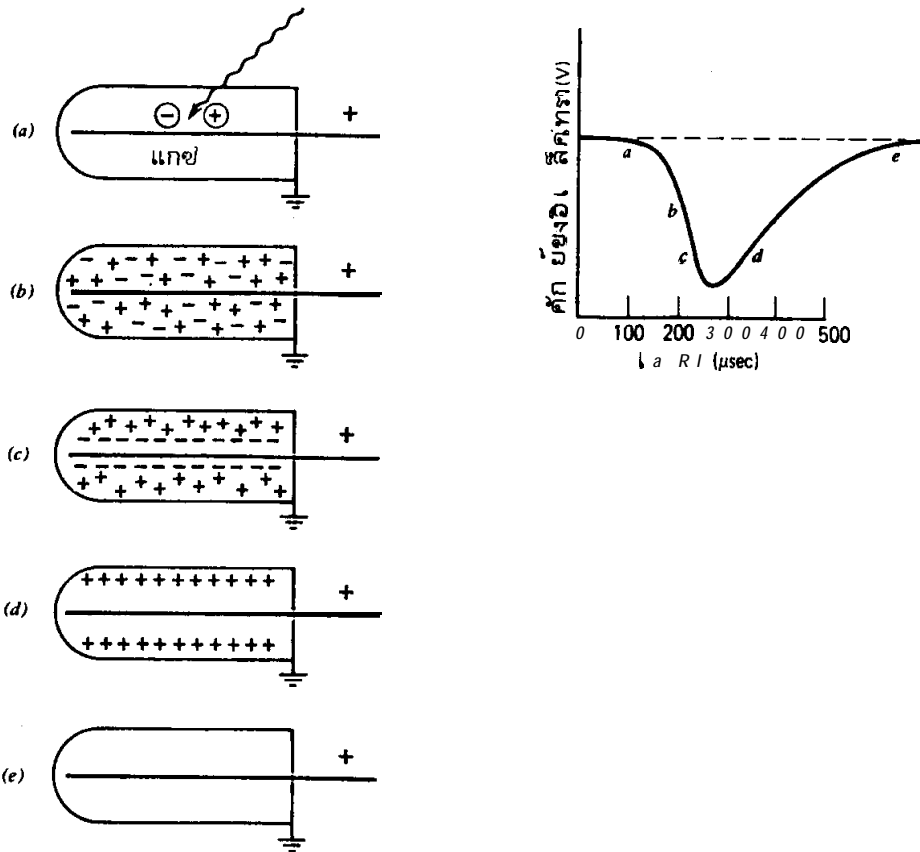
หัววัดพรอพพอร์ชันนัลก็จัดอยู่ในประเภทหัววัดที่บรรจุด้วยแก๊สแต่ต่างจากไอออนไนเซชันแอมป์เบอร์ตรงที่สามารถทำงานได้ในภาวะที่มีสนามไฟฟ้าระหว่างขั้วไฟฟ้าสูงกว่ามาก (ประมาณ 300-750 โวลต์) ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากในขบวนการจับเก็บนั้นอิเล็กตรอนถูกเร่งจนทำให้เกิดพลังงานมากพอจะทำให้อะตอมอื่นที่มันวิ่งไปชนเกิดการแตกตัว การแตกตัวทุติยภูมิทำให้เกิดอิเล็กตรอนที่จะเป็นตัวทำให้เกิดการแตกตัวต่อไปเป็นลูกโซ่ ดังนั้น กระแสที่ได้จากการแตกตัวจึงมีค่าเพิ่มสูงไปจากเดิมมาก ทำให้ง่ายต่อการบันทึกวัดปริมาณรังสี นอกจากนี้ ความสูงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้ายังเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแตกตัวเริ่มแรกซึ่งเกิดขึ้นในแอมป์เบอร์ ซึ่งกล่าวได้ว่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่สูญเสียไปโดยการแผ่รังสีนั่นเอง นี่คือที่มาของการเรียกหัววัดรังสีแบบนี้ว่า "พรอพพอร์ชันนัล เคาน์เตอร์" นั่นเอง

