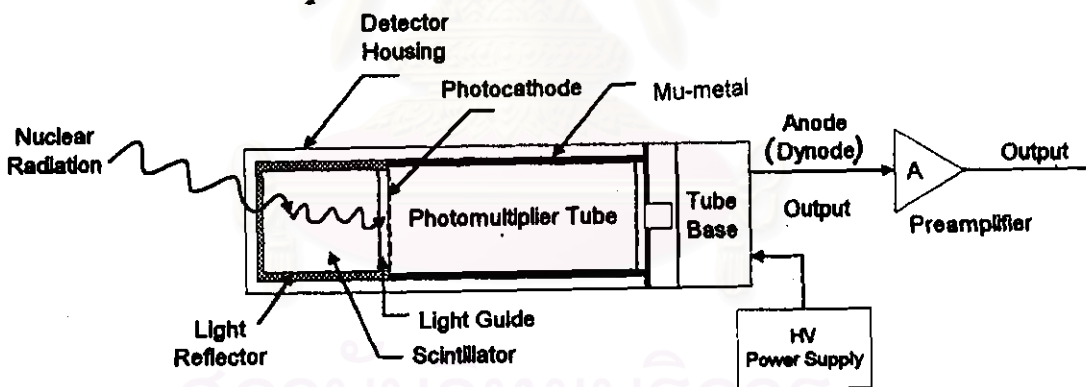


## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน

หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน เป็นหัววัดรังสีที่มีกระบวนการวัดรังสีทางอ้อม มีโครงสร้างที่ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 2 ส่วน คือ ส่วนที่รับอันตรกิริยาและเกิดประกายแสง (scintillator) ต่อเชื่อมกับส่วนที่ทำหน้าที่เปลี่ยนประกายแสงเป็นสัญญาณอิเล็กทรอนิกส์ และทวีคูณอิเล็กตรอน (photomultiplier tube, PMT) ซึ่งห่อหุ้มไว้ด้วยภาชนะปิดป้องกันแสงสว่างจากภายนอกและบริเวณหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (PMT) จะห่อหุ้มด้วยแผ่นกั้นสนามแม่เหล็ก (mu-metal) เพื่อป้องกันการรบกวนสนามแม่เหล็กซึ่งจะทำให้กลุ่มอิเล็กตรอนเบี่ยงเบนจากบริเวณไดโนด (dynode) ดังแสดงโครงสร้างในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน

ขั้นตอนการทำงานของหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน

1. เมื่ออนุภาคนิวเคลียร์ตกกระทบซินทิลเลเตอร์ จะเกิดประกายแสงขึ้น ณ บริเวณที่มีการถ่ายโอนพลังงาน
2. แสงที่เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะสะท้อนกลับ โดยตัวสะท้อน (reflector) ซึ่งทำด้วย  $Al_2O_3$  และส่วนหนึ่งจะส่งตรงไปยังตัวนำแสง (light guide) ผ่านไปยังโฟโตแคโทด (photocathode) ภายในหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

3. โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectrons) จะถูกปลดปล่อยจากโฟโตแคโทด ตรงไปยัง ไดโนดและถูกทวีคูณด้วยส่วนทวีคูณอิเล็กตรอน (electron multiplier)

4. ปริมาณอิเล็กตรอนที่ถูกรวบรวมบนแอโนด จะสร้างพัลส์ของกระแสขึ้นที่อินพุตของ ภาคขยายสัญญาณส่วนหน้า (preamplifier)

ปริมาณประจุ (Q) ที่ปรากฏบนแอโนด หรือ ไดโนด ตัวสุดท้ายของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน จะเป็นสัดส่วนกับพลังงานของอนุภาคนิวเคลียร์ เนื่องจากความเข้มของประกายแสงแต่ละครั้ง ขึ้นอยู่กับพลังงานที่ถ่ายโอนให้ซินทิลเลเตอร์ ดังนั้น ถ้าให้  $n_e$  เป็นจำนวนโฟโตอิเล็กตรอนที่ปล่อย จากแคโทด แต่ละตัวมีประจุเท่ากับ  $q_e(1.602 \times 10^{-19}c)$  และ M เป็นค่าทวีคูณอิเล็กตรอนของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ในการวัดรังสีแต่ละครั้งปริมาณประจุ Q จะมีค่าเท่ากับ [2]

$$Q = Mq_e n_e \dots\dots\dots 2.1$$

**2.1.1. กระบวนการเกิดสัญญาณพัลส์จากประกายแสง**

การดูดกลืนพลังงาน โดยสารซินทิลเลเตอร์ แล้วเปล่งแสงออกมาให้สามารถเห็นได้เรียกว่า"การเรืองแสง (fluorescence)" สามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในสารอินทรีย์ (organic) และ สารอนินทรีย์ (inorganic) โดยมีกลไกคล้ายกัน คือ การเกิดเอกซ์ไซเตชัน (excitation) ของอิเล็กตรอนจากภาวะปกติสู่ภาวะถูกกระตุ้นที่ระดับพลังงานหนึ่ง และลดพลังงานกลับลงสู่ภาวะปกติด้วยการปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในลักษณะประกายแสง (scintillating light) ที่มีความยาวคลื่นของแสงช่วงคลื่นที่มองเห็นก่อนไปทางด้านแสงเหนือม่วงออกมา ดังแสดงด้วยแผนภาพระดับพลังงานในรูปที่ 2.2 ก. และ ข.

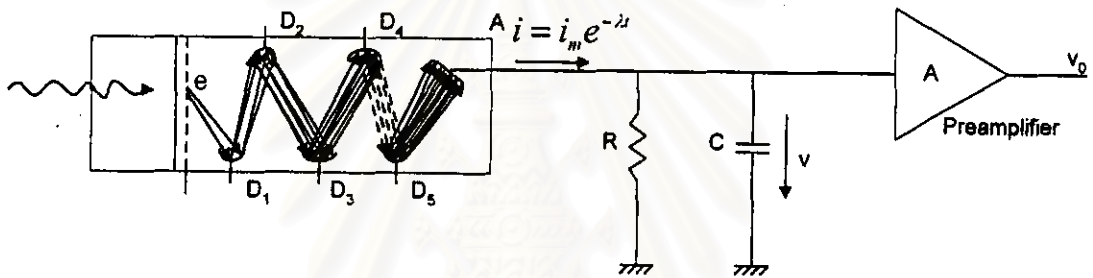




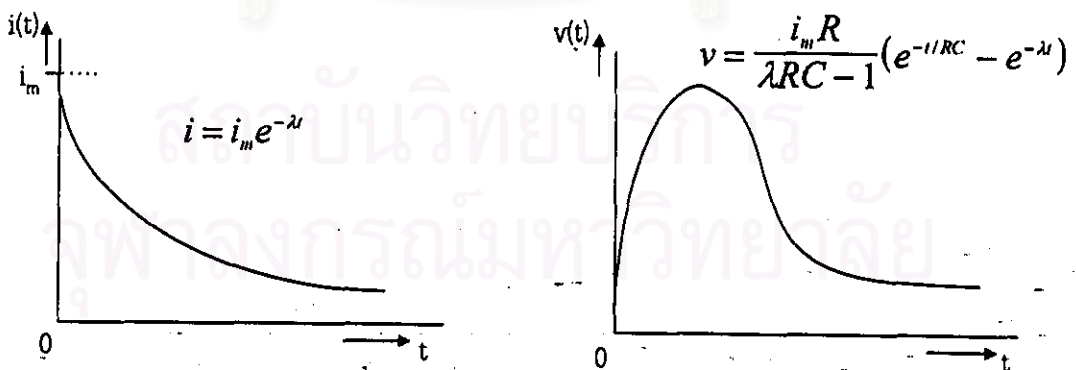
กระแสในวงจร RC ของภาคขยายส่วนหน้าซึ่งมีค่าคงที่เวลาเท่ากับ RC จะทำให้เกิดพัลส์ศักดาไฟฟ้าที่อินพุตของภาคขยายส่วนหน้า ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และสมการที่ 2.4 ซึ่งได้จากผลคูณของฟังก์ชันของวงจร RC และกระแสพัลส์เป็น

$$v = \frac{i_m R}{\lambda RC - 1} (e^{-t/\lambda RC} - e^{-\lambda t}) \dots\dots\dots 2.4$$

รูปสัญญาณพัลส์ที่ได้จากหัววัดรังสี และสัญญาณพัลส์ที่เกิดที่อินพุตของภาคขยายส่วนหน้าแสดงในรูปที่ 2.4 [2]



รูปที่ 2.3 การเกิดสัญญาณพัลส์ของหัววัดซินทิลเลชัน



ก. สัญญาณพัลส์กระแสจาก PMT ข. สัญญาณพัลส์ศักดาที่อินพุตของภาคขยายส่วนหน้า  
รูปที่ 2.4 แสดงสัญญาณพัลส์ของหัววัดรังสีซินทิลเลชัน

## 2.1.2. สารซินทิลเลเตอร์ชนิดต่าง ๆ

### 2.1.2.1. สารซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอินทรีย์ (organic scintillator)

กลไกการเกิดซินทิลเลชันของสารอินทรีย์ อธิบายได้ด้วยแผนภาพแถบพลังงานในรูปที่ 2.2ก. เมื่อโมเลกุลสารอินทรีย์ดูดกลืนพลังงานจากรังสี อิเล็กตรอนจะได้รับการกระตุ้นจากระดับปกติ ( $S_{00}$ ) ขึ้นไปอยู่ระดับ  $S_1$  หรือ  $S_2, S_3$  อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานสูงเกินระดับ  $S_{10}$  จะลดระดับพลังงานมาอยู่ในระดับ  $S_1$  อย่างรวดเร็วมากโดยไม่มีการปลดปล่อยโฟตอน เนื่องจากพลังงานระหว่างระดับพลังงานน้อยมาก จากนั้นอิเล็กตรอนที่ระดับ  $S_{10}$  ในอนุกรมระดับพลังงานเดี่ยว (single) จะลงสภาวะปกติที่ระดับ  $S_{00}$  ปลดปล่อยแสงเรืองออกมา ในบางกรณีกลุ่มอิเล็กตรอนที่ระดับ  $S_1$  อาจเปลี่ยนภาวะไปอยู่ในอนุกรมพลังงานทริปเปต (triplet) เรียกว่า "การเกิด intersystem crossing" ที่ระดับ T, การลงสู่ภาวะปกติจะมีเวลานานถึง  $10^3$  วินาที ทำให้เป็นการยืดเวลาการเรืองแสงให้ยาวขึ้น เรียกการเรืองแสงแบบนี้ว่า "ฟอสฟอเรสเซนซ์ (phosphorescence)" ซึ่งจะเกิดการรบกวนต่อการเกิดประกายแสงในสารอินทรีย์เสมอ นอกจากนี้แสงที่เกิดจากสารอินทรีย์จะมีความยาวคลื่นสั้นมาก และถูกโมเลกุลของก๊าซโดยเฉพาะออกซิเจนที่เจือปนอยู่ดูดกลืนแสงไปทำให้ปริมาณแสงลดลง หรือบางครั้งสีของสารอินทรีย์ก็เป็นตัวลดปริมาณแสงลง เรียกว่า "เกิดการควENCHING" ในสารอินทรีย์ชนิดเหลวจะมีการเติมสารผสมเพื่อเป็นตัวถ่ายโอนพลังงานปฐมภูมิ และปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นที่ยาวกว่า เรียกว่า "wavelength shifter" หรือเปลี่ยนประกายแสงที่เกิดขึ้นให้มีความยาวคลื่นเหมาะสมกับความไวของหลอดทิวทิลออิเล็กทรอนิกส์ด้วย

ซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอินทรีย์แบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ผลึกสารอินทรีย์บริสุทธิ์ (pure organic crystals) ได้แก่แอนทราซีน (anthracene) และสติลเบน (stilbene) ผลึกสารทั้ง 2 ชนิดแตกง่ายและไม่สามารถทำให้ขนาดใหญ่ได้แอนทราซีนเป็นผลึกที่ให้ประสิทธิภาพการเกิดประกายแสงสูง จึงมักพบว่าจะใช้เป็นซินทิลเลเตอร์อ้างอิงเสมอ ส่วนสติลเบนมีประสิทธิภาพต่ำกว่า เหมาะสำหรับวัดอนุภาคที่มีประจุและอิเล็กตรอน

2. สารอินทรีย์เหลว (liquid organic solutions) ประกอบด้วยองค์ประกอบ 2 ชนิด คือ สารเรืองรังสี และตัวทำละลาย พร้อมทั้งเติมสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวเปลี่ยนความยาวคลื่นแสงเพื่อให้เหมาะสมกับความไวของหลอดทิวทิลออิเล็กทรอนิกส์ (PMT) สารผสมนี้จะต้องจัดออกซิเจนออกเนื่องจากเป็นตัวควENCHING ที่สำคัญ และบรรจุในขวด (vial) ที่มีโปแตสเซียมต่ำ เหมาะสำหรับการวัดรังสีเบตาพลังงานต่ำจาก C-14 หรือ H-3 ด้วยเทคนิคการวัดแบ็กกราวนด์ต่ำ (low background)

3. ซินทิลเลเตอร์ชนิดพลาสติก (plastic scintillator) [6] เป็นซินทิลเลเตอร์ที่ทำการละลายสารเรืองรังสี (tetraphenylbutadiene) ลงในสไตรีนโมโนเมอร์ (styrene monomer) จากนั้น

สไตรีน จะเกิดโพลีเมอไรซ์ เป็นพลาสติกแข็งในรูปของ “polystyrene-tetraphenylbutadiene” ใช้สำหรับวัดรังสีเบตาและอิเล็กตรอน ซินทิลเลเตอร์ชนิดพลาสติก อาจอยู่ในรูปอื่น เช่น polyvinyltoluene-p-terphenyl tetraphenylbutadiene เป็นต้น

4. ซินทิลเลเตอร์ ชนิดฟิล์มบาง (thin film scintillator) ซินทิลเลเตอร์ชนิดพลาสติกสามารถทำให้บางลงถึง 10  $\mu\text{m}$  ด้วยเทคนิคการเคลือบสารเรืองรังสีพลาสติกบนผิวหน้าของหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน ด้วยเทคนิคการระเหยไอสารในสุญญากาศ (vacuum evaporation) สำหรับวัดอนุภาคหนัก ซึ่งไม่สามารถวัดด้วยซินทิลเลเตอร์ชนิดพลาสติกหนาได้

5. ซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอินทรีย์ ซึ่งเติมสารบางชนิด (loaded organic scintillators) ตามปกติสารอินทรีย์จะประกอบด้วยสารที่มีเลขมวลต่ำ เช่น ไฮโดรเจน คาร์บอน และออกซิเจน เป็นต้น ดังนั้น โอกาสในการเกิดอันตรกิริยากับรังสีแกมมาจึงน้อยมาก การที่จะเพิ่มโอกาสในการทำอันตรกิริยา หรือภาคตัดขวางต่อรังสีแกมมา ทำได้โดยการเติมสารที่มีเลขมวลสูงเข้าไป เช่น การเติมสารตะกั่ว หรือ การเติมดีบุกลงในซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอินทรีย์เหลว เพื่อวัดรังสีแกมมาพลังงานต่ำเป็นต้น