เครื่องมือชนิดนี้เหมาะในการวัดรังสีเอ็กซ์และรังสีแกมมาที่มีพลังงานต่ำ (5 - 100 keV) ปัจจุบันไม่นิยมใช้ในเวชศาสตร์นิวเคลียร์

### 2.2.3 หัววัดไกเกอร์มูลเลอร์ (*Geiger-Muller counter*)

โดยทั่วไปมักเรียก "จี-เอ็ม เคาน์เตอร์" (*G-M Counter*) ทำงานได้ในภาวะที่สนามไฟฟ้ามีขนาดสูง โดยใช้แรงดันไฟฟ้าที่เป็นตัวเร่งมีค่าสูง (ประมาณ 800 - 1500 โวลต์) และใช้เส้นลวดขนาดเล็กลงเป็นขั้วไฟฟ้า กระแสที่มีได้เกิดจากการแตกตัวในหัววัดจะมีค่าต่ำมาก เนื่องจากมีความดันอากาศต่ำมาก (ประมาณ 1/75 บรรยากาศ)

เมื่อมีอนุภาคหรือโฟตอนวิ่งเข้าไปในหัววัด จะทำให้เกิดการแตกตัวโดยมีขั้นตอนของขบวนการเช่นเดียวกับ "พรอพพอร์ชันนัล เคาน์เตอร์" แต่การทวีคูณของอิเล็กตรอนมีค่ามาก

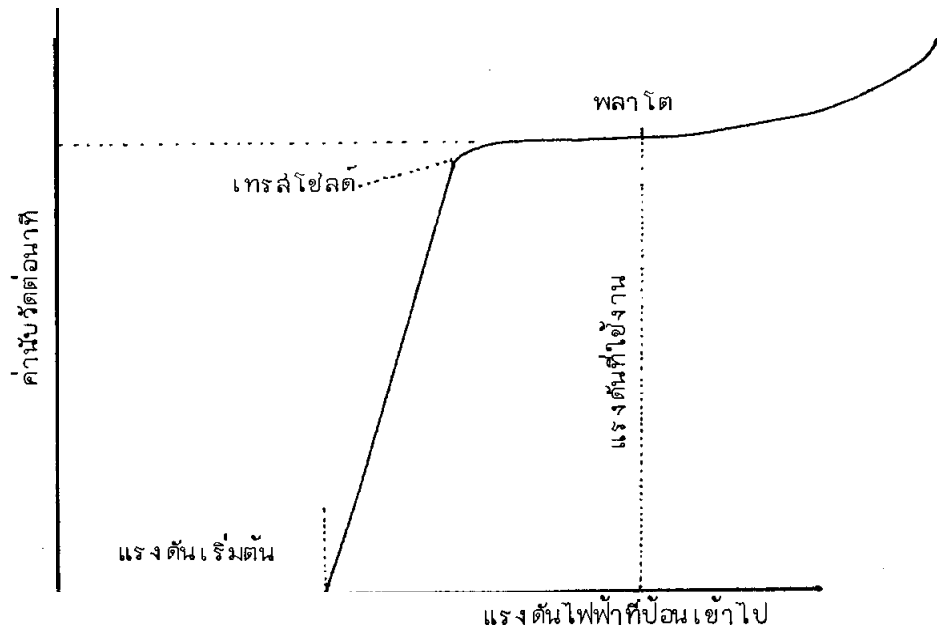


รูป 2.2 (a) หัววัด GM ประกอบด้วยแก๊สซึ่งถูกทำให้แตกตัวโดยรังสีแกมมา  
 (b) อิเล็กตรอนศูนย์กลางซึ่งมีคักย์บวกสูง (เช่น 1000 v) ถูกชนโดยอิเล็กตรอนซึ่งจะได้รับพลังงานเพิ่มในการทำให้แก๊สแตกตัวจนกระทั่งทั้งปริมาณประกอบไปด้วยคู่ไอออน  
 (c) เป็นช่วงอิเล็กตรอนถูกจับโดยเร็ว แรงดันของอิเล็กตรอนศูนย์กลางลดลงดังแสดงในกราฟ  
 (d) ไอออนบวกซึ่งหนักและเคลื่อนที่ช้าๆไปยังผนังด้านนอก  
 (e) หลังจากขบวนการในรูป(d)ผ่านไปประมาณ 400  $\mu sec$  หัววัดพร้อมที่จะเริ่มต้นขบวนการใหม่คือจาก (a) - (e) นั้นเอง

กว่าจนทำให้เกิดการแตกตัวของ แก๊สทั้งหมดในแอมเบอรั ดังนั้น สัญญาณแรงดันไฟฟ้าขาออกจะมีค่ามากและมักจะมีค่าสูง เท่ากับการเกิดการแตกตัว (ณ ค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนให้ค่าหนึ่งตามที่กำหนดไว้) สัญญาณดังกล่าวจะมีค่าคงที่และเป็นอิสระต่อพลังงานของอนุภาคหรือโฟตอนที่วิ่งไปชนทำให้เกิดการวิเคราะห์และบันทึกค่าทางอิเล็กทรอนิกส์เป็นไปโดยไม่มียุ่งยาก ซึ่งแสดงแผนภาพ ในรูปที่ 2.2

ความสูงของสัญญาณแรงดันไฟฟ้าจากหัววัด *G-M* คือฟังก์ชันของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไปนั่นเอง แม้ว่าสัญญาณมีขนาดเดียวกันหมด แต่ถ้าป้อนแรงดันไฟฟ้าที่มีค่ามากกว่าค่าแรงดันที่ทำให้เกิดสัญญาณออกที่มีขนาดเกินกว่าค่าเทรลชโฮลด์ของสัญญาณเข้า (*input threshold*) ของเครื่องนับวัด (คือสเกลเลอร์ (*scaler*)) ก็จะทำให้เกิดบริเวณราบหรือที่เรียกว่า "พลาโต" (*plateau*) บนเส้นกราฟระหว่างค่าความสูงของสัญญาณแรงดันหรืออัตรานับวัด (แกน *y*) และแรงดันไฟฟ้า (แกน *x*) ซึ่งแสดงในรูปที่ 2.3 เห็นได้ว่าบริเวณ "พลาโต" นั้นค่าอัตรานับวัด (คือค่านับวัดรังสีต่อหน่วยเวลา) ไม่ขึ้นกับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป ซึ่งจะเป็นการลดปริมาณความต้องการของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้าไป และลดความยุ่งยากในการปรับค่าแรงดันไฟฟ้า โดยทั่วไปแล้วบริเวณ "พลาโต" ที่ได้จากกราฟจะไม่เป็นลักษณะราบเรียบดังแสดงในรูปที่ 2.3 เนื่องจากสัญญาณเอาท์พุทมิได้มีค่าเท่ากันหมดอย่างแท้จริง

หัววัด *G-M* ขนาดเล็กมักใช้ในการนับวัดรังสีเบต้า เช่น การนับวัดปริมาณรังสีเบต้าจากฟอสฟอรัส -32 ในการวินิจฉัยเมลาโนมาในลูกตา (*intraocular melanomas*)



รูป 2.3 กราฟแสดงลักษณะสมบัติของหัววัดไกเกอร์มูลเลอร์ บริเวณ "พลาโต" (plateau) เป็นบริเวณซึ่งค่านับวัดจะเกือบคงที่ กล่าวคือค่าอัตราการนับวัดไม่ขึ้นกับแรงดันไฟฟ้าที่ป้อนเข้า โดยทั่วไปจะเลือกค่าแรงดันไฟฟ้าตรงบริเวณกึ่งกลางพลาโตเป็นค่าที่ใช้ในการทำงานของหัววัด GM