#### 2.1.2.2 ซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ (inorganic scintillator)

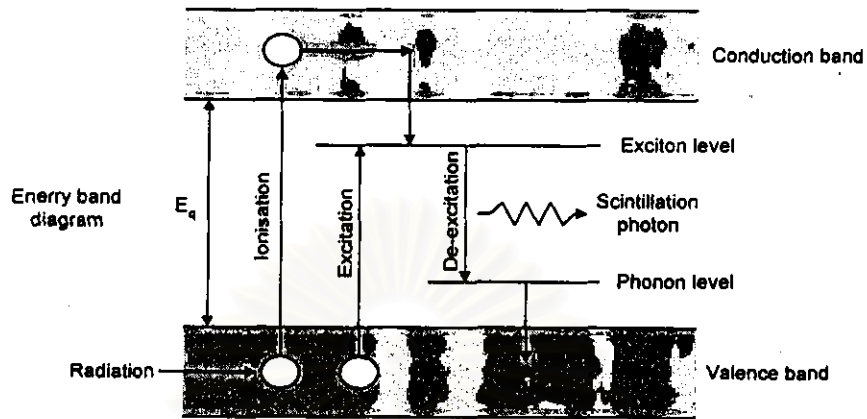
กลไกในการเกิดซินทิลเลชันของสารอนินทรีย์ อธิบายได้ด้วยแผนภาพแถบพลังงานในรูปที่ 2.2 ข. รูปแบบของ กระบวนการเกิดซินทิลเลชัน ในสารชนิดนี้ แบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ

ก. เมื่ออนุภาคนิวเคลียร์พลังงานสูง ภายโอนพลังงานให้อะตอมของสารอนินทรีย์จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากโครงสร้างในแถบวาเลนซ์ (valence band) ไปอยู่ในแถบคอนดักชัน (conduction band) กระบวนการนี้เรียกว่า “ไอออนไนเซชัน” ซึ่งอิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันและโฮล (hole) ในแถบวาเลนซ์ สามารถเคลื่อนที่ได้อิสระ

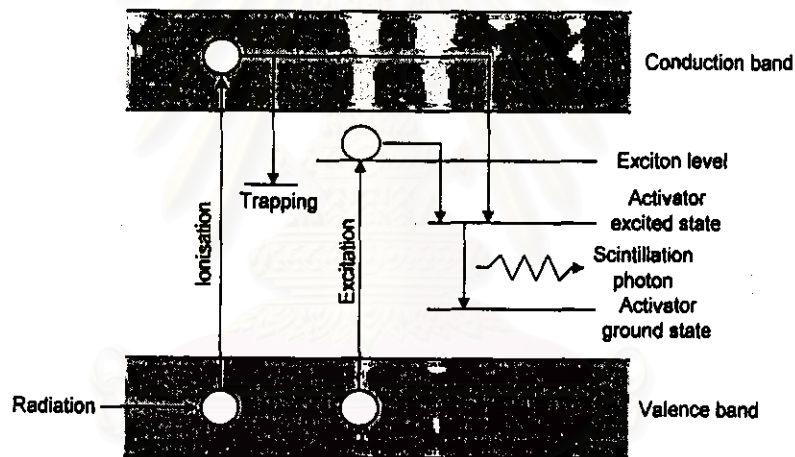
ข. วิธีการอีกวิธีหนึ่งเรียกว่า “เอกซ์ไซเตชัน (excitation)” คือการที่อะตอมได้รับพลังงานก่อให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล (electron-hole pair) คู่ของอิเล็กตรอนและโฮล จะเหนี่ยวนำกันในลักษณะคล้ายอะตอมของไฮโดรเจน และสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ ซึ่งจะเกิดในกรณีที่อิเล็กตรอนขึ้นไปอยู่ในระดับเอ็กซิตอน (exciton) เท่านั้น

เมื่ออิเล็กตรอนลดระดับพลังงานลงสู่ภาวะปกติจะปลดปล่อยแสงเรืองออกมาสำหรับในกระบวนการแรก อิเล็กตรอนได้รับพลังงานสูงมาก ความยาวคลื่นของแสงที่ปลดปล่อยจะอยู่นอกย่านที่ตามองเห็น คงเหลือปริมาณแสงที่ปลดปล่อยในช่วงคลื่นแสงเหนือม่วง (ultraviolet) เฉพาะในกระบวนการหลัง จึงได้มีการเพิ่มโอกาสให้อิเล็กตรอนในกระบวนการแรกลงสู่ภาวะปกติด้วยระดับ

พลังงานเดียวกัน โดยการเติมสารที่ทำให้ไม่บริสุทธิ์ลงไปในสารอนินทรีย์ เรียกว่า “การ แอกติเวต (activated)”



ก. ผลึกสารอนินทรีย์บริสุทธิ์



ข. ผลึกสารอนินทรีย์ที่แอกติเวตสาร

รูปที่ 2.5 แผนภาพแถบพลังงานของอิเล็กตรอนในผลึกอนินทรีย์

หลังจากสารอนินทรีย์ได้รับการแอกติเวตสารบางชนิดลงไปจะทำให้แผนภาพของแถบพลังงานเปลี่ยนเป็นรูปที่ 2.5 ข. มีการสร้างบริเวณที่ทำหน้าที่เหมือนกับดักอิเล็กตรอน (traps) ที่อยู่ในแถบคอนดักชันและบริเวณระดับเอกซิตอน ให้เข้ามาอยู่ที่ระดับพลังงานของแอกติเวเตอร์ (activator-excited state) และลงสู่ภาวะปกติ (ground state) ด้วยเวลาในช่วง  $10^{-8}$  วินาทีที่สามารถควบคุมให้ แสงที่ปลดปล่อยมีความยาวคลื่นใกล้เคียงกัน

ซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ แบ่งเป็นชนิดต่าง ๆ ได้ดังนี้

1. ซินทิลเลเตอร์ชนิดอัลคาไลฮาไลด์ (Alkali halide scintillator) สารอนินทรีย์ ในกลุ่มอัลคาไลฮาไลด์ นี้เป็นซินทิลเลเตอร์ที่มีการแอกติเวตสาร เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการเกิดประกายแสงได้แก่

1.1 โซเดียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) NaI (TI) เป็นผลึก NaI ที่เติมเทลเลียมมีความไวต่อความชื้น (hygroscopic) ผลึกจึงต้องผนึกสนิทในภาชนะ (air-tight container) มีประสิทธิภาพในการให้ประกายแสงสูง มีเวลาสลายแสง (decay time) ของพัลส์ประมาณ 230 ns ตัวผลึกแตกง่ายเมื่อได้รับการกระแทก หรือการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่รวดเร็ว (thermal shock) ผลึกวัดจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางและความหนาต่าง ๆ กัน เช่น 1"x0.2", 1"x1", 3"x3", 5"x5" จนถึงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 30" เป็นต้น ผลึกหนาใช้วัดรังสีแกมมา มีความสามารถในการแจกแจงพลังงานของ Cs-137 ในช่วง 7-9 % ผลึกชนิดบางใช้วัดรังสีเอกซ์ นอกจากนี้ยังออกแบบให้เป็นผลึกแบบหลุมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการวัด

1.2 ซีเซียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) CsI(Tl) และซีเซียมไอโอไดด์ (โซเดียม) CsI(Na) ซีเซียมไอโอไดด์(เทลเลียม) ไม่ไวต่อความชื้น ผลึกทนต่อแรงกระแทก ผลึกที่บางสามารถแปรเปลี่ยนรูปทรงได้ตามต้องการ มีสัมประสิทธิ์การดูดกลืนพลังงานต่อขนาดของผลึกมากกว่า NaI(Tl) นอกจากนี้เวลาสลายแสงของ CsI(Tl) ยังขึ้นกับชนิดของอนุภาคนิวเคลียร์ที่วัด จึงทำให้นิยมใช้กับเทคนิคการวัดแบบแจกแจงรูปสัญญาณพัลส์ (pulse shape discrimination) ส่วน CsI(Na) นั้นมีเวลาสลายแสงช้ามาก (4.18  $\mu$ s) [3]

1.3 ลิเทียม (ยูโรเพียม) Li(Eu) เป็นผลึกที่ออกแบบเฉพาะการวัดนิวตรอน โดยอาศัยปฏิกิริยา  ${}^6\text{Li}(n,\alpha)$  ใช้ลิเทียมที่มีความเข้มข้นของ  ${}^6\text{Li}$  สูงกว่าธรรมชาติสำหรับการวัดเทอร์มัลนิวตรอน

2. ซินทิลเลเตอร์ที่ไม่อยู่ในกลุ่มอัลคาไลฮาไลด์

2.1 บิสเมทเจอร์มานเนต (BGO) เป็นผลึกของสารผสม Bi, Ge, O<sub>12</sub> มีค่าความหนาแน่นสูงถึง 7.3g/cm<sup>3</sup> มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีแกมมาสูง ทนทานกว่า NaI(Tl) มีประสิทธิภาพในการให้ประกายแสงน้อยกว่า มีเวลาสลายแสงของพัลส์ 300 ns ปกติจะมีการนำไปใช้กับการวัดรังสีแกมมานี้ต้องการหัววัดรังสีขนาดเล็ก ใช้ในเครื่องโทโมกราฟีชนิดรังสีเอกซ์ เป็นต้น

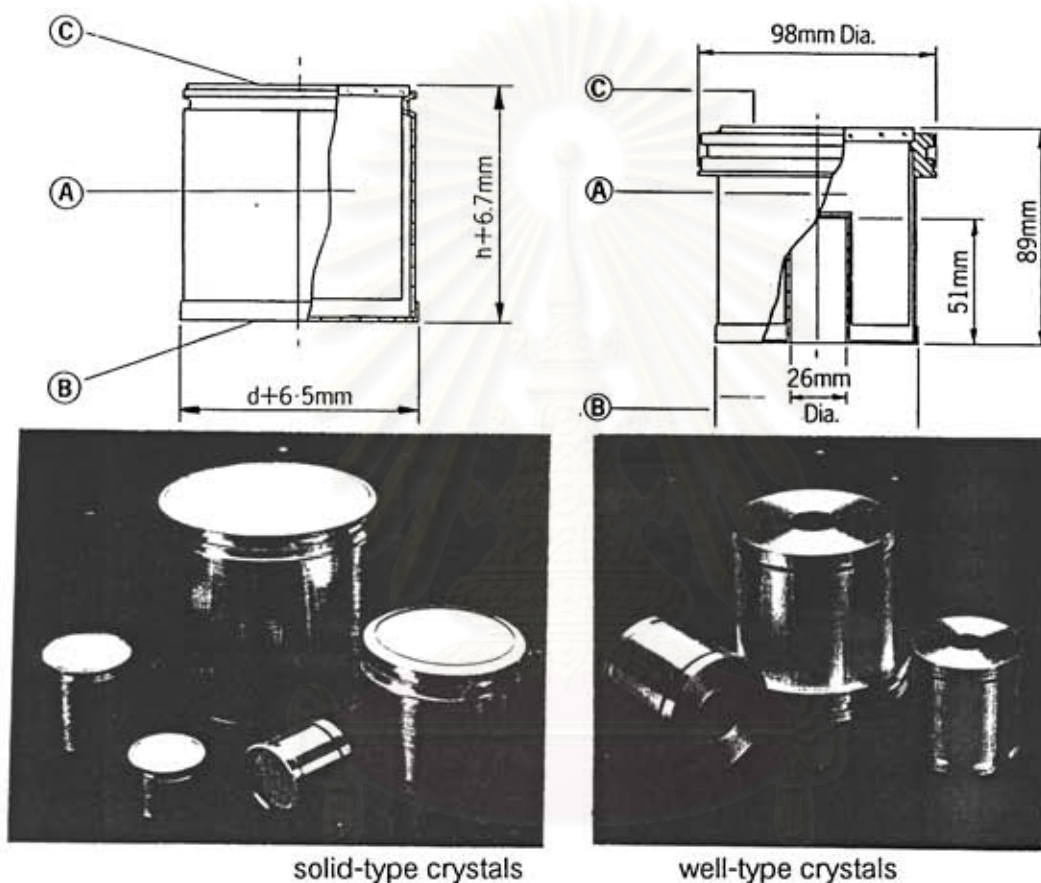
2.2 ซิงกะซีซัลไฟด์ (เงิน) ZnS(Ag) เป็นผงซินทิลเลเตอร์ สำหรับวัดอนุภาคที่มีประจุ เช่น อัลฟา และอนุภาคหนัก มีความหนาของแผ่นน้อยกว่า 25 mg/cm<sup>2</sup>

2.3 แคลเซียมฟลูออไรด์(ยูโรเพียม) CaF<sub>2</sub> (Eu) เป็นผลึกที่ไม่ไวต่อความชื้น



มีประสิทธิภาพในการวัดรังสีเบตา และอิเล็กตรอน ทนความเสียหายจากการทำลายของรังสีทำงานในสุญญากาศได้ดี จึงนิยมนำมาใช้ในการสร้างภาพจุลทรรศน์อิเล็กตรอน

2.4 ผลึกวัสดุอื่น ๆ ที่มีเวลาสลายแสงของพัลส์สั้นมากสำหรับใช้ในงานด้านวิเคราะห์เวลาของอนุภาคนิวเคลียร์ ได้แก่  $BaF_2$ ,  $CsF$ ,  $CeFe_3$  เป็นต้น



solid-type crystals

well-type crystals

A = Crystal  
B = Entrance Window  
C = Optical Window

รูปที่ 2.6 ผลึกวัดโซเดียมไอโอไดด์ (เทลเลียม) แบบต่างๆ

3: ซินทิลเลเตอร์ชนิดแก้ว (glass scintillator) ซินทิลเลเตอร์ชนิดนี้ทำจากแก้วซิลิเกต (silicate) ที่บรรจุลิเทียมและแอกติเวตซีเรียมลงไปสำหรับใช้วัดเทอร์มินิวตรอนปกติจะใช้ลิเทียม ( ${}^6Li$ ) ที่มีความเข้มข้นถึง 95 % ซีเรียมที่แอกติเวตลงในเนื้อแก้วเพื่อให้ความยาวคลื่นของประกายแสงอยู่ในย่านความไวของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ถ้าซินทิลเลเตอร์ชนิดแก้วนำไปประยุกต์ใช้ในการวัดรังสีแกมมาหรือเบตา ลิเทียมที่บรรจุในเนื้อแก้วไม่จำเป็นต้องมีความเข้มข้นสูง ใช้ลิเทียม

ธรรมชาติก็เพียงพอ ปัจจุบันแก้วที่ใช้ทำซินทิลเลเตอร์ จะผสมสารให้มีความหนาแน่นสูงขึ้นโดยมีส่วนผสมของ  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Ce}_2\text{O}_3$  และ  $\text{BaO}$  เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ [3]

Properties of Common Inorganic Scintillators

Material	Specific Gravity	Wavelength of Maximum Emission (nm) $\lambda_{\text{max}}$	Index of Refraction at $\lambda_{\text{max}}$	Principal Decay Constant ( $\mu\text{s}$ )	Pulse 10-90% Rise Time ( $\mu\text{s}$ )	Total Light Yield in Photons/McV	Absolute Scintillation Efficiency for Fast Electrons	Relative $\gamma$ -Ray Pulse Height with Bi-alkali PM Tube
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38000	11.3%	1.00
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.0	4	52000	11.9	0.49
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39000	11.4	1.11
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.4	—	11000	2.8	0.23
BGO	7.13	505	2.15	0.30	0.8	8200	2.1	0.13
BaF <sub>2</sub> slow component	4.89	310	1.49	0.62	3	10000	4.5	0.13
BaF <sub>2</sub> fast component	4.89	220	—	0.0006	—	—	—	0.03 <sup>a</sup>
ZnS(Ag) (polycrystalline)	4.09	450	2.36	0.2	—	—	—	1.30 <sup>b</sup>
CaF <sub>2</sub> (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7	0.78
CsF	4.11	390	1.48	0.004	—	—	—	0.05
Li glass <sup>c</sup>	2.5	395	1.55	0.075	—	—	1.5	0.10
For comparison, a typical organic (plastic) scintillator:								
NE 102A	1.03	423	1.58	0.002	—	10000	3.0	0.25

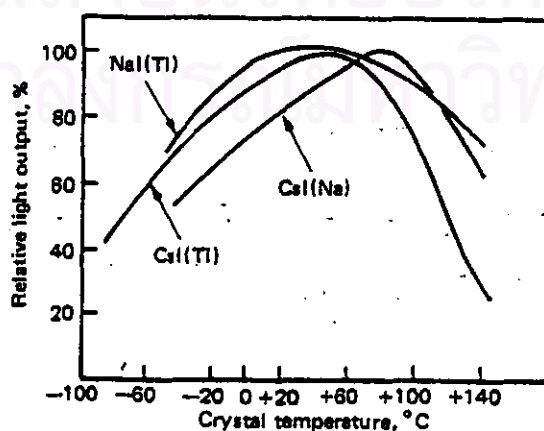
<sup>a</sup>Using UV-sensitive PM tube.