### 2.3 หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor detectors)

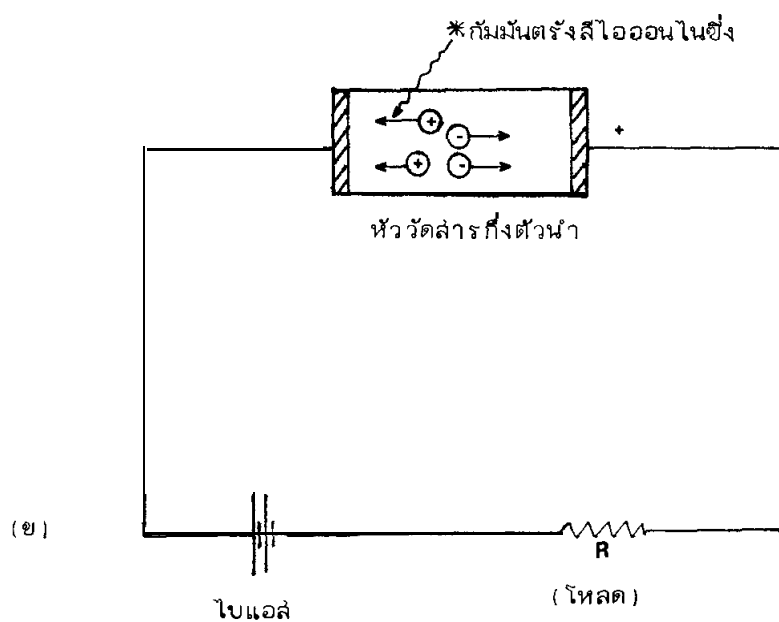
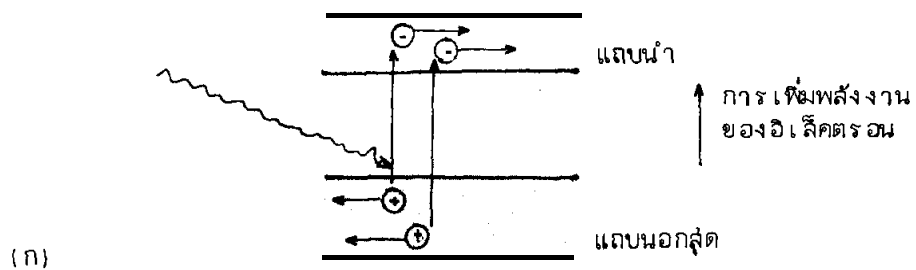
สาเหตุที่มีการใช้หัววัดกัมมันตรังสีแบบของแข็งแทนแก๊ส (เช่น ไอออนไนเซชันแชมเบอร์ ดังอธิบายแล้วข้างต้น) น่าจะเป็นไปได้เนื่องจากเหตุผลสองประการดังนี้คือ

- 1. ของแข็งมีคุณสมบัติในการสกัดกั้นและสามารถดูดเก็บพลังงานของอนุภาครังสีหรือโฟตอนได้ดี

2. พลังงานเฉลี่ยที่ใช้ในการทำให้เกิดการแตกตัว (เป็นไอออนบวกและลบ) หนึ่งหน่วยในแก๊สมีค่าประมาณ 30 อิเล็กตรอนโวลต์ แต่ในของแข็งต้องการพลังงานเพื่อให้เกิด - อิเล็กตรอน-โฮลหนึ่งคู่ (กล่าวคือ เกิดอิเล็กตรอนอิสระซึ่งเป็นผลให้เกิดช่องว่าง เรียกว่า "โฮล") ประมาณ 3 อิเล็กตรอนโวลต์ จึงเห็นได้ว่า ถ้าให้พลังงานจำนวนเท่ากัน ปริมาณแก๊สที่แตกตัวที่เกิดจากการแตกตัวในของแข็งจะมีมากกว่าในแก๊สถึง 10 เท่า ซึ่งทำให้ง่ายต่อการบันทึกค่า ทั้งยังทำให้ค่าทางสถิติถูกต้องขึ้นอีกด้วย

หัววัดที่ใช้สารกึ่งตัวนำมีหลักการเช่นเดียวกับไอออนไนเซชันแอมเบอร์ในรูปแบบที่ 2.1 กล่าวคือสร้างด้วยสารกึ่งตัวนำเป็นรูปสี่เหลี่ยมต่อกับตัวต้านทาน ซึ่งทำหน้าที่คล้ายคอลเล็กติ่งอิเล็กโทรด (*collecting electrode*) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 รั้งที่ตกกระทบจะทำให้เกิดคู่ อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น อิเล็กตรอนซึ่งมีพลังงานอยู่ในแถบการนำ (*conducting band*) จะเดินทางไปยังคอลเล็กติ่งอิเล็กโทรด ช่องว่างในแถบนอกสุดที่เกิดขึ้น (คือ "โฮล" นั้นเอง) จะเดินทางไปยังขั้วลบของอิเล็กโทรด เครื่องมือชนิดนี้จึงมักเรียกเป็นหัววัดแบบ "*conductivity*" มากกว่าจะเรียกเป็น "*Solid ionization chamber*"