<sup>b</sup>For alpha particles.

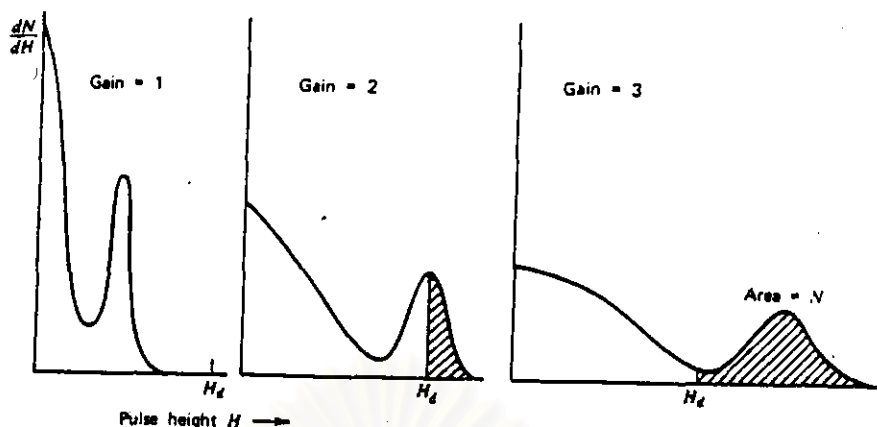
<sup>c</sup>Properties vary with exact formulation. Also see Table 15-1.

Source: Data derived primarily from Refs. 56-58.

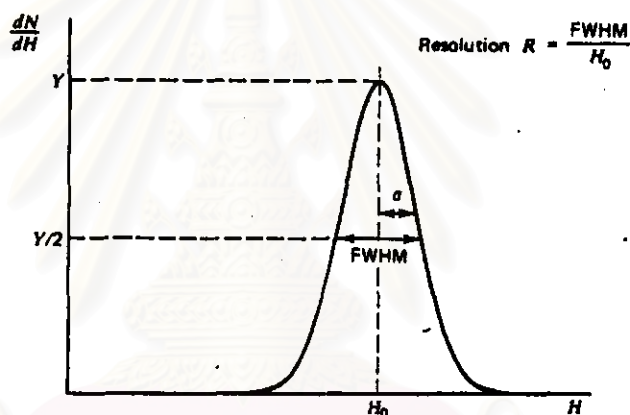
จากรายงานข้อมูลของห้องปฏิบัติการวิจัย Harshaw [1] แสดงให้เห็นว่าอุณหภูมิแวดล้อมมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการให้ประกายแสงของผลึกวัตรงสังซินทิลเลเตอร์ชนิดต่างแสดงในเส้นกราฟ ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มแสงสัมพันธ์ในรูปที่ 2.7 และรูปแบบสเปกตรัมอัตราขยาย การหาพื้นที่ใต้ curve และการหา เปอร์เซนต์ Resolution



(ก.) เส้นกราฟความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและความเข้มแสงของผลึกวัตรงสัง



(ข.) เส้นกราฟแสดงค่าพิกเมื่อเพิ่มอัตราขยายและการหาพื้นที่

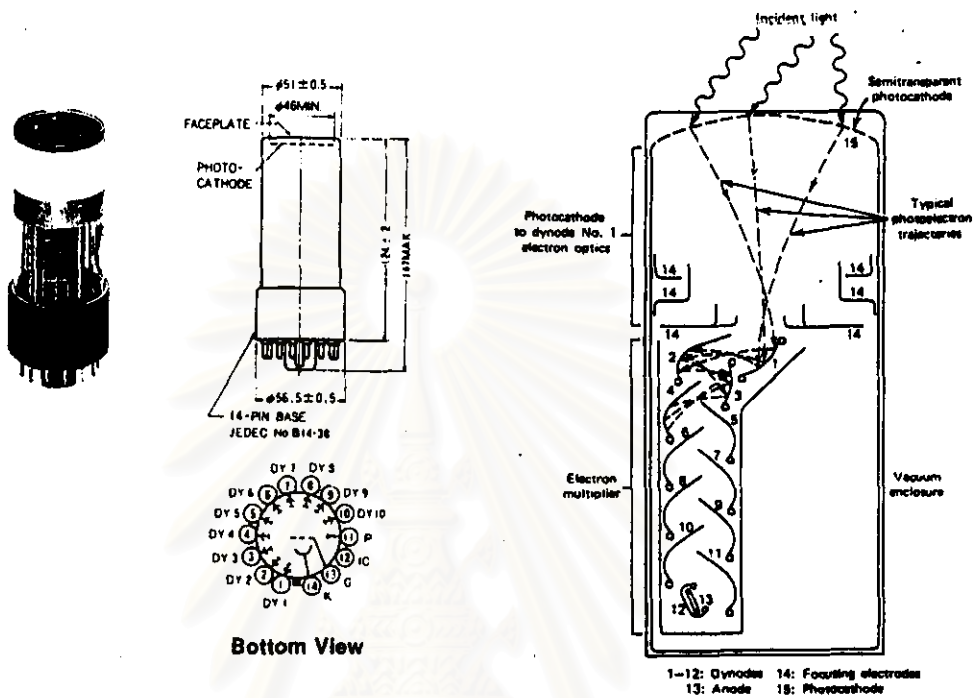


(ค.) เส้นกราฟแสดงการคำนวณหา Resolution

รูปที่ 2.7 เส้นกราฟแสดงความสัมพันธ์การหาประสิทธิภาพและพื้นที่ที่ได้พิก

## 2.2 หลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (photomultiplier tube)

หลอดทวีคูณอิเล็กตรอน เป็นส่วนประกอบสำคัญในหัววัดซินทิลเลชัน ทำหน้าที่เปลี่ยนประกายแสงให้เป็นอิเล็กตรอน และขยายปริมาณอิเล็กตรอน ให้สูงพอที่จะสร้างสัญญาณพัลส์ หลอดทวีคูณอิเล็กตรอนที่ใช้กับหัววัดรังสีซินทิลเลชันจะเป็นแบบแสงเข้าทางด้านปลายของหลอด (end-on type) มีโครงสร้างดังรูปที่ 2.8 ประกอบด้วยส่วนต่างๆ บรรจุภายในหลอดแก้วชนิดโบโรซิลิเกตที่มีส่วนผสมของ  $^{40}\text{K}$  ค่าซึ่งมีภาวะเป็นสัญญาณกาศ ส่วนประกอบที่สำคัญได้แก่



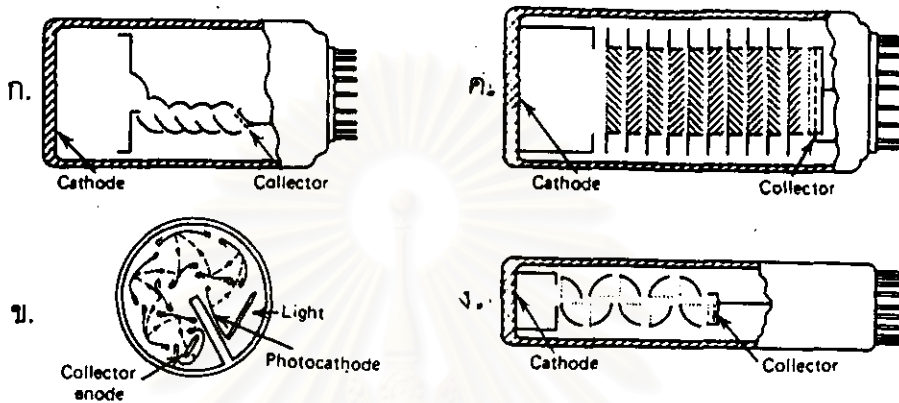
ก. รูปร่างภายนอกหลอด PMT

ข. โครงสร้างภายในหลอด PMT

รูปที่ 2.8 โครงสร้างของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

1. โฟโตแคโทดแบบกึ่งแสงผ่าน (semitransparent photocathode) เป็นสารไวแสงประเภทไบอัลคาไล (bialkali) ได้แก่ Sb-Rb-Cs และ Sb-Kb-Cs เป็นต้น เมื่อแสงตกกระทบสารไวแสงจะปลดปล่อยโฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron)
2. โฟกัส (focusing electrode) เป็นแผ่นขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่สร้างสนามไฟฟ้าสถิตย์ควบคุมตัวอิเล็กตรอนให้รวมกันสู่ไดโนดตัวแรก (1<sup>st</sup> dynode)
3. ไดโนด (dynode) เป็นแผ่นเคลือบสารที่ไวต่อการเกิดเซกกันดารีอิมิตชัน (secondary emission) จัดเรียงทำมุมกันเพื่อให้เกิดการทวีปริมาณอิเล็กตรอน ซึ่งอาจจะมีแผ่นขั้วระหว่าง 10 ถึง 15 แผ่น วัสดุที่ใช้ทำไดโนด ได้แก่ Cs<sub>3</sub>Sb, AgMg, Cs<sub>3</sub>Sb, CaBe เป็นต้น
4. แอโนด (anode) เป็นแผ่นรับประจุอิเล็กตรอนจากการทวีปริมาณของชุดไดโนด (dynode chain) เพื่อสร้างสัญญาณพัลส์กระแส หรือ พัลส์ศักดาไฟฟ้าทางออก ชุดแผ่นขั้วไฟฟ้าไดโนดและแอโนดนี้รวมเรียกว่า ส่วนทวีปริมาณอิเล็กตรอน (electronmultiplier) ซึ่งมีการจัดรูปแบบต่าง ๆ กัน 4 แบบ ดังในรูปที่ 2.9 ได้แก่

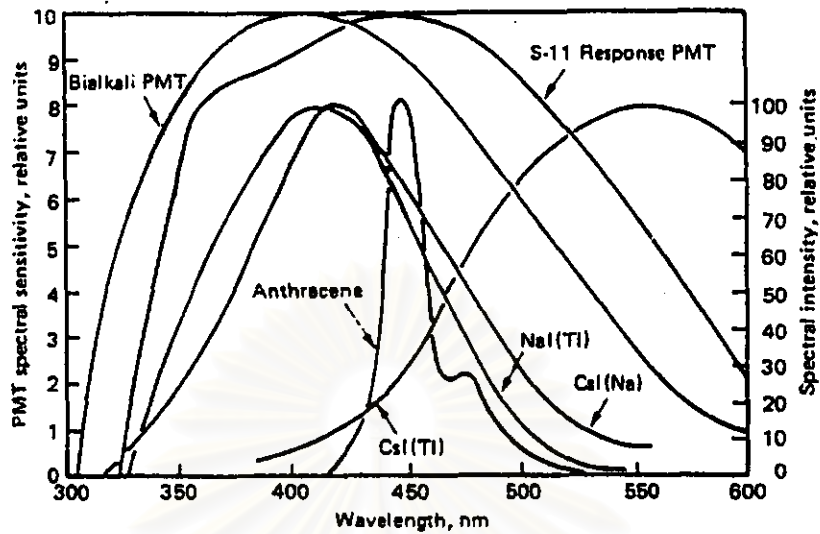
แบบ ก. Focus linear ข. Circular grid ค. Venetian blind ง. Box and grid



รูปที่ 2.9 รูปแบบของการจัดชุดไดโนดในหลอด PMT

### 2.2.1 การตอบสนองย่านความถี่แสง (spectral response)

ประสิทธิภาพในการเปลี่ยนประกายแสง หรือ แสงที่ตกกระทบแคโทด จะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นกับความยาวคลื่นของแสง เส้นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความไวแสงของแคโทด และความยาวคลื่นแสง เรียกว่า "spectral response characteristic" การปลดปล่อยโฟตอน ในรูปของประกายแสงของผลึกซินทิลเลเตอร์จะอยู่ในช่วงความยาวคลื่น ที่ค่อนข้างยาวคลื่นแสงเหนือม่วง (Ultraviolet, UV) ลงมาถึงคลื่นแสงที่ตามองเห็น คือ 300 - 600 nm ขึ้นกับชนิดของผลึกซินทิลเลเตอร์ ดังนั้น หลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ที่เหมาะสมกับงานด้านนี้จะต้องเลือกหลอดที่มีโฟโตแคโทด เป็นไบอัลคาไลต์ หรือ S11 ดังแสดงเส้นกราฟการตอบสนองช่วงคลื่น และช่วงคลื่นของประกายแสงจากผลึกซินทิลเลเตอร์ชนิดต่าง ๆ ในรูปที่ 2.10 [1]



รูปที่ 2.10 เส้นกราฟการตอบสนองช่วงคลื่นของ PMT และช่วงคลื่นของประกายแสงจากผลึกซินทิลเลเตอร์

2.2.2 คุณสมบัติของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

หลอดทวีคูณอิเล็กตรอนที่ใช้กับหัววัดซินทิลเลเตอร์จะมีขนาดและรูปร่างต่างกันไป สามารถเลือกให้เหมาะกับขนาดของผลึกซินทิลเลเตอร์ สิ่งสำคัญของการใช้งานคือ อัตราขยาย (gain) หลอดซึ่งขึ้นกับไฟฟ้าศักดาสูงและจำนวนไดโอด อัตราขยายหรืออัตราทวีคูณอิเล็กตรอนจะอยู่ระหว่าง  $0.5 \times 10^6 - 2.5 \times 10^6$  การใช้อัตราขยายสูงจะมีผลต่ออายุของหลอดและการเพิ่มอุณหภูมิซึ่งจะทำให้มีสัญญาณรบกวนสูง

ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการพิจารณาคุณสมบัติของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ได้แก่ ประสิทธิภาพควอนตัม ความไวต่อการส่องแสง และอัตราขยายอิเล็กตรอน ซึ่งมีนิยามดังต่อไปนี้

ก. ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency)

ประสิทธิภาพควอนตัม (QE) คือ อัตราส่วนของจำนวน โฟโตอิเล็กตรอนที่ปล่อยจากโฟโตแคโทด และจำนวนของโฟตอนที่ตกกระทบ

$$QE = \frac{\text{จำนวนของโฟโตอิเล็กตรอน}}{\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ}} \dots\dots\dots 2.5$$

ข. ความไวต่อการส่องสว่าง (radiant sensitivity)

ความไวต่อการส่องสว่าง คือ อัตราส่วนของกระแสจากโฟโตอิเล็กตรอน ( $I_k$ ) และกำลังการส่องสว่างของแสง (P) ที่ตกกระทบบนโฟโตแคโทด

$$S = \frac{\text{จำนวนของโฟโตอิเล็กตรอน}(I_k)}{\text{จำนวนโฟตอนที่ตกกระทบบน}(P)} \quad A/W \dots \dots \dots 2.6$$

จากทฤษฎีควอนตัมกล่าวว่า พลังงานของโฟตอน คือ  $h\nu = \frac{hc}{\lambda}$  และถ้ากำลังของแสงส่องกระทบบนเท่ากับ P จำนวนของโฟตอนที่กระทบบนโฟโตแคโทดจะเท่ากับ  $\frac{P}{h\nu}$  หรือ  $\frac{P\lambda}{hc}$  ดังนั้น สมการที่ 2.5 จะเป็น [4]

$$QE = \frac{(I_k)hc}{P\lambda} = S \times \frac{hc}{\lambda}$$

$$\text{หรือกระแสของโฟโตอิเล็กตรอน } I_k = \frac{QE \cdot \lambda \cdot P \cdot q_e}{hc} \quad A \dots \dots \dots 2.7$$