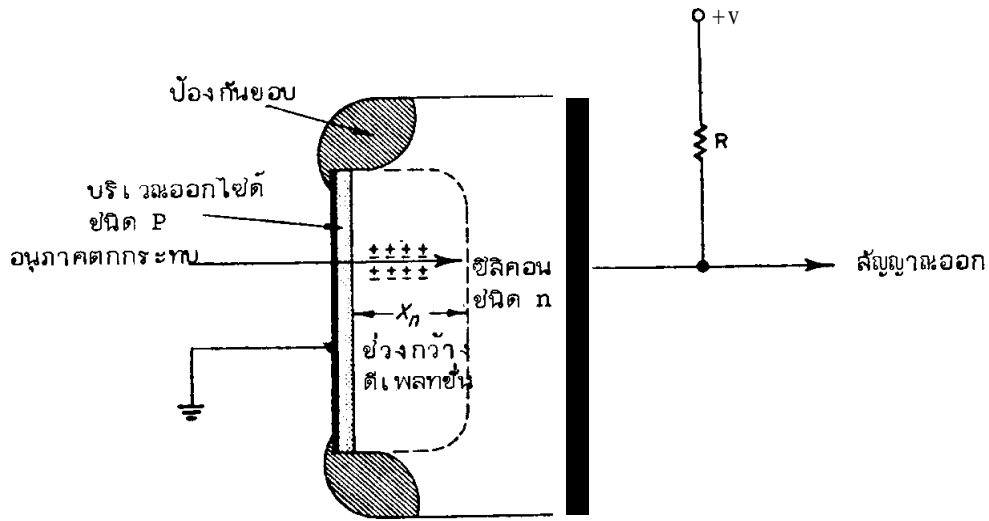
ถ้าเกิดความร้อนจากคู่อิเล็กตรอน-โฮลมาก (โดยทั่วไปมักเนื่องมาจากลำแสงเจือ) จะเป็นผลให้เกิดกระแสแบริกราวนด์ซึ่งอาจมีค่ามากกว่าสัญญาณแท้จริงที่เกิดจากลำแก๊สที่แตกตัว นอกจากนี้ กระแสดังกล่าวยังเป็นตัวทำลายประสิทธิภาพของหัววัดอีกด้วย ในทางปฏิบัติจึงต้องพยายามเลือกใช้สารกึ่งตัวนำที่บริสุทธิ์มากที่สุดเท่าที่จะเป็นได้ ซึ่งเป็นการยากมาก ต่อมาได้มีการใช้สารกึ่งตัวนำสองชนิดอยู่ด้วยกัน คือสารกึ่งตัวนำชนิด  $p$  (เป็นตัวนำของโฮล) และชนิด  $n$  (เป็นตัวนำของอิเล็กตรอน) ซึ่งขบวนการสร้างรอยต่อ  $p-n$  เป็นไปได้หลายแบบ ในรูปที่ 2.5 ใช้สารกึ่งตัวนำชนิด  $p$  ราบบนสารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  ซิลิคอน เมื่อป้อนแรงดันไฟฟ้าเข้าในวงจร อิเล็กตรอนจะถูกดึงให้หลุดพ้นออกจากบริเวณสารชนิด  $n$  ซึ่งอยู่ชิดที่สุดกับบริเวณสารชนิด  $p$  โดยปราศจากอิเล็กตรอนที่วิ่งไปจากสารชนิด  $p$  ดังนั้น จึงต้องจัดให้มีบริเวณ *depletion* กระแสแบริกราวนด์ที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยมาก



รูป 2.4 (ก) โมเดลอย่างง่ายของแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำ

(ข) หัววัดสารกึ่งตัวนำ ลักษณะคล้ายกับรูป 2.1 แต่มีสารกึ่งตัวนำบรรจุอยู่แทนแก๊ซ กัมมันตรังสีที่ตกกระทบทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งอิเล็กตรอนจะถูกทำให้ อยู่ในช่องของแถบนำ ส่วนโฮล (+) ยังคงอยู่ในแถบนอกสุด





รูป 2.5 แสดงหัววัดแบบ *surface barrier* โดยใช้รอยต่อ *p-n* เมื่อหัววัดได้รับการไบแอส อิเล็กตรอน (พาหะส่วนใหญ่ในซิลิคอนชนิด *n*) จะเคลื่อนออกทันทีทันใดจากบริเวณที่อยู่ติดกับสารชนิด *p*

เมื่อแก๊สมันตรังสีเข้าไปยังหัววัด ผ่าน "barrier" ของสารชนิด *p* จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในบริเวณ "ดีเฟกต์" หลังจากขบวนการจับเก็บประจุที่เกิดขึ้นดังกล่าวได้ จะทำให้เกิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าซึ่งอาจต้องถูกขยายเพื่อสะดวกในการบันทึกค่าสำหรับวิเคราะห์ต่อไป ซึ่งจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ดูดเก็บไว้ในบริเวณ "ดีเฟกต์"

หัววัดชนิดนี้ ถ้าใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถทำงานได้ ณ อุณหภูมิห้อง แต่สารกึ่งตัวนำเจอร์มาเนียม (*Germanium*) จะทำงานได้ ณ อุณหภูมิต่ำกว่ามาก โดยทั่วไปประมาณ  $77^{\circ} K$  (ไนโตรเจนเหลว) แต่เนื่องจากซิลิคอนมีอะตอมมีคัมเบอร์ต่ำและความหนาแน่นปานกลางจึงทำการดูดเก็บโฟตอนจากรังสีแกมมาหรือรังสีเอ็กซ์ได้ไม่ดี ส่วนใหญ่มักใช้ในการนับวัดค่า

จากอนุภาครังสีที่มีประจุ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอนุภาคเบต้า

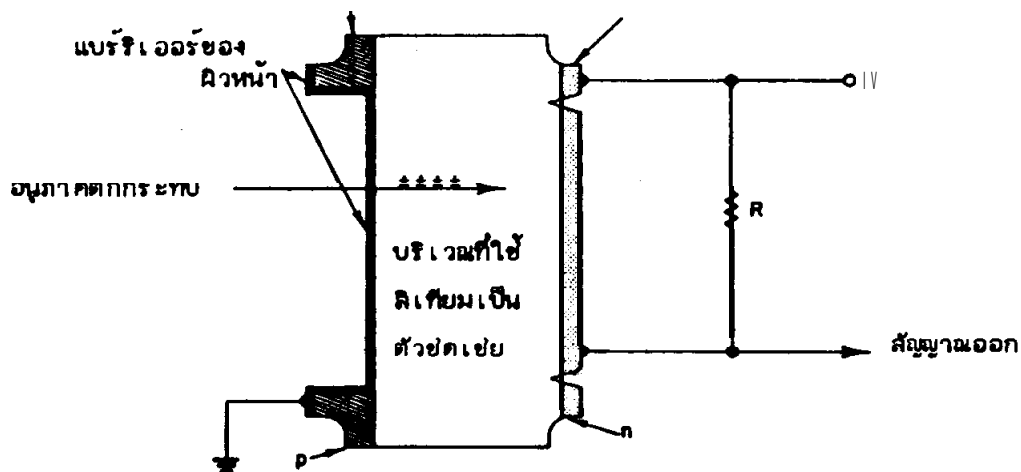
ถ้าเพิ่มแถบดีเพลทชันให้กว้างขึ้น ผลลัพธ์คือจะตรวจจับรังสีที่เกิดจากการแตกตัวมากขึ้น รูปที่ 2.6 แสดงหัววัดซึ่งทำโดยปนลิเทียม (*Lithium*) เข้าในสารกึ่งตัวนำชนิด *p* โดยจัดบริเวณที่มีพาหะ (ในกรณีนี้คือ "โฮล" (*holes*)) มากเกินความต้องการ ซึ่งก็จะทดแทนได้โดยอิเล็กตรอนซึ่งได้จากอะตอมของลิเทียม เทคนิคดังกล่าวเรียกว่า "*Lithium compensation*" หัววัดแบบสารกึ่งตัวนำที่ได้นั้นจะปฏิบัติตัวเหมือนสารบริสุทธิ์ (ไม่มีสารเจือ) และพาหะของอิเล็กตรอนจะมีปริมาณลดลงกว่าแบบแรกที่ได้อธิบายแล้วข้างต้นมากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น