ค. อัตราขยายอิเล็กตรอน (electron gain)

อัตราขยายกระแส หมายถึงอัตราส่วนของกระแสแอโนดและกระแสโฟโตอิเล็กตรอน ถ้าหลอดทวีคูณอิเล็กตรอนมีจำนวนไดโนด n ตัว สัมประสิทธิ์เฉลี่ยในการปลดปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิของไดโนดแต่ละชุด ( $\delta$ ) หาได้จาก

$$\delta = A (Vs)^\alpha \dots \dots \dots 2.8$$

เมื่อ A = ค่าคงที่

Vs = ศักไฟฟ้าระหว่างไดโนด

$\alpha$  = ค่าคงที่ของวัสดุและรูปทรงไดโนด (อยู่ระหว่าง 0.7-0.8)

ในกรณีของไดโนดที่ทำด้วย CsSb ค่า  $\delta = 0.2 (Vs)^{0.7}$  และถ้าไดโนดที่ทำจาก Ag MgO ค่าของ  $\delta = 0.025 Vs$

อัตราขยายรวมของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน (overall gain) ที่เกิดจากไดโนดทั้งหมดคำนวณได้ดังนี้

$$G = f(g\delta)^n \dots\dots\dots 2.9$$

- เมื่อ  $f$  = สัมประสิทธิ์การเก็บ (collection efficiency) น้อยกว่า 100 %  
 $g$  = สัมประสิทธิ์การถ่ายโอนอิเล็กตรอนระหว่างไดโนด เกือบ 100 %  
 $\delta$  = สัมประสิทธิ์การปล่อยอิเล็กตรอนทุติยภูมิ  
 $n$  = จำนวนไดโนด

อัตราขยายอิเล็กตรอนในทางปฏิบัติสามารถหาได้จากการพิจารณาการสูญเสียในการเก็บอิเล็กตรอนเริ่มต้น และการถ่ายโอนปริมาณอิเล็กตรอนระหว่างไดโนด โดยการวัดความไวรวม (overall sensitivity) ของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ซึ่งค่าทวีคูณอิเล็กตรอน ( $M$ ) จะวัดในหน่วย A/lumen จากการใช้ต้นกำเนิดแสงชนิดหลอดไส้ทั้งตะเอนส่องไปยังแคโทดให้กำลังส่องสว่าง ( $S$ ) ในหน่วย  $\mu\text{A/lumen}$  ดังนั้น อัตราขยายที่แท้จริงจากผลการวัดนำมาคำนวณหาอัตราขยายรวมได้เป็น [4]

$$G_a = \frac{M}{S} \times 10^6 \dots\dots\dots 2.10$$

หลอดทวีคูณอิเล็กตรอนที่นิยมนำมาใช้กับผลึกวัดรังสีทั้งชนิดสารอินทรีย์และอนินทรีย์ จะมีอัตราขยายประมาณ  $10^6$  เท่า มีระบบการจัดไดโนดต่างๆ กันไปดังคุณลักษณะของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอนในตารางที่ 2.2 [5]

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

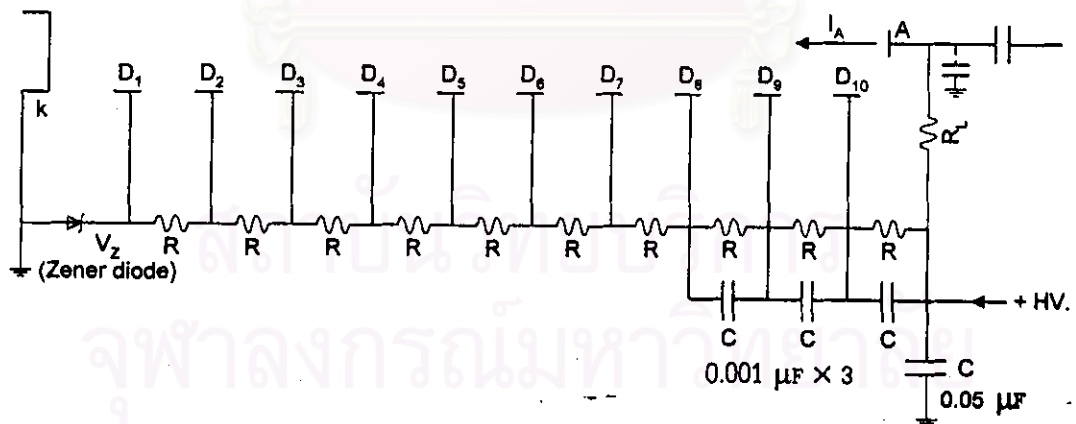


ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

Type	Maximum Outside Dimensions (in.)		Cathode		Dynode System				Max Overall Voltage (V)
	Diameter	Length	Area (cm <sup>2</sup> )	Response	No. of Dynodes	Type	Material	Gain	
RCA									
5819	2-1/4	5-13/16	14.2	S-11	10	Circ. focused	CsSb	$2.3 \times 10^6$	1250
6342	2-1/4	5-13/16	14.2	S-11	10	Circ. focused	AgMg	$0.55 \times 10^6$	1500
6855	2-1/4	5-13/16	14.2	S-11	10	Circ. focused	CsSb	$2.3 \times 10^6$	1250
6199	1-9/16	4-9/16	7.75	S-11	10	Circ. focused	CsSb	$2.8 \times 10^6$	1250
6372	2-9/16	7-3/4	80	S-11	10	Circ. focused	CsSb	$2.5 \times 10^6$	1200
8055	5-1/2	6-3/4	97	S-11	10	Venetian blind	CuBe	$1.5 \times 10^6$	2000
Du Mont									
8291	1-1/2	4-1/4	6.4	S-11	10	Box	AgMg	$2 \times 10^6$	2100
8292	2-1/16	5-5/8	13.4	S-11	10	Box	AgMg	$2 \times 10^6$	2100
6363		6-1/8	31.4	S-11	10	Box	AgMg	$2 \times 10^6$	1800
6364	5-1/4	7-1/2	88.8	S-11	10	Box	AgMg	$2 \times 10^6$	1800
EMVUS									
9536B	2	4-3/4	14.8	S-11	10	Venetian blind	CsSb	$3 \times 10^6$	1700
CBS									
CL1012	1-1/2	4-3/4	8	S-11	10	Venetian blind	AgMg	$2 \times 10^6$	1750

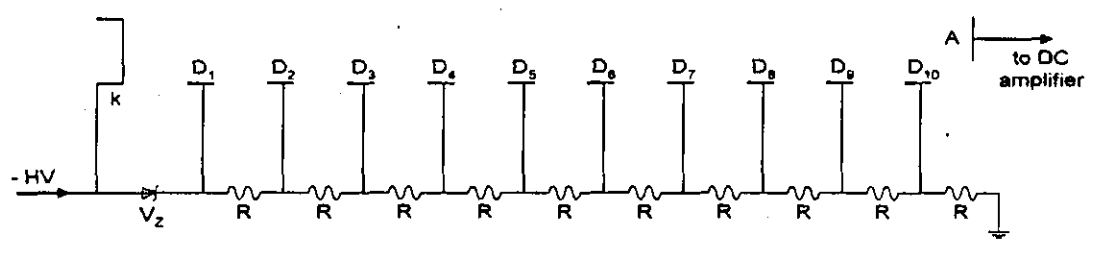
### 2.2.3 วงจรของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

การจัดวงจรเพื่อไบอัสให้หลอดทวีคูณอิเล็กตรอนทำงานได้สมบูรณ์มี 2 รูปแบบ คือ แบบให้สัญญาณพัลส์ทางแอโนด และแบบการวัดปริมาณกระแสแอโนดต่อเนื่อง ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และ 2.12 ตามลำดับ



- $R$  = dividing resistor of dynode chain
- $R_L$  = Load resistor
- $C_L$  = capacitance of anode circuit to ground
- $C_C$  = coupling capacitance

รูปที่ 2.11 การจัดวงจรฐานหลอด PMT ซึ่งให้สัญญาณรูปพัลส์



- R = dividing resistor of dynode chain
- $R_L$  = Load resistor
- $C_L$  = capacitance of anode circuit to ground
- $c_c$  = coupling capacitance

รูปที่ 2.12 การจัดวงจรฐานหลอด PMT สำหรับการวัดสัญญาณต่อเนื่อง

ก. คุณสมบัติของแหล่งจ่ายไฟฟ้าศักดาสูงสำหรับหัววัดซินทิลเลชัน

1. ความคงที่แน่นอน (stability) ศักดาไฟฟ้าสำหรับไบอัสจะต้องมีเสถียรภาพสูงเพื่อมีศักดาไฟฟ้าคงที่ เนื่องจากอัตราขยายของหลอดขึ้นกับศักดาไฟฟ้านี้
2. ช่วงของศักดาไฟฟ้า ศักดาไฟฟ้าที่ใช้จะต้องสูงพอที่จะให้หลอดทำงานในอัตราขยายปกติ และต้องเป็นแบบปรับค่าได้ต่อเนื่อง เพราะหลอดทวีคูณอิเล็กตรอนแต่ละหลอดต้องการศักดาไฟฟ้าต่างกันไปตามชนิดของหลอด
3. กระแสไฟฟ้าของแหล่งจ่าย หลอดทวีคูณอิเล็กตรอนจะมีกระแสไหลในวงจร 2 ส่วน คือ กระแสแอโนด ( $I_A$ ) กระแสในชุดตัวต้านทานไดโนดเซน ( $I_D$ ) การที่จะจัดให้ศักดาไฟฟ้าของวงจรแบ่งศักดาไฟฟ้ามีค่าคงที่ กระแส  $I_D$  จะต้องมากกว่า  $I_A$  ประมาณ 10 เท่า ซึ่งตามปกติแล้วกระแสเฉลี่ยของแอโนดจะมีค่าประมาณ 100  $\mu A$  ดังนั้น แหล่งจ่ายไฟฟ้าจะต้องจ่ายกระแสให้วงจรได้ 2-3 mA จึงจะเพียงพอ การจัดวงจรให้ใช้กระแสจากแหล่งจ่ายจะต้องพิจารณาพารามิเตอร์ของหลอดแต่ละชนิด
4. ศักดาไฟฟ้าระหว่างแคโทดและไดโนดตัวแรก สนามไฟฟ้าระหว่างแคโทดและไดโนดตัวแรก  $D_1$  ควรจะมีค่าสูงพอ เป็นไปตามคู่มือที่กำหนด เนื่องจากเป็นจุดเริ่มต้นของการทวีคูณปริมาณอิเล็กตรอน การทำให้ศักดาไฟฟ้าระหว่าง K และ  $D_1$  คงที่ อาจใช้ซีเนอร์ไดโอดควบคุมดังในวงจรรูปที่ 2.11 และ 2.12
5. ความไวรวมของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน สามารถลดลงได้ โดยลดศักดาไฟฟ้าระหว่างไดโนดที่  $D_4 - D_5$  หรือ  $D_5 - D_6$  ไม่จำเป็นต้องลดศักดาไฟฟ้าหลักของวงจรระหว่างแอโนดและแคโทด

6. ศักดาไฟฟ้าระหว่างไดโนดสุดท้ายกับแอโนด ถ้าต้องการสัญญาณทางออกให้สูงขึ้น อาจจำเป็นต้องเปลี่ยนความต้านทานที่ไดโนดตัวสุดท้าย และเพื่อป้องกันการอ้อมตัวของประจุ (space charge) ทำให้ได้โดยต่อค่าความจุที่ไดโนดตัวสุดท้ายลงกราวด์และต่อค่าความจุคร่อมตัวต้านทานบริเวณไดโนดตัวท้าย ๆ เพื่อลดการกระเพื่อมของศักดาไฟฟ้า

ข. การออกแบบไดโนดเซน

เนื่องจากศักดาไฟฟ้า  $V$  ที่ไบอัสให้กับหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ จะมีผลต่อศักดาไฟฟ้าระหว่างไดโนด ดังนั้นจากสมการ 2.9 เมื่อทำการดิฟเฟอเรนเชียล อัตราขยายรวม [2] จะได้

$$\frac{dG}{G} = 0.7n \frac{dV}{V} \dots\dots\dots 2.11$$

ตามปกติค่า  $0.7n$  จะมีค่าน้อยกว่า 10 ทำการอินทิเกรตสมการที่ 2.11 จะได้

$$\log \frac{V}{V_1} = \frac{1}{0.7n} \log \frac{G}{G_1} \dots\dots\dots 2.12$$

โดย  $V_1$  คือค่าศักดาไฟฟ้าสำหรับอัตราขยาย  $G_1$

ค่าศักดาไฟฟ้าระหว่างแคโทดและไดโนดแรก สามารถพิจารณาได้จากค่าศักดาไฟฟ้าที่ง่าย ซึ่งมีค่าระหว่าง  $V_{min}$  และ  $V_{max}$  ศักดาไฟฟ้าระหว่างแคโทดและไดโนดแรก จะต้องจัดให้คงที่ ถ้า  $\frac{V_{min}}{V_{max}} < \frac{2}{3}$  ในกรณีนี้จะทำได้ด้วยการใช้ซีเนอร์ไดโอด

จากวงจรในรูปที่ 2.10 ถ้าไม่มีกระแสแอโนด กระแสในชุดตัวต้านทาน (dynode chain resistors) จะเป็น

$$I_B = \frac{V}{(n+1)R} \dots\dots\dots 2.13$$

และกระแสแอโนดในกรณีของวงจรแบบให้สัญญาณพัลส์และแบบสัญญาณต่อเนื่องจะพิจารณาได้ดังนี้

ก. ในกรณีที่กระแสที่แอโนดเป็นกระแสตรง ศักดาไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานตัวสุดท้ายในชุดตัวต้านทานจะมีค่า  $(I - I_A)R$  นั่นคือ ศักดาไฟฟ้าระหว่างแคโทดกับไดโนดตัวสุดท้ายจะเพิ่มขึ้นจำนวน  $I_A R$  หรือ เพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน  $\frac{I_A}{I}$  ดังนั้น ในกรณีของการจัดศักดาไฟฟ้า

ระหว่างไดโนดเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น (linear dynode chain) อัตราขยายรวมจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วน  $\frac{I_A}{I}$  โดยประมาณ

ข. สำหรับการจัดวงจรที่เป็นสัญญาณพัลส์  $I_A = i_p N e$  (เมื่อ  $i_p$  คือกระแสพัลส์  $N$  คือ อัตราของพัลส์ และ  $e$  คือความกว้างพัลส์) อัตราขยายของหลอดก็จะเพิ่มขึ้นในกรณีเดียวกับแบบแรก

เพื่อให้อัตราขยายคงที่ซึ่งต้องต่อค่าความจุคร่อมตัวต้านทานบริเวณชุดไดโนดตัวท้าย ๆ และตัวท้ายสุดต่อลงกราวด์ เพื่อลดการกระเพื่อมของศักดาไฟฟ้าที่ไดโนดสุดท้ายการเปลี่ยนแปลงของศักดาไฟฟ้าจะเท่ากับ  $\frac{i_p t}{C}$  เมื่อ  $C$  คือค่าความจุของตัวเก็บประจุที่ใส่ลงกราวด์ที่ไดโนดตัวสุดท้าย และการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายอิเล็กทรอนิกส์จะเป็น

$$\Delta G = 0.7 \frac{i_p t}{C V_s} \dots\dots\dots 2.14$$

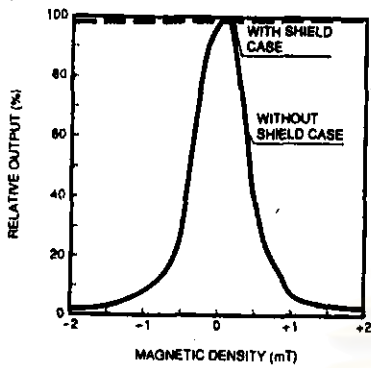
ถ้ายอมให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของอัตราขยายได้ไม่เกิน  $L$  % ค่าของตัวเก็บประจุจะต้องมีค่า

$$C > 70 n \frac{i_p t}{V_{min} L} \dots\dots\dots 2.15$$

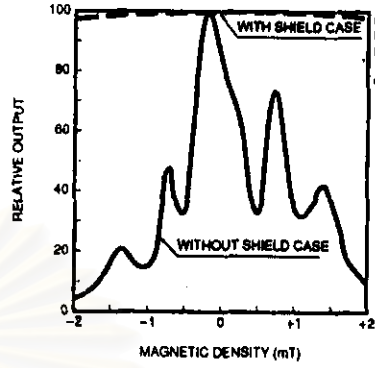
โดย  $V_{min} = nVs$

2.2.4 อิทธิพลของสนามแม่เหล็ก

จากโครงสร้างของหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ในรูปที่ 2.9 จะเห็นว่าระยะห่างระหว่างโฟโตแคโทดไปยังแอโนด มีระยะห่างพอสมควร นั้นหมายถึงกลุ่มอิเล็กทรอนิกส์จะต้องเคลื่อนผ่านระยะห่างนี้ เมื่อหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ทำงานในบริเวณ ที่มีสนามแม่เหล็กรบกวน จะทำให้กลุ่มอิเล็กทรอนิกส์เบี่ยงเบนจากไดโนดและแอโนด ก่อให้เกิดการสูญเสียปริมาณอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้อัตราขยายเปลี่ยนแปลงทันที ดังแสดงในเส้นกราฟรูปที่ 2.13 [4] จึงจำเป็นต้องมีการป้องกันการรบกวนของสนามแม่เหล็กด้วยการหุ้มโลหะกำบังสนามแม่เหล็ก ( $\mu$ -metal) แต่ถ้าสนามแม่เหล็กมีความเข้มสูงมาก จำเป็นต้องหลีกเลี่ยงให้หลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ทำงานให้ห่างจากแหล่งกำเนิดสนามแม่เหล็ก เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณที่แอโนดจากผลของสนามแม่เหล็กจะทำให้ขนาดของความสูงของพัลส์ต่ำกว่าระดับคิสทริมิเนเตอร์ที่ตั้งไว้ทำให้การนับรังสีผิดพลาด



MAGNETIC SHIELD CASE: E989-09  
 PMT:  $\phi$  13mm (1/2") HEAD-ON TYPE  
 (LINEAR-FOCUSED DYNODE)  
 ex: R647  
 R1463  
 etc.



MAGNETIC SHIELD CASE: E989-05  
 PMT:  $\phi$  51mm (2") HEAD-ON TYPE  
 (BOX & GRID DYNODES)  
 ex: R678  
 7896  
 R560  
 etc.

ก. โครงสร้างแบบ linear focused

ข. โครงสร้างแบบ Box

รูปที่ 2.13 เส้นกราฟแสดงผลการรบกวนของสนามแม่เหล็กต่อการทำงานของ PMT

2.2.5 ความสามารถในการแจกแจงพลังงานของหัววัดซินทิเลชัน

เนื่องจากการกำเนิดสัญญาณพัลส์ของหัววัดซินทิเลชันเป็นผลจากการสร้างสัญญาณพัลส์ทั้งจากซินทิเลเตอร์ และหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน ดังนั้น องค์ประกอบที่มีผลกระทบต่อความสามารถในการแจกแจงพลังงาน จึงเป็นผลรวมของตัวแปรต่อไปนี้

1. ความสามารถในการแปลงพลังงานเป็นประกายแสงของซินทิเลเตอร์
2. ความสามารถแจกแจงพลังงานในตัวซินทิเลเตอร์
3. ประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตแคโทด
4. ประสิทธิภาพในการเก็บโฟโตอิเล็กตรอนที่โคโนคตัวแรก
5. ความสามารถในการสร้างอิเล็กตรอนทุติยภูมิของโคโนค โดยเฉพาะโคโนคตัวแรก

จากผลกระทบดังกล่าวสามารถเขียนในรูปสมการความสามารถ ในการแจกแจงพลังงานได้เป็น

$$R^2 = R_s^2 + R_p^2 \dots\dots\dots 2.16$$

- เมื่อ
- R = ความสามารถในการแจกแจงพลังงานหัววัดซินทิเลชัน
  - $R_s$  = ความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึก
  - $R_p$  = ความสามารถในการแจกแจงพลังงานของหลอดทวีคูณอิเล็กตรอน

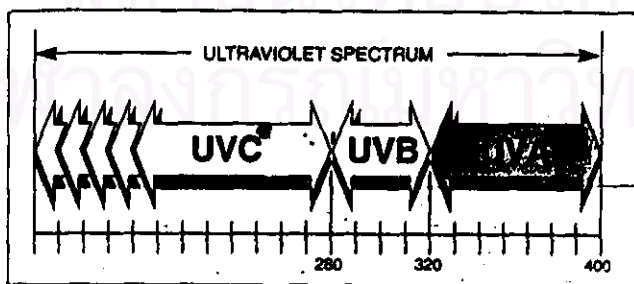
โดย  $R_p^2$  ในสมการ 2.16 ซึ่งเป็นความสามารถในการแจกแจงพลังงานของหลอดทวิคูณอิเล็กตรอนเป็นผลจากพารามิเตอร์ต่าง ๆ เขียนได้ตามสมการ ดังนี้ [2]

$$R_{p^2(e)} = \frac{(2.35)^2}{N \cdot QE \cdot \alpha} \times \frac{\delta}{\delta - 1} \dots\dots\dots 2.17$$

- เมื่อ  $N$  = ค่าเฉลี่ยของจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบแคโทด  
 $QE$  = ประสิทธิภาพควอนตัม  
 $\alpha$  = ค่าคงที่ของวัสดุและรูปทรงของไดโอด  
 $\delta$  = สัมประสิทธิ์ในการปล่อยอิเล็กตรอนของไดโอดแต่ละชุด

### 2.3 การส่งผ่านประกายแสงย่านรังสีเหนือม่วง

คลื่นแสงย่านรังสีเหนือม่วง (UV) ได้รับการแบ่งช่วงสเปกตรัมของคลื่นเป็น 3 ช่วงได้แก่ ย่าน UVA มีความยาวคลื่นประมาณ 315-400 nm ย่าน UVB มีความยาวคลื่นประมาณ 280-315 nm และ UVC มีความยาวคลื่นประมาณ 100-280 nm ตามมาตรฐาน CIE ดังแสดงในรูป 2.14 [1] และตารางที่ 2.3 ซึ่งจะเห็นว่าประกายแสงจากหลอดรังสีในรูป 2.10 จะอยู่ในช่วง 350-500nm. ซึ่งคร่อมอยู่ระหว่างช่วงคลื่น UVA และคลื่นแสงที่มองเห็น การส่งประกายแสงในย่านรังสีเหนือม่วงนี้จะต้องพิจารณาเรื่องการสูญเสียความเข้มแสงเป็นอย่างมาก โดยเลือกใช้วัสดุเฉพาะงานที่ไม่ดูดกลืนพลังงานย่านความยาวคลื่นช่วงนี้



The ultraviolet spectrum.

รูปที่ 2.14 แผนภาพสเปกตรัมแสงย่านรังสีเหนือม่วง

ตารางที่ 2.3 การแบ่งย่านช่วงคลื่นรังสีเหนือม่วง

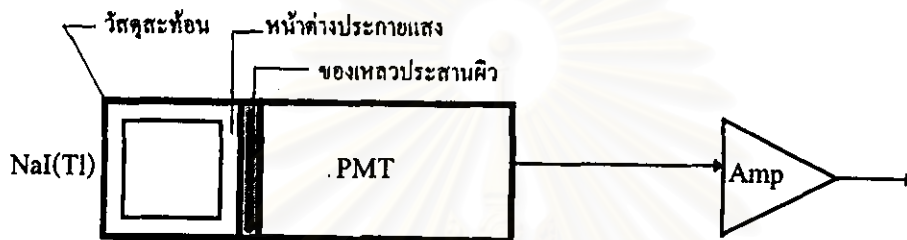
Various Boundaries for the Ultraviolet Spectrum

Definition	UVC	UVB	UVA
CIE	100 - 280 nm	280 - 315 nm	315 - 400 nm <sup>1</sup>
Traditional Versions	200 - 290 nm <280 nm	290 - 320 nm 280 - 320 nm	320 - 400 nm <sup>2</sup> 320 - 400 nm <sup>3</sup>

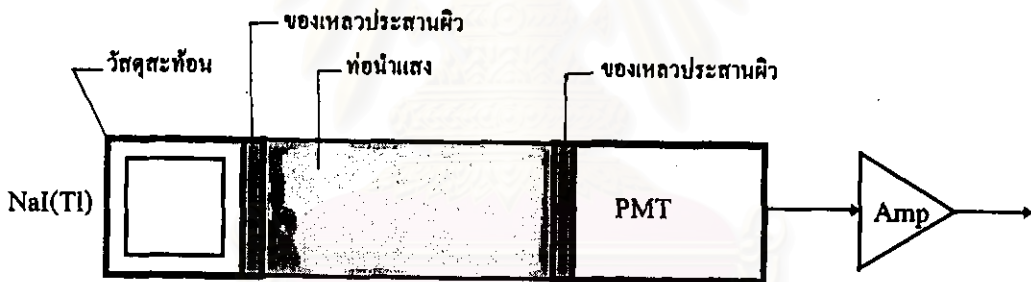
<sup>1</sup> International Lighting Vocabulary, CIE Publ. No. 17.4.

<sup>2</sup> UVA Biological Effects of Ultraviolet Radiation with Emphasis on Human Responses to Longwave Ultraviolet, Parrish et al. Plenum Press 1978.

<sup>3</sup> Influences of Atmospheric Conditions and Air Mass on the Ratio of Ultraviolet to Solar Radiation, Riordan, C et al. SERI/TP 215 3895. August 1990



ก. การส่งผ่านระยะใกล้



ข. การส่งผ่านระยะไกล

รูปที่ 2.15 แผนภาพการส่งผ่านประกายแสง

ในรูปที่ 2.15 แสดงการส่งประกายแสงจากผลึกวัดรังสีไปยังโฟโตแคโทดของหลอดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ให้ได้ประสิทธิภาพสูง มีการจัดใน 2 รูปแบบ คือการส่งผ่านระยะใกล้และระยะไกล ประกอบด้วยอุปกรณ์หลักดังนี้

ก. วัสดุสะท้อนประกายแสง (reflector) จากผลึกซึ่งทำด้วย  $Al_2O_3$  หรือ  $MgO$  ช่วยสะท้อนประกายแสงช่วงคลื่นรังสีเหนือม่วง

ข. ท่อนำแสง (light guide) ทำพลาสติกใสในกลุ่ม lucite, plexiglass, หรือ fused-silica หรือ quartz เป็นต้น เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ 4 ประการ คือ

1. เป็นตัวกลางในการจับยึดระหว่างผลึกวัดและผิวหน้าของหลอดทวิคูณอิเล็กตรอนที่มีรูปทรงหรือขนาดต่างกัน
2. เป็นตัวกลางในการนำทิศทางประกายแสงไปสู่ผิวหน้าโฟโตแคโทด
3. แยกหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน ให้ห่างจากบริเวณวัดรังสีที่มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูง
4. ลดความคลาดเคลื่อนของขนาดสัญญาณพัลส์

ก. ของเหลวประสานผิว (fluid coupling) เป็นสารเหลวหนืดสำหรับประสานผิวของท่อนำแสงและหลอดทวิคูณอิเล็กตรอน ช่วยลดการเสียดสีระหว่างบริเวณเชื่อมต่อทำด้วยซิลิโคน (silicone fluid)



รูปที่ 2.16 ท่อนำแสงชนิดต่างๆ

การส่งประกายแสงระยะไกล เพื่อหลีกเลี่ยงสิ่งรบกวนต่อหลอดทวิคูณอิเล็กตรอนในบริเวณซึ่งหัววัดซินทิลเลชันต้องทำงานในบริเวณที่มีสนามแม่เหล็กความเข้มสูง อุณหภูมิและการสั่นสะเทือนสูง ดังโครงสร้างในรูปที่ 2.15 ข. จำเป็นต้องใช้ท่อนำแสงที่มีความยาวหลายฟุต แต่ข้อจำกัดในการใช้ท่อนำแสงชนิดนี้คือ ความไม่อ่อนตัวของท่อนำแสง ปัจจุบันได้มีการผลิตท่อนำแสง

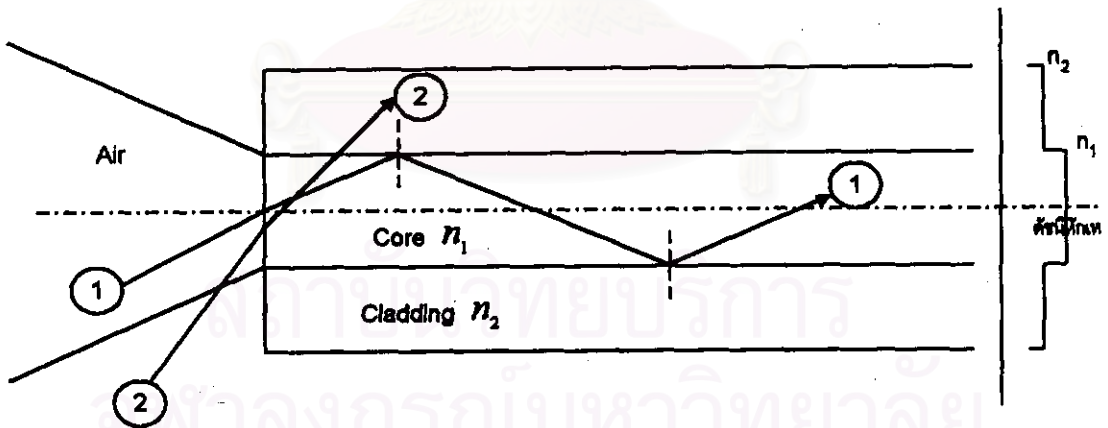


ในลักษณะของเส้นใยแสง ( optical fiber) ซึ่งมีความอ่อนตัวและมีวัสดุที่ใช้ทำแกนนำแสงในโครงสร้างให้เลื้อยต่างๆ กัน

2.4 อุปกรณ์ในการส่งผ่านแสง

2.4.1 เส้นใยแสง (optical fiber)

เส้นใยแสงนำคลื่นแสงได้ดี เนื่องจากหลักการของการสะท้อนกลับของแสงภายในทั้งหมด เมื่อพิจารณาการทำงานในเส้นใยดัชนี (step-index fiber) ดังรูปที่ 2.17 จะเห็นว่าโครงสร้างของเส้นใยแสงประกอบด้วย วัสดุกลางไดอิเล็กทริกที่ไม่มีการสูญเสียพลังงานแสง (lossless dielectrics) และปลอกห่อหุ้ม (cladding) โดยไดอิเล็กทริกจะต้องมีค่าดัชนีหักเหของแสงสม่ำเสมอเท่ากับ  $n_1$  ซึ่งมากกว่าดัชนีหักเหของปลอกห่อหุ้มคือ  $n_2$  ค่าความแตกต่างนี้จะเป็น  $\Delta = n_1 - n_2$  เส้นใยแสงที่ใช้งานจะมีความแตกต่างของดัชนีหักเหเพียงเล็กน้อย มีค่าตั้งแต่เศษส่วนพันถึงร้อย เมื่อแสงที่ตกกระทบบนที่ปลายของเส้นใยแสงตกกระทบบได้มุมพอดีกับแนวแกนของเส้นใยแสง จะเกิดการสะท้อนกลับหมดภายใน และจะสะท้อนซิกแซกต่อเนื่องโดยพลังงานแสงไม่เกิดการสูญเสียมากนัก เช่น ถ้าแสงหมายเลข 1 ขณะที่ถ้าแสงหมายเลข 2 ทำมุมมากไปจะทำให้เกิดการหักเหออกจากแกนและถูกปลอกห่อหุ้มดูดกลืนพลังงานหมด