จากเหตุผลที่หัววัดแบบ "*Lithium-drifted*" มีบริเวณดีเพลทชันกว้างกว่าหัววัดแบบเชื่อมต่อ *p-n* จึงเป็นที่นิยมใช้กว่าแม้ว่าจะมีขนาดใหญ่ก็ตาม หัววัด "*Lithium-drifted silicon*" เขียนย่อเป็น *SiLi* ซึ่งอ่านออกเสียงเป็น "ซิลลี่" (*silly*) สำหรับหัววัด "*Lithium compensated germanium*" เขียนย่อเป็น *GeLi* อ่านออกเสียงเป็น "เจลลี่" (*jelly*)

หัววัด *SiLi* มีประสิทธิภาพในการวัดโฟตอนจากรังสีแกมมาและรังสีเอ็กซ์ได้ดี และมีความล่าช้าในการแยกพลังงาน (*energy resolution*) ต่ำมาก แต่ต้องทำงาน ณ อุณหภูมิต่ำมาก (ไนโตรเจนเหลว) ดังนั้น หัววัดชนิดนี้จึงมีราคาแพง เป็นเหตุผลหนึ่งที่ยังไม่เป็นที่แพร่หลายในวงงานเวชศาสตร์นิวเคลียร์

## 2.4 หัววัดซินทิลเลชัน (Scintillation detectors)

สำหรับงานที่ใช้ลำรังสีในการวินิจฉัยโรค จำต้องอาศัยหัววัดที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อจะวัดปริมาณรังสีแกมมาแบบ *in vivo* ข้อจำกัดของหัววัดแบบสารกึ่งตัวนำคือขนาดและราคา ดังนั้น จึงมีการนิยมใช้หัววัดที่เป็นของแข็งซึ่งสามารถเรืองแสงเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานที่ได้



รูป 2.6 แสดงหัววัดแบบ "ลิเทียม-คริสตัล" ในบริเวณที่มีลิเทียมจะมีพาหะมากเกินพอซึ่งมีสภาพเป็นกลาง ดังนั้นจึงจัดเป็นบริเวณ "ดีเพลทชัน" สำหรับหัววัด

ดูเก็บไว้จากรังสีแกมมาหรือรังสีเอ็กซ์ เรียกหัววัดชนิดดังกล่าวว่า "หัววัดซินทิลเลชัน" ประกอบขึ้นจากโซเดียมไอโอไดด์ (*Sodium iodide*) ซึ่งถูกแอ็คติเวต (*activated*) ด้วยทลเลียม (*Thallium*) เขียนสัญลักษณ์เป็น  $NaI(Tl)$  มีประสิทธิภาพสูงในการนับวัดปริมาณกัมมันตรังสีแต่ความสามารถในการแยกพลังงานกัมมันตรังสีไม่ดีเท่าหัววัดแบบ  $GeLi$  ดังจะเห็นได้จากพีค (*peak*) ที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์ของทลเลียม - 201 ( $^{201}Tl$ ) ในรูป 2.7 อย่างไรก็ตาม งานด้านเวชศาสตร์นิวเคลียร์ยังคงนิยมใช้หัววัดโซเดียมไอโอไดด์ในการวัดปริมาณรังสีแบบ *in vivo* ทั้งนี้ควรเนื่องมาจากราคาของวัสดุอุปกรณ์ และในการวัดปริมาณรังสีเพื่อประโยชน์ด้านวินิจฉัยโรคจะพยายามเลือกใช้รังสีแกมมาที่มีพลังงานเดียว เพื่อป้องกันการเกิด