รูปที่ 2.17 โครงสร้างพื้นฐานของเส้นใยดัชนีหักเหของแสง

ค่าความแตกต่างของดัชนีหักเหเป็นร้อยละ หาได้จาก

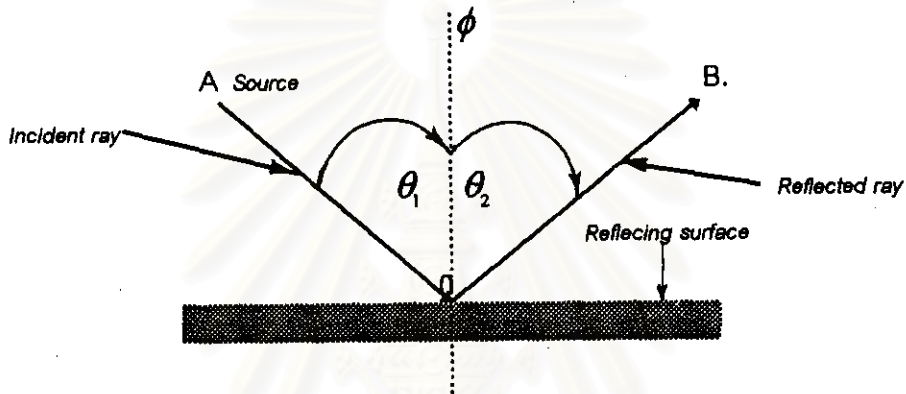
$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n} \times 100\% \dots\dots\dots 2.18$$

2.4.1.1 กฎของสเนลล์ (Snell's Law)

การวิเคราะห์คุณสมบัติของเส้นใยแสงจะอาศัยทฤษฎีการสะท้อนกลับหมด (total reflection) ที่ผิวขอบของสารไดอิเล็กทริกสองชนิด ตามกฎของสเนลล์ (Snell's Law) ดังนี้ [7]

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots 2.19$$

โดย  $n_1$  และ  $n_2$  เป็นค่าดัชนีหักเหของตัวกลางที่ 1 และ 2 จากรูป 2.18 ถ้า  $\theta_2 = 90^\circ$  จะเท่ากับไม่มีคลื่นหักเหเข้าสู่ตัวกลางที่ 2 กล่าวคือ คลื่นแสงที่เข้ามาที่ผิวขอบจะสะท้อนกลับออกไปหมด



- เมื่อ  $\theta_1$  = มุมของคลื่นตกกระทบ
- $\theta_2$  = มุมของคลื่นสะท้อน
- $\phi$  = แกนตั้งฉากกับพื้นผิว

รูปที่ 2.18 การสะท้อนและการหักเหของแสงที่พื้นผิวตามกฎของสเนลล์

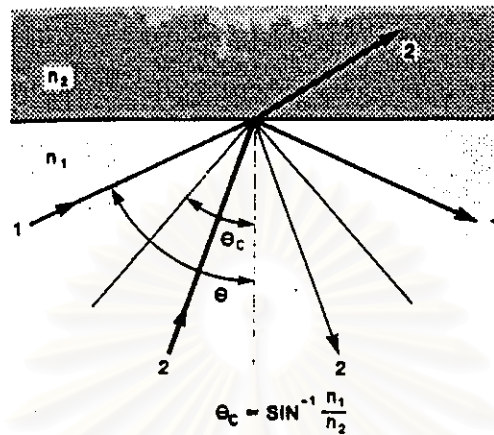
ถ้ากำหนดให้  $\theta_c$  เป็นมุมวิกฤต (critical angle) ที่ทำให้คลื่นแสงเริ่มสะท้อนกลับหมดจากสมการที่ 2.19 จะได้ว่า

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots 2.20$$

เมื่อพิจารณา  $\sin \theta_c$  จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ ดังนั้น  $n_1$  จะมีค่ามากกว่า  $n_2$  เสมอ จึงสรุปได้ว่า การที่จะเกิดการสะท้อนกลับหมดได้จะต้องมีเงื่อนไข 2 ประการ คือ

1.  $n_1 > n_2$
2. มุมตกกระทบจะต้องเท่ากับหรือใหญ่กว่ามุมวิกฤตหรือ

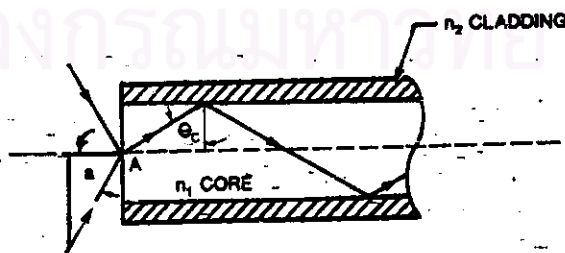
$$\theta_1 \geq \theta_c = \sin^{-1} \frac{n_2}{n_1} \dots\dots\dots 2.21$$



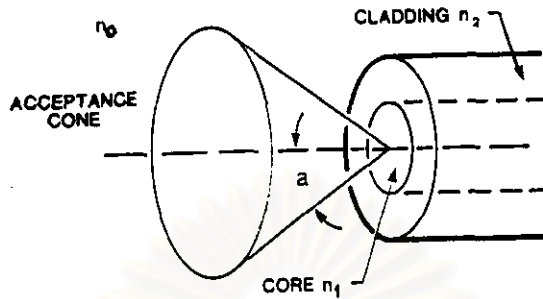
รูปที่ 2.19 แผนภาพแสดงการสะท้อนของแสงเมื่อรังสีที่ 1 ตกกระทบ  $\geq \theta_c$  และรังสีที่ 2 ตกกระทบ  $\leq \theta_c$

เส้นใยแสงที่ใช้งานนั้น ทั้งท่อนำแสง(core) และส่วนห่อหุ้ม (cladding) จึงมีส่วนสำคัญที่เป็นตัวสร้างดัชนีหักเหของแสงทั้ง  $n_1$  และ  $n_2$  ตามลำดับให้เกิดภาวะการสะท้อนกลับหมดภายใน และที่สำคัญท่อนำแสงจะต้องเป็นทางผ่านแสงได้ดี โดยมีอัตราการสูญเสียปริมาณแสงต่ำ จึงจะสามารถส่งแสงได้ในระยะทางไกล ส่วนมากจะทำจากแก้วบริสุทธิ์หรือฟิวส์-ซิลิกา (fused silica)

ในรูปที่ 2.20 ก. แสดงหลักการเดินทางของแสงในท่อนำแสงในภาพตัดขวางของรูปทรงกระบอก ทำให้เห็นดัชนีหักเหของแสงที่สะท้อนจากท่อนำแสงและส่วนห่อหุ้มที่มีมุมวิกฤติ  $\theta_c$  และเกิดการสะท้อนของแสงภายในท่อนำแสงอย่างต่อเนื่อง



(ก) ท่อนำแสงกับดัชนีหักเหของแสงที่สะท้อนจาก ท่อนำแสง และ ส่วนห่อหุ้ม



(ข) เมื่อแสงถูกบีมเข้าที่หน้าแสงในลักษณะรูปทรงกรวย

รูปที่ 2.20 ภาพตัดขวางของลำแสงในหน้าแสงและการบีมลำแสงเข้าที่หน้าแสงตามกฎของสเนลล์

ในรูปที่ 2.20 ข. เมื่อแสงถูกควบคุมให้เป็นลำแคบ (beam) เข้าปลายหน้าแสงในลักษณะรูปทรงกรวย จนทำให้เกิดการสะท้อนที่แกนและปลอกหุ้ม มุมรับแสงที่ตกกระทบปลายเส้นใยนี้หาได้จาก [7]

$$\sin a = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots\dots\dots 2.24$$

โดยมุมบีมรูปกรวยคือ  $\sin a$  และ  $n_0$  โดยทั่วไป  $\approx 1$

ซึ่งมุมรับแสงนี้ใช้เป็นค่าวัดความสามารถในการรวมแสงของเส้นใยเรียกว่า “numerical aperture (N.A.)”

ถ้าให้  $n_0 = 1$  ดังนั้น

$$\text{N.A.} = \sin a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \dots\dots\dots 2.25$$

ตารางที่ 2.4 แสดงความแตกต่างของค่า N.A. เมื่อเส้นใยแสงมีวัสดุที่ใช้ทำแกนนำแสง และวัสดุห่อหุ้มต่างกัน [6]

ตาราง 2.4 แสดงชนิดของสารที่ทำ core,cladding และค่า N.A.

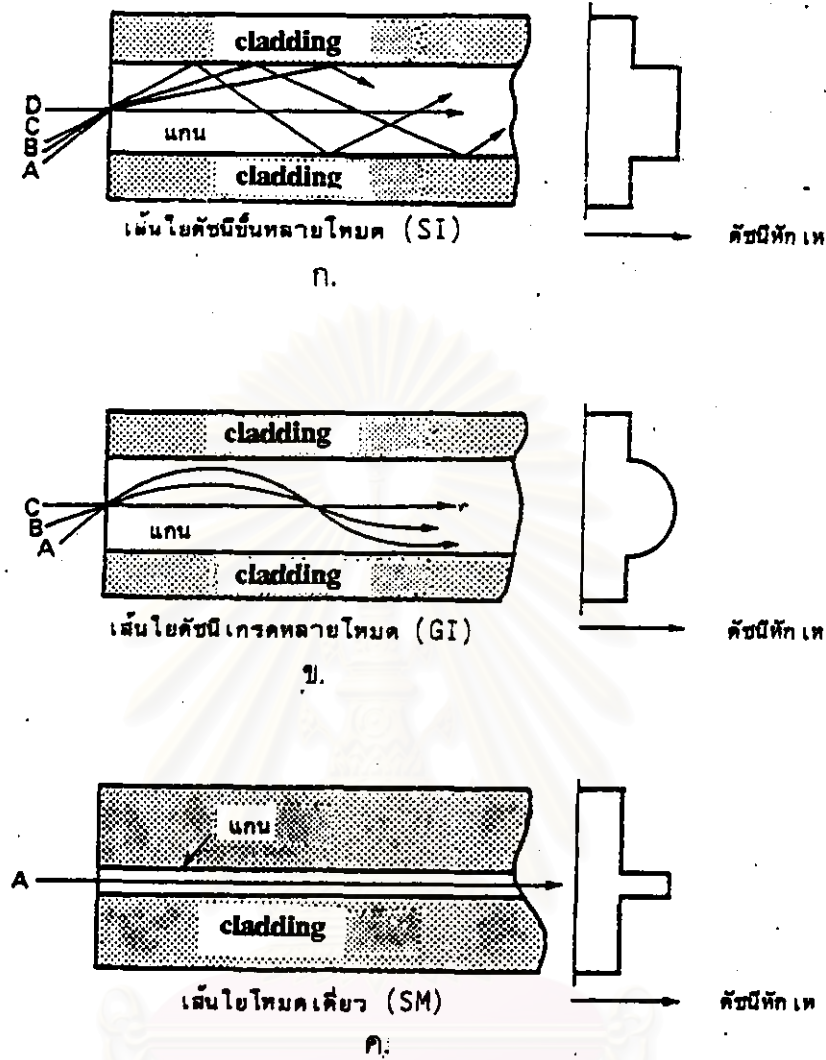
Core	Cladding	NA	F/#	Acceptance Cone Angle 2 $\alpha$ deg (rad)
Silica	Plastic	0.27	1.9	31 (0.55)
Silica	Silica	0.22	2.3	25 (0.44)
Liquid	Plastic	0.47	1.1	56 (0.98)
Glass	Glass	0.56	0.9	68 (1.2)

#### 2.4.1.2 การแยกประเภทตามโหมดของเส้นใยแสง (propagation mode)

เส้นใยแสงสามารถแยกประเภทได้ตามโหมดการกระจายคลื่นแสงได้ดังนี้ [7]

1. เส้นใยหลายโหมด (multimode fiber) แบ่งออกเป็น
  - เส้นใยดัชนีชั้นหลายโหมด (multimode step index(SI) fiber)
  - เส้นใยดัชนีเกรดหลายโหมด(multimode graded index(GI) fiber)
2. เส้นใยโหมดเดี่ยว (single mode fiber)

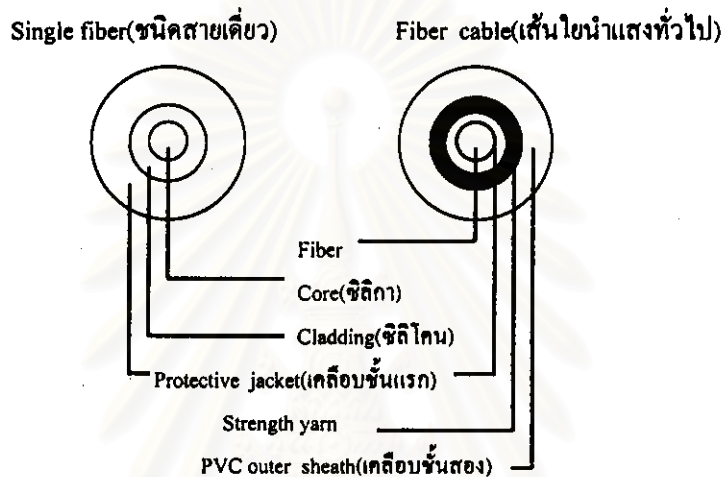
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.21 ลักษณะ "mode" ของเส้นใยแสง

จากรูป 2.21 ก.และข. จะเห็นได้ว่าลำแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงหลายโหมดจะมีหลายลำแสงสะท้อนไปมาภายในแกน และออกจากเส้นใยแสงหลายลำแสง หรือมีหลายโหมดในเส้นใยแสง ส่วนลำแสงที่เดินทางในเส้นใยแสงโหมดเดียวในรูปที่ 2.21ค. จะออกจากเส้นใยแสงแบบลำแสงเดียว หรือมีโหมดเดียวเท่านั้น ในเส้นใยดัชนีหักเหเกรด ดัชนีหักเหของแกนจะค่อย ๆ ลดลงจากศูนย์กลางไปยังรอยต่อระหว่างแกนและส่วนหุ้ม cladding และจำนวนของโหมดนำ (guided mode) ในเส้นใยจะเป็นสัดส่วนกับหน้าตัดของแกน (core cross section) รวมทั้งค่าความแตกต่างของดัชนีหักเห  $n\Delta$  ระหว่างแกนและส่วนหุ้ม ดังนั้น ถ้าลดหน้าตัดของแกนมากพอ เส้นใยจะสามารถนำแสงเพียงโหมดเดียวเท่านั้น

โครงสร้างของเส้นใยแสงดัชนีเกรดหลายโหมด (GI fiber) ประกอบด้วยแกนที่ทำจากซิลิกาโดป (doped silica core) ที่มีขนาด  $50\ \mu\text{m}$  และ cladding ที่ทำจากซิลิกาการรวมกันเป็นเส้นใยแสงที่มีขนาด  $125\ \mu\text{m}$  เคลือบชั้นแรก (primary coating) ที่ทำจากซิลิโคนตัดแปลงหุ้ม (cushion) ทำจากซิลิโคน และเคลือบชั้นที่สอง (secondary coating) ที่ทำจากไนลอน [8]



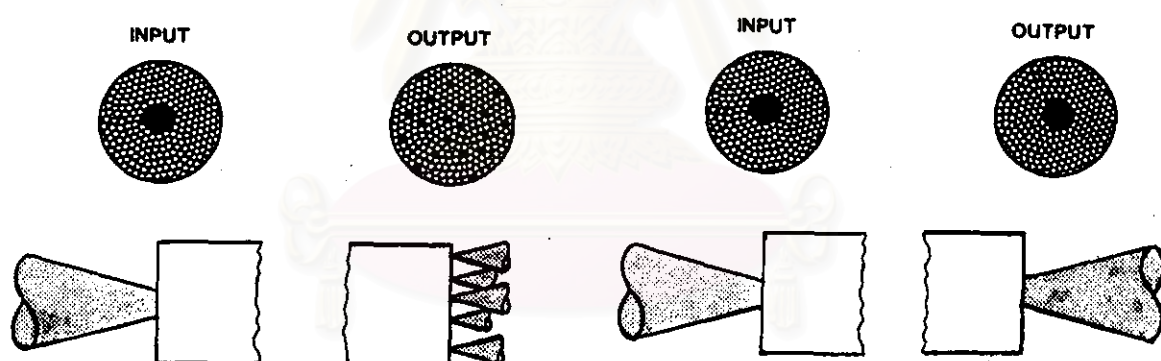
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของเส้นใยแสงดัชนีหลายโหมด

#### 2.4.1.3 การดูดกลืนพลังงานแสง

เนื่องจากเส้นใยแสงที่ใช้ในการนำลำแสง ส่วนมากจะทำจากแก้วหรือพลาสติกบริสุทธิ์ อย่างไรก็ตามยังคงมีอะตอมของสารเจือปน (impurity) หดงเหลืออยู่ ดังนั้นขณะที่คลื่นแสงเคลื่อนที่ผ่านจะทำให้เกิดการสูญเสียของพลังงานแสงของลำแสงในรูปพลังงานความร้อน กลไกการสูญเสียพลังงานนี้จะทำให้ความเข้มแสงตกลงเรียกว่า การดูดกลืนแสงของสาร (material absorption) การดูดกลืนพลังงานในย่านแสงที่เห็นได้ (visible) และแสงใกล้อินฟราเรด (near infrared) ของสเปกตรัมจนถึง  $1.1\ \mu\text{m}$  ไมโครเมตร จะน้อยมาก นอกจากการสูญเสียที่เกิดจากการดูดกลืนของสารแล้ว เส้นใยแสงยังมีการสูญเสียที่เกิดจากการแปลงพลังงานเชิงเส้น (ตามสัดส่วนของพลังงาน) บางส่วนจากโหมดหนึ่งของเส้นใยแสงไปยังอีกโหมดหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า "การสูญเสียจากการสะท้อนเชิงเส้น (linear scattering)" ในการแปลงพลังงานนี้จะไม่เปลี่ยนความถี่ แต่ในภาวะที่ความเข้มแสงของสนาม (field intensity) ของเส้นใยแสงสูงมาก จะเกิดการแปลงพลังงานจากโหมดหนึ่งไปหาโหมดตัวมันเอง หรือโหมดอื่นในทิศทางไปข้างหน้าหรือถอยหลัง ในลักษณะนี้จะมีผลต่อการ

เปลี่ยนความถี่ด้วย เรียกว่า “การสูญเสียที่เกิดจากการสะท้อนไม่เป็นเชิงเส้น (nonlinear scattering)” สำหรับกระจายคลื่นแสงในเส้นใยแสง ขณะที่คลื่นพัลส์เดินทางไปตามเส้นใยแสงพัลส์แต่ละตัวจะขยายตัวกว้างออก (broadening) และทับกับพัลส์ที่อยู่ใกล้เคียง ทำให้เพิ่มจำนวนความผิดพลาดที่ขาออกของด้านรับ คุณสมบัติของการกระจาย (dispersion) ของเส้นใยแสง ทำให้เกิดปรากฏการณ์นี้ และเป็นข้อจำกัดของความจุในการส่งสัญญาณในเส้นใยแสงด้วยกลไก 3 ชนิด ที่ทำให้เกิดการขยายตัวของพัลส์ (pulse broadening) ในเส้นใยแสงได้แก่ การกระจายของแสงในสาร (material dispersion) การกระจายของแสงในท่อนำคลื่น (waveguide dispersion) และการกระจายของโหมด (modal dispersion) อย่างไรก็ตามการกระจายของแสงในท่อนำคลื่นจะไม่มีผลกระทบมากนักต่อความผิดพลาด

เนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของเส้นใยนำแสงจะมีขนาดเล็กมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิด โหมดเดี่ยว (single mode) จะมีเส้นผ่าศูนย์กลางเป็นไมโครเมตร หรือ ไมคอน ในบางครั้งจึงมีความจำเป็นที่จะต้องใช้เส้นใยแสงหลาย ๆ เส้นนำมามัดรวมกัน (bundles) เพื่อให้การส่งผ่านของแสงได้ประสิทธิภาพมากขึ้นเหมาะสำหรับการใช้งานในบางกรณี



ก.แบบไม่เป็นระเบียบ

ข.แบบเป็นระเบียบ

รูปที่ 2.23 แสดงการส่งคลื่นแสงผ่านเส้นใยแสงแบบมัด (bundles)

สำหรับขนาดมาตรฐานของเส้นใยนำแสงชนิด fused silica bundles [8] โดยทั่วไปแล้วจะมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 250 ไมโครเมตร/เส้น ส่วนเส้นใยแสงที่เป็นชนิด glass high grade fused silica bundles จะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเล็กกว่าคือ ประมาณ 100 ไมโครเมตร/เส้น สำหรับความหนาของ ปลอกห่อหุ้ม โดยทั่วไปจะมีขนาด 9 ไมโครเมตร การที่จะนำเส้นใยแสงมาทำเป็นมัด (bundles) ที่ใช้กันจะใช้ประมาณ 50 - 500 เส้น นำมัดรวมกัน ซึ่งแล้วแต่การใช้งาน เมื่อมัดรวมกันแล้วจะต้องหุ้มด้วยโลหะที่ไม่เป็นสนิม เช่น เหล็กไร้สนิม (stainless steel) เพื่อเสริมความแข็งแรงให้



กับสาย อีกทั้งเป็นการป้องกันอันตรายจาก น้ำ ความชื้น การสะท้อน อุณหภูมิ และแรงดึง เมื่อนำไปใช้งานในภาคสนาม

ความสามารถในการส่งผ่านแสงของเส้นใยแสงชนิด ทดสอบได้ภายใต้เงื่อนไขของ คุณสมบัติของเส้นใยแสงแต่ละชนิด ด้วยการคำนวณมุมของแสงที่เดินทางผ่านเส้นใยแสงแล้วเกิด การสะท้อนระหว่างท่อนำแสงและส่วนท่อนุ่ม ที่เป็นปลายปิด แล้วให้แสงสะท้อนกลับหมด และหาค่าต่าง ๆ โดยคำนวณเทียบกับความยาวตัวอย่าง ของเส้นใยแสง แล้วหาค่าออกมาเป็นค่าการ สูญเสียได้ ซึ่งค่าการสูญเสียจะคิดรวมถึงค่าการดูดกลืนของวัสดุที่ใช้สร้างเส้นใยแสง การกระเจิง (scattered) ซึ่งล้วนแล้วแต่เป็นค่าที่ทำให้เกิดการสูญเสียทั้งสิ้น

อัตราการลดลงเนื่องจากความยาวของสาย และกำลังของแสงซึ่งความยาวคลื่นไม่คงที่จะมี ความสัมพันธ์กันตามสมการ [8]

$$T = P(1-R)^2 e^{-\alpha L} \dots\dots\dots 2.26$$

- เมื่อ
- P = สัดส่วนการสูญเสียของแสง (packing fraction)
  - R = การสูญเสียจากการสะท้อน (reflection loss)
  - $\alpha$  = สัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient)
  - L = ความยาวเฉลี่ยของแสงที่ผ่านเข้าไปในสาย

#### 2.4.1.4 ชนิดของเส้นใยแสง (types of fiber optics) [6]

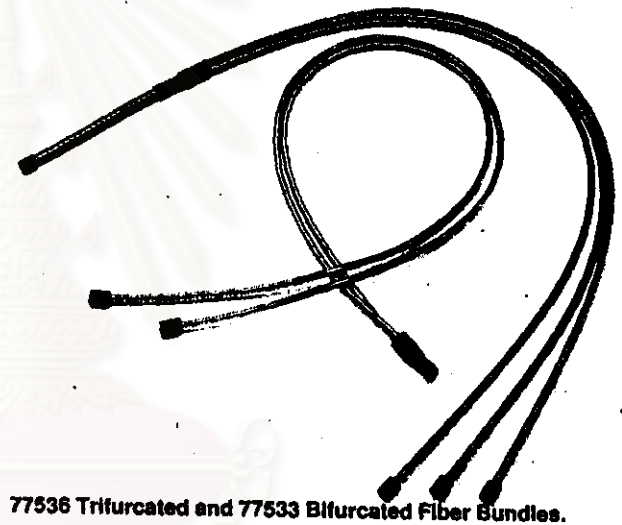
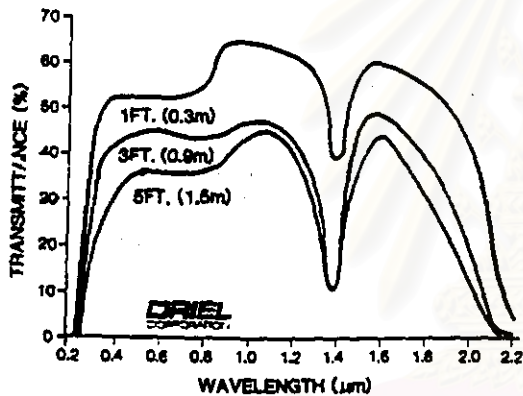
โดยทั่วไปเส้นใยแสงถูกแบ่งออกเป็น 3 ชนิดหลัก ๆ ดังนี้

1. เส้นใยแสงชนิดมัด Random หรือ Incoherent Fiber Bundles
2. เส้นใยแสงชนิดของเหลว Liquid Light Guides
3. เส้นใยแสงชนิดเส้นเดี่ยว Single Fiber

##### ก. เส้นใยแสงชนิด Random หรือ Incoherent Fiber Bundles

จากการค้นคว้าวิจัยพบว่า แก้วบริสุทธิ์ ผลึกซิลิกาและซิลิกาเกรดสูง เป็นวัสดุที่เหมาะสมที่สุดในการนำมาผลิตเป็นเส้นใยแสง เนื่องจากมีมุมดัชนีหักเหของแสงของ สารดังกล่าวมีค่าระหว่าง  $68^\circ$  จึงทำให้ตอบสนองที่ดีสำหรับคลื่นแสงย่านที่ตามองเห็น (VIS)

อินฟราเรด(IR) และอุลตราไวโอเลต(UV) โครงสร้างของเส้นใยแสงชนิดนี้จะเป็นการนำเส้นใยแสงหลายๆ เส้นนำมามัดรวมกันในท่อเดียวกันจึงทำให้มีขนาดพื้นที่หน้าตัดโต หรือ ทางสำหรับลำแสงเข้าเส้นเคียวแล้วแยก (split) ที่ทางออกเป็นหลายเส้นหรือรับแหล่งกำเนิดแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันหลายแหล่งมาตรวจวัดที่อุปกรณ์วัดเดียวกัน ความยาวคลื่นที่ส่งผ่านแสงได้ดีตั้งแต่ 270 - 1350 nm และ 1500 - 1900 nm ขึ้นกับความยาวของสาย เส้นใยแสงชนิดนี้จะใช้สารจำพวกซิลิโคน โพลีเมอร์มาผลิตเป็นปลอกห่อหุ้ม มีค่า N.A. 0.22 (ซิลิกาเกรดสูง) และ 0.56 (แก้วบริสุทธิ์) ความยาวมาตรฐาน 1 ฟุต 3 ฟุต และ 5 ฟุต ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3.2 4.5 และ 5mm [8]

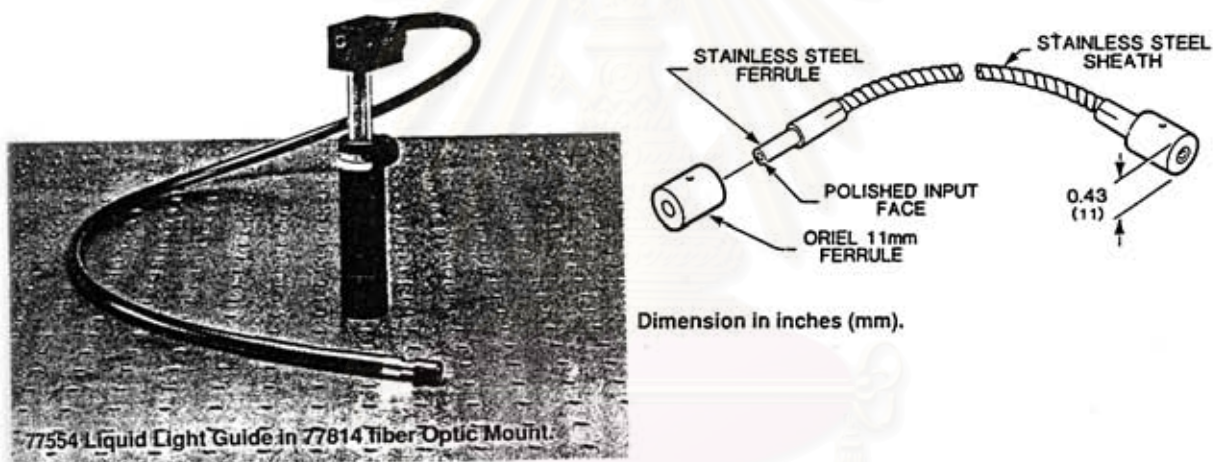


77536 Trifurcated end 77533 Bifurcated Fiber Bundles.

รูปที่ 2.24 แสดงภาพและเส้นกราฟการตอบสนองคลื่นของเส้นใยแสงชนิด Random หรือ Incoherent fiber bundles

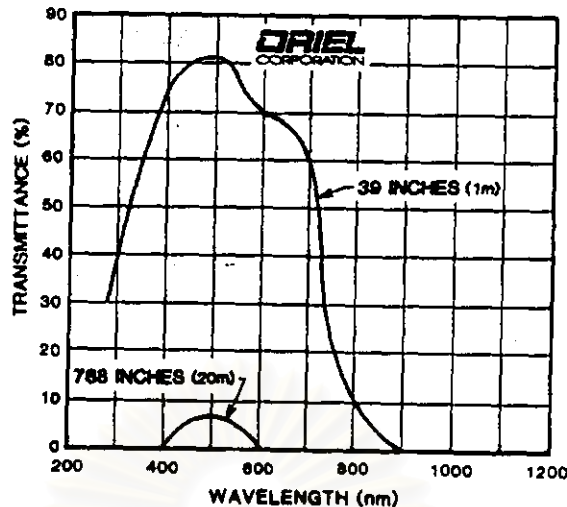
## ข. เส้นใยแสงชนิด Liquid Light Guide

เส้นใยแสงชนิดนี้ออกแบบให้มีคุณสมบัติใช้งานสำหรับแสงย่านอุลตราไวโอเล็ต และอินฟราเรดได้ประสิทธิภาพสูงสุด อัตราการสูญเสียต่ำ มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางโคเพื่อใช้งานได้ในเส้นเดียวไม่ต้องมัดรวมกัน สามารถส่งผ่านประกายแสงได้ตั้งแต่ 270 - 720 nm ได้ดี โครงสร้างของตัวสายภายในเป็นท่อพลาสติกบรรจุสลิคสารเหลวใสบริสุทธิ์ ที่ไม่เป็นอันตรายต่อร่างกายและราคาถูกกว่าเส้นใยแสงชนิดฟิวส์-ซิลิกามาก[8] สำหรับปลายสายทั้ง 2 ข้างจะปิดด้วยแก้วซิลิกาแล้วหุ้มด้วยโลหะกันสนิมประเภทสแตนเลสเพื่อเป็นหน้าตาต่างรับ-ส่งประกายแสง ส่วนตัวสายที่บรรจุสลิคสารเหลวจะหุ้มด้วยพลาสติกเพื่อให้โค้งงอได้สะดวกชั้นนอกถัดมาจะเป็นอลูมิเนียมและชั้นนอกสุดจะเป็น PVC อุณหภูมิใช้งานควรอยู่ประมาณ  $60^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 2.25 โครงสร้างของ Liquid light guide

ขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลางของสาย คือ 3-5 mm เป็นมาตรฐาน และแบบพิเศษจะมีขนาด 8 mm มุมสะท้อนของแสงจะอยู่ประมาณ  $56^{\circ}$  ค่า Numerical Aperture (N.A.) = 0.47 สำหรับความยาวของสายเป็นมาตรฐานมีขนาด 1 เมตร 1.5 เมตร และ 2 เมตร ดังนั้น การใช้งานย่าน UV หรือ NIR ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 270 - 450 nm



รูปที่ 2.26 เส้นกราฟการส่งผ่านประกายแสงชนิด Liquid light guide

ก. เส้นใยแสงชนิดสายเดี่ยว (Single fiber)

เส้นใยแสงที่ใช้งานทั่วไปชนิดสายเดี่ยวจะถูกแบ่งตามดัชนีการหักเหของการนำแสงออกเป็น 2 แบบ โดยพิจารณาจากการสะท้อนของแสงภายในเส้นใยแสง เรียกว่า โหมด (mode) แบบแรกเรียกว่า แบบหลายโหมด (multimode) มีดัชนีหักเหเป็นแบบขั้น (step index) และแบบเกรด (graded index) และแบบที่สองเรียกว่า โหมดเดี่ยว (single mode) โดยทั้ง 2 แบบจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของแกนนำแสงแตกต่างกัน คือ แบบหลายโหมดจะมีขนาดแกนตั้งแต่ 200  $\mu\text{m}$  ถึง 1 mm ส่วนแบบโหมดเดี่ยวจะมีแกนเล็กมากคือ ประมาณ 5  $\mu\text{m}$  ถึง 10  $\mu\text{m}$  ซึ่งปัจจุบันแบบโหมดเดี่ยวเป็นที่นิยมใช้สำหรับงานด้านสื่อสาร เส้นใยแสงชนิดนี้ออกแบบไว้เพื่อการส่งแสงย่านอินฟราเรดได้ดี จึงสามารถส่งได้ระยะทางไกล ๆ เช่นการสื่อสารข้อมูลในระบบดิจิทัล การเชื่อมโยงโครงข่ายท้องถิ่น (LAN) ระบบเคเบิลใต้น้ำ (submarine) ซึ่งสามารถเชื่อมโยงได้ภายในประเทศและติดต่อออกต่างประเทศ นอกจากนี้ยังมีการออกแบบเส้นใยแสงแบบหลายโหมด สำหรับใช้งานย่านอุลตราไวโอเล็ต ดังรายละเอียดในภาพผนวก ข.



รูปที่ 2.27 โครงสร้างของเส้นใยแสงชนิดสายเดี่ยว (single fiber)

2.4.2 เลนส์ (Lenses)

เลนส์คือตัวกลางโปร่งใสที่มีผิวสองด้าน ซึ่งอย่างน้อยด้านหนึ่งเป็นพื้นผิวโค้งเว้าหรือนูน พื้นผิวโค้งนี้อาจเป็นพื้นผิวทรงกลมทรงกระบอกหรือทรงพาราโบล่าเป็นอุปกรณ์ในการรวมแสงหรือกระจายแสงเข้าสู่บริเวณไวแสงของอุปกรณ์ส่งผ่านแสง

2.4.2.1 ชนิดของเลนส์ 2 ชนิดหลัก

ก. เลนส์นูน (convex) หรือเลนส์รวมแสงหรือเลนส์บวก คือ เลนส์ที่มีความหนาตรงกลางมากกว่าที่ขอบ และทำหน้าที่รวมแสงขนาดให้หักเหไปผ่านจุดโฟกัสจริง

ข. เลนส์เว้า (concave) หรือเลนส์ถ่างแสงหรือเลนส์ลบ คือ เลนส์ที่มีความหนาตรงกลางน้อยกว่าที่ขอบ และทำหน้าที่ถ่างแสงขนาดให้หักเหไปผ่านจุดโฟกัสเสมือน



รูปที่ 2.28 ระยะโฟกัสของเลนส์นูนและเลนส์เว้า

จุดโฟกัสของเลนส์ คือจุด F ซึ่งเป็นจุดที่รังสีขนานและใกล้กับแกน x จะหักเหผ่านเสมอ จุดโฟกัสของเลนส์นูนเป็นจุดจริง ส่วนเลนส์เว้าเป็นจุดเสมือน ทางยาวโฟกัส คือระยะจากโฟกัส (F) ถึงกลางเลนส์ สมการของเลนส์ ขึ้นอยู่กับระยะวัตถุระยะภาพ และทางยาวโฟกัสของเลนส์นูน และเลนส์เว้ามีความสัมพันธ์กันดังนี้ [10]

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{S'} - \frac{1}{f} \dots\dots\dots(2.27)$$

- เมื่อ  $S$  = ระยะวัตถุจากเลนส์
- $S'$  = ระยะภาพจากเลนส์
- $f$  = ทางยาวโฟกัสของเลนส์
- ดังนั้น  $S$  เป็นบวกเมื่อวัตถุจริง และเป็นลบเมื่อเป็นวัตถุเสมือน
- $S'$  เป็นบวกเมื่อเป็นภาพจริง และเป็นลบเมื่อเป็นภาพเสมือน
- $f$  เป็นบวกเมื่อเป็นเลนส์นูน และเป็นลบเมื่อเป็นเลนส์เว้า

กำลังขยายของเลนส์

$$\text{linear magnification} = \frac{\text{ขนาดภาพ}}{\text{ขนาดวัตถุ}} = \frac{\text{ระยะภาพ}}{\text{ระยะวัตถุ}} = \frac{S'}{S}$$

เลนส์นูนทำให้เกิดภาพจริงหัวกลับเมื่อวัตถุวางไว้นอกจุดโฟกัส แต่เมื่อวัตถุอยู่ระหว่างจุดโฟกัสกับเลนส์เว้า ทำให้เกิดภาพเสมือนหัวตั้งและมีขนาดภาพเล็กลง สมการของเลนส์คือ

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \dots\dots\dots 2.28$$

เมื่อ  $n$  = ดัชนีหักเหของวัสดุที่ทำเลนส์

$r_1, r_2$  = รัศมีความโค้งของผิวทั้ง 2 ข้างของเลนส์

สมการนี้เป็นจริงสำหรับเลนส์ทุกชนิด รัศมีความโค้งของผิวนูน ซึ่งนูนเข้าหาดัศกกลางที่ทีบน้อยกว่าให้ถือเป็นบวก และผิวเว้าซึ่งเว้าหนีศกกลางที่ทีบน้อยกว่าให้ถือเป็นลบ

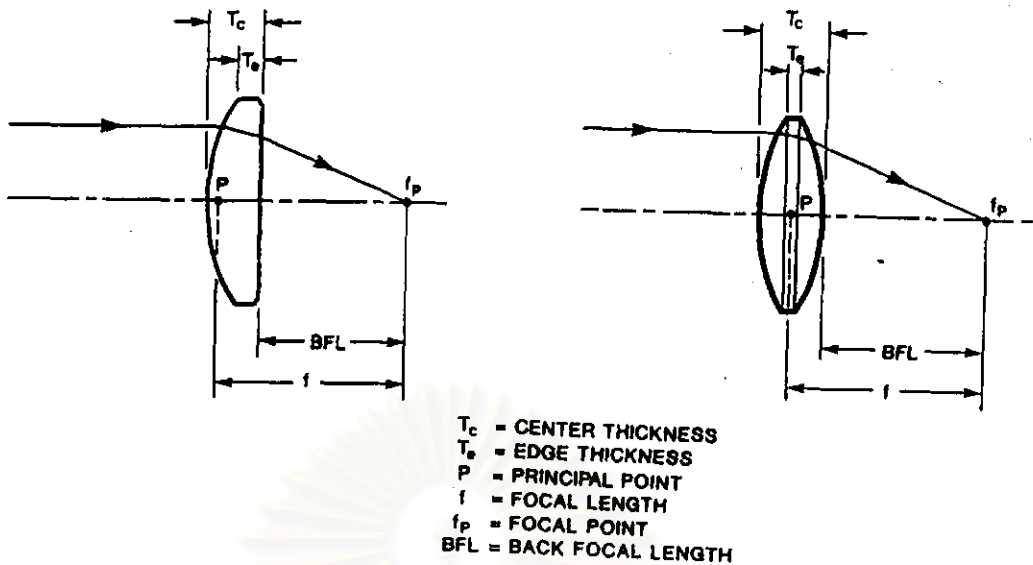
กำลังของเลนส์ (lens power เป็น diopters) =  $\frac{1}{\text{ทางยาวโฟกัสของเลนส์เป็นเมตร}}$

ถ้าเลนส์ 2 อันมาประกบกัน ซึ่งมีทางยาวโฟกัส  $f_1$  และ  $f_2$  วางประกบกันจะได้

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} \dots\dots\dots 2.30$$

#### 2.4.2 เลนส์นูนชนิดฟิวส์ซิลิกา (Convex Fused Silica Lenses) [6]

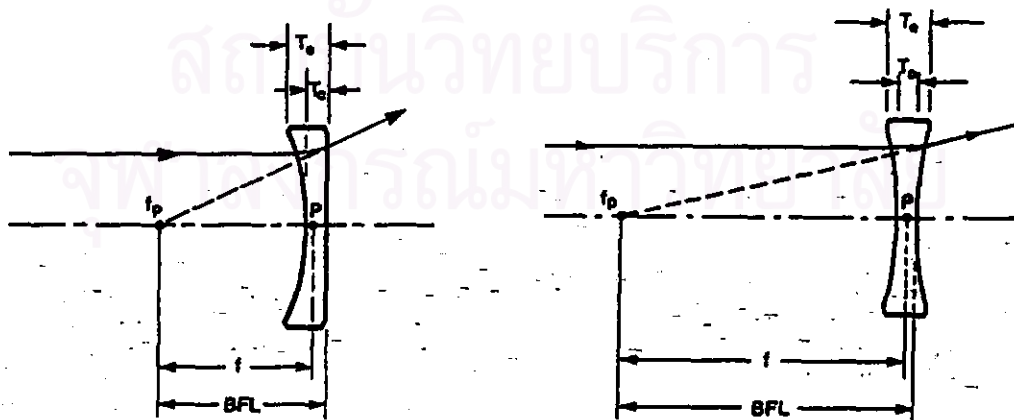
เนื่องจากคุณสมบัติของผลึกซิลิกาสามารถส่งผ่านแสงย่าน UV ได้ดี จึงนำมาใช้เป็นสารที่ใช้สร้างเลนส์มีชื่อทางการค้าว่า "Dynasil 1103 silica" นำมาหลอมขึ้นรูปเลนส์ให้สามารถในการส่งผ่านแสงที่ความยาวคลื่น 185-2700 nm ซิลิกาแบบเลนส์นูนด้านเดียวและ 2 ด้าน จะทำหน้าที่รวมแสงและได้ภาพจริง ซึ่งระยะโฟกัสขึ้นอยู่กับความหนาของเนื้อเลนส์ จึงควรเลือกให้เหมาะสมกับการใช้งาน ความบริสุทธิ์ของซิลิกาทำให้ได้แถบการส่งผ่านแสงที่กว้าง (broadband) ลดการกระเจิง ทำให้เกิดระยะจุดโฟกัสเป็นไปตามอัตราส่วน ระยะวัตถุ/ระยะภาพที่แม่นยำ



รูปที่ 2.29 เลนส์นูนแบบหน้าเดียว และ 2 หน้าชนิดฟิวส์ซิลิกา

#### 2.4.2.3 เลนส์เว้าแบบฟิวส์ซิลิกา (concave fused silica lenses) [6]

ผลิตจากไดนาซิล 1103 ซิลิกา เหมือนเลนส์นูนฟิวส์ซิลิกา จึงมีคุณสมบัติและอยู่บนมาตรฐานการส่งผ่านประกายแสงตั้งแต่ 185-2700 nm บริษัทผู้ผลิตได้ออกแบบให้มีทั้งชนิดเว้าหน้าเดียวและเว้าทั้ง 2 หน้า (plano-concave lenes) และ (bi-concave lenes) เลนส์ชนิดนี้จะทำหน้าที่ต่างตาแสง โดยมีระยะโฟกัสที่ต่างกันขึ้นอยู่กับความหนาและความเว้าของผิวเลนส์ เพื่อให้เหมาะสมกับการเลือกใช้งาน แต่ยังคงอัตราส่วนแสงออกต่อแสงเข้าระยะโฟกัส คือ  $F_{out}/F_{in}$  เพื่อเป็นการควบคุมลำบีมของแสงมักจะใช้ควบคู่กับเลนส์นูนตามระยะที่ต้องการ

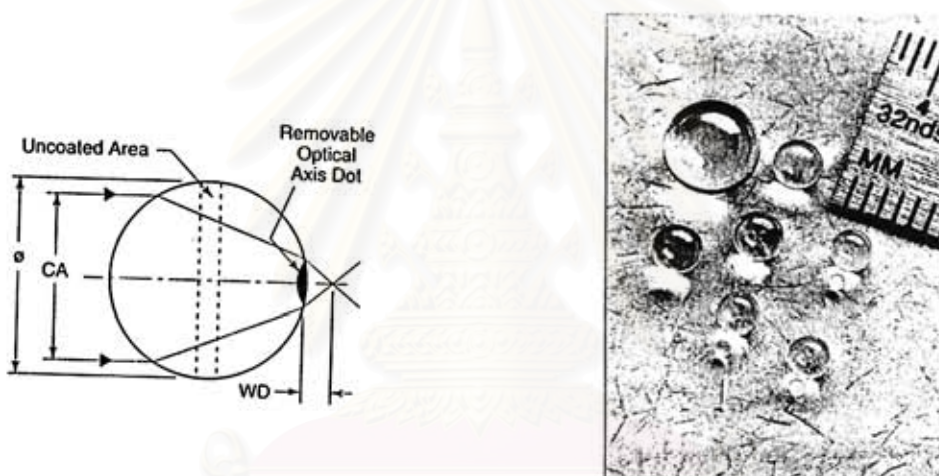


รูปที่ 2.30 เลนส์เว้าแบบหน้าเดียวและ 2 หน้า ชนิดฟิวส์ซิลิกา

#### 2.4.2.4 เลนส์ทรงกลม(Spherical ball micro lenses) [9]

เลนส์ทรงกลมถูกออกแบบเพื่อให้รับแสงได้รอบตัวและให้ระยะโฟกัสที่สั้น ตามขนาดของเส้นผ่าศูนย์กลาง ยิ่งเส้นผ่าศูนย์กลางมากระยะโฟกัสจะยาว แนวคิดนี้เพื่อใช้ในการส่งพลังงานแสงจากเลเซอร์สู่เส้นใยแสง และระหว่างเส้นใยแสงสู่เส้นใยแสงด้วยกัน หรือ เส้นใยแสงสู่ detector ผิวของเลนส์จะเคลือบ (coated) ป้องกันการสะท้อนของแสงด้วยสาร MgF<sub>2</sub> single-layer สำหรับตัวเลนส์ผลิตจาก LaSF Ng, เกรด A

เลนส์ชนิดนี้ออกแบบสำหรับการใช้งานย่านอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่น 600 - 1550 nm จึงเหมาะสำหรับใช้ในงานด้านระบบสื่อสารข้อมูลกับเส้นใยแสงแบบ Single fiber



รูปที่ 2.31 เลนส์ทรงกลม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย