

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 หลักการทฤษฎี

2.1.1 ปฏิกิริยาการเรืองแสง

ปฏิกิริยาการเรืองแสงในฉนวนหรือสารกึ่งตัวนำจะเกิดขึ้นได้ก็ต่อเมื่อสารนั้นได้รับพลังงานจากภายนอกก่อน ในที่นี้ขอกล่าวถึงพลังงานจากรังสี ซึ่งถูกดูดกลืนบางส่วนและบางส่วนถูกปล่อยออกมาด้วยความยาวคลื่น มากกว่าเดิม โดยการเรืองแสงนั้นจะเกิดขึ้นหลังจากการดูดกลืนพลังงานไปแล้วระยะเวลาหนึ่งเรียกเวลาดังกล่าวนี้ว่า Characteristic time (τ_c) ซึ่งใช้เป็นเงื่อนไขในการจัดแบ่งปฏิกิริยาการเรืองแสงออกเป็นชนิดต่างๆ ดังต่อไปนี้คือถ้า $\tau_c < 10^{-8}$ วินาที เรียกปฏิกิริยาการเรืองแสงที่เกิดขึ้นนี้ว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) โดยปฏิกิริยาการเรืองแสงนี้จะเกิดขึ้นขณะที่มีพลังงานจากภายนอกมากระตุ้นเท่านั้น กล่าวคือเมื่อมีการกระตุ้นก็จะเกิดการเรืองแสงทันทีและเมื่อหยุดการกระตุ้นก็จะหยุดการเรืองแสงทันทีแต่ถ้า $\tau_c > 10^{-8}$ วินาที เรียกปฏิกิริยาการเรืองแสงนี้ว่า ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) ซึ่งเมื่อได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอกจะค่อยๆ เกิดการเรืองแสงก่อนที่จะถึงช่วงที่มีการเรืองแสงมากที่สุดเมื่อสิ้นสุดการกระตุ้นก็ยังคงมีแสงออกมาและลดลงแบบเอกซ์โปเนนเชียล (exponential) นอกจากนี้ ปฏิกิริยาการเรืองแสง ฟอสฟอเรสเซนซ์ ยังสามารถแบ่งย่อยออกเป็น 2 ชนิดด้วยกัน คือ short-period ซึ่งมีค่า $\tau_c < 10^{-4}$ วินาที และ long-period จะมีค่า $\tau_c > 10^{-4}$ วินาที สำหรับ long-period ถ้าช่วงเวลาของ τ_c มีค่าอยู่ในช่วงที่เป็นนาฬิกาไปจนถึง 4.6×10^9 ปี เราจะเรียกปฏิกิริยาการเรืองแสงแบบนี้ว่า เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermoluminescence, TL) ซึ่งปฏิกิริยาการเรืองแสงแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์จะไม่มีการเรืองแสงขณะที่ถูกกระตุ้นหรือสิ้นสุดการกระตุ้นจนกว่าจะได้รับพลังงานความร้อนที่เหมาะสมค่าหนึ่งจึงจะทำให้เกิดการเรืองแสงขึ้น ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงกับอุณหภูมิจะมีลักษณะเป็นแบบเอกซ์โปเนนเชียล

2.1.2 หลักการทั่วไปของเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์

ปฏิกิริยาการเรืองแสงแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermoluminescence, TL) จะต่างจากปฏิกิริยาการเรืองแสงแบบอื่น ๆ ตรงที่เมื่อผลึกได้รับการกระตุ้นจากพลังงานภายนอก เช่น รังสีผลึกจะมีการกักเก็บพลังงานไว้ในผลึกโดยที่ช่วงระยะเวลาที่ใช้ในการกักเก็บจะ

อยู่ในเวลาที่เป็นวินาทีไปจนถึงเวลาที่เป็นปีจนกว่าจะได้รับการกระตุ้น จากความร้อนที่พอเหมาะจึงจะปล่อยพลังงานนั้นออกมาในรูปคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า กล่าวคือเมื่อผลึกได้รับรังสีซึ่งมากพอที่จะกระตุ้นอิเล็กตรอนที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) ซึ่งมีพลังงานต่ำกว่าไปสู่สถานะโลด (excited state) ซึ่งเป็นสถานะที่มีพลังงานสูงกว่าและไม่เสถียร ดังนั้นอิเล็กตรอนจึงพยายามกลับคืนสู่สถานะพื้น ซึ่งจะถูกล็อกไว้ที่สถานะกึ่งเสถียร (metastable state) เรียกว่ากับดัก (trap) ซึ่งเป็นสถานะพลังงานที่อยู่ระหว่างสถานะพื้นและสถานะโลด โดยเกิดจากความบกพร่อง (defect) ของผลึกจึงไม่สามารถกลับมายังสถานะพื้นได้และไม่มีการปล่อยแสงจนกว่าอิเล็กตรอนที่ถูกจับได้รับการกระตุ้นทางความร้อนด้วยพลังงานมากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากกับดักและคายพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแล้วกลับมายังสถานะพื้นเช่นเดิม ซึ่งหลักการของเทอร์โมลูมิเนสเซนส์สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีแถบพลังงาน (energy band) กล่าวคือในโครงสร้างผลึกของฉนวน (insulator) จะมีแถบพลังงานอยู่ 2 แถบคือแถบวาเลนซ์ (valence band) และแถบการนำ (conduction band) โดยแถบวาเลนซ์ในสภาวะปกติจะมีอิเล็กตรอนอยู่เต็มและอยู่ในสถานะยึดแน่น (bound state) ส่วนแถบการนำในสภาวะปกติจะไม่มีอิเล็กตรอนอยู่เลย แต่ถ้ามีอิเล็กตรอนก็จะอยู่ในสถานะที่ไม่ยึดแน่น (unbound state) และอิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระทั่วแลตทิซ (lattice) และระหว่างแถบพลังงานทั้งสองนี้เป็นที่ว่าง ซึ่งไม่อนุญาตให้อิเล็กตรอนอยู่ได้ เรียกที่ว่างนี้ว่าเขตหวงห้าม (forbidden gap) หรือช่องพลังงาน (energy gap) โดยทั่วไปแล้วผลึกที่เป็นสารกึ่งตัวนำหรือฉนวนจะมีความผิดปกติหรือความบกพร่อง ขึ้นในโครงสร้างผลึก (crystal structure) ทำให้มีความเป็นไปได้ที่อิเล็กตรอนจะมีระดับพลังงานในแถบช่องว่างของผลึก โดยมีการก่อดัของระดับพลังงาน (energy level) ไม่เท่ากันได้หลายค่าทำให้แยกได้หลายระดับตามความลึกของพลังงาน (energy depth) และเรียกระดับพลังงานนี้ว่ากับดัก ซึ่งมีหน้าที่ในการดักจับอิเล็กตรอนที่ตกกลับลงมาจากแถบการนำและการดักจับอิเล็กตรอนจะเกิดขึ้นมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของกับดัก เพราะผลึกที่ให้ปริมาณแสงมากเนื่องจากมีปริมาณกับดักมาก โดยที่ปริมาณกับดักจะขึ้นกับความบกพร่องของผลึก ซึ่งเกิดขึ้นได้หลายแบบและแตกต่างกันออกไปตามกระบวนการปลูกผลึกและการเกิดผลึกโดยธรรมชาติเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการกำหนดชนิดของความบกพร่องของผลึก ซึ่งสาเหตุเหล่านี้ มีผลทำให้โครงสร้างภายในของผลึกเกิดการเปลี่ยนแปลงไป เช่นทำให้เกิดช่องว่างหรือเกิดการเปลี่ยนตำแหน่งโดยชนิดของความบกพร่องแบ่งออกเป็น 4 ชนิดดังนี้ คือ

2.2.1 ความไม่สมบูรณ์แบบเส้น (Line Defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดขึ้นเนื่องจากการอยู่ผิดสภาพหรือการอยู่ผิดที่ของอะตอมทั้งแนวหรือระนาบภายในผลึก บางครั้งเรียกว่า dislocations ทำให้เกิดจากความผิดปกติของสารประกอบทำให้เกิดรอยต่อระหว่างแลตทิซ เกิดจากการเลื่อนกันระหว่างผิวระนาบแลตทิซที่ขนานกัน

2.2.2 ความไม่สมบูรณ์ตามผิวหน้า (Surface Defect) เป็นความไม่สมบูรณ์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระนาบอะตอมที่อยู่รวมกันข้างขอบเกรน (grain boundaries)

2.2.3 ความไม่สมบูรณ์แบบจุด (Point defect) แบ่งออกเป็น

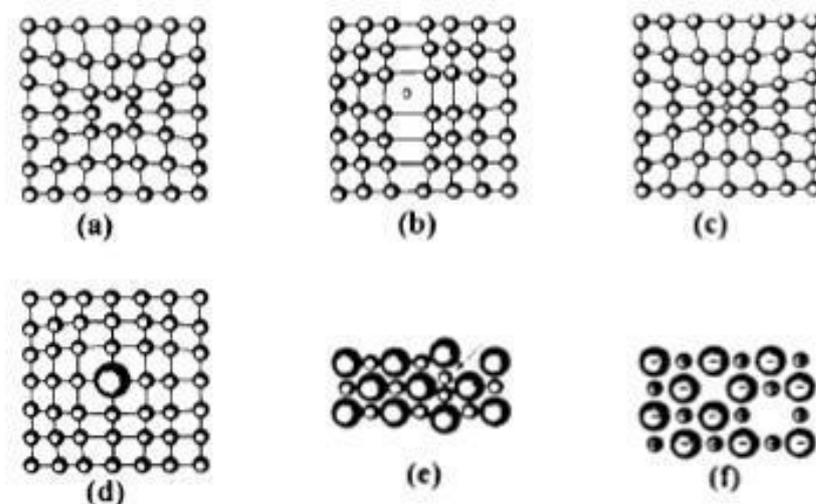
1) Vacancies เกิดขึ้นเมื่ออะตอมหลุดออกไปจากตำแหน่งปกติซึ่งเกิดขึ้นระหว่างการก่อผลึกที่อุณหภูมิสูง การทำให้ผลึกเย็นตัวอย่างรวดเร็ว การขึ้นรูป หรือเกิดขึ้นเนื่องจากสั่นของอะตอม เมื่อได้รับพลังงานจากรังสีโดยปกติที่อุณหภูมิห้องจะมี 2 ถึง 3 Vacancies แต่จะมีปริมาณช่องว่างของอะตอมมากขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิ แสดงในภาพที่ 2.1-a

2) Interstitial Defect เกิดขึ้นเมื่อมีอะตอมที่เกินมามากกว่าปกติ เข้าไปแทนที่ใน ช่องว่างแลตทิซ ภายในผลึก ซึ่งอะตอมที่เข้ามาแทรกอาจเป็นอะตอมเดียวกับโครงสร้างผลึกเอง (Self-interstitial atom) หรืออาจเป็นอะตอมของธาตุอื่น (Interstitial impurity atom) โดยที่อะตอมที่เข้าไปแทนที่นั้นจะมีขนาดเล็กกว่าอะตอมหลัก แต่จะมีขนาดใหญ่กว่าที่ว่างนั้น ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ อะตอมที่อยู่ ใกล้เคียง ถูกอัดและทำให้ โครงสร้างเกิดการบิดเบี้ยว ไปจากเดิม แสดงในภาพที่ 2.1-b

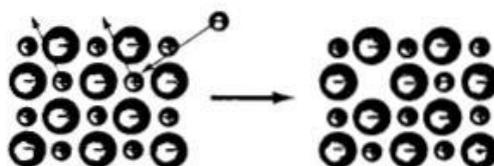
3) Substitutional Defect เกิดจากการนำอะตอมของธาตุอื่นเข้ามาแทนที่ในอะตอมใน โครงสร้างผลึกหลัก ซึ่งเรียกอะตอมที่เข้ามาแทนที่และอะตอมที่เข้ามาแทนที่นี้ยังคงอยู่ในแลตทิซ ถ้าอะตอมที่เข้ามาแทนที่เล็กกว่าอะตอมหลักจะทำให้เกิดการดึงอะตอมที่อยู่ข้างๆ และถูกอัดจึงเกิดการบิดเบี้ยวและความบกพร่องขึ้นใน โครงสร้างผลึก แสดงในภาพที่ 2.1-c และ 2.1-d

4) Frenkel Defect เป็นจุดบกพร่องที่เกิดจากการย้ายที่ของ ไอออนบวก จากที่เดิมไปแทรกอยู่ร่วมกับ ไอออนลบและบวกของอีกที่หนึ่ง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดช่องว่างที่เป็นประจุบวกเกิดขึ้น หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า vacancy-interstitial pair เกิดขึ้นเมื่อไอออนที่ตำแหน่งปกติเคลื่อนที่ไปยัง interstitial site ดังแสดงในภาพที่ 2.1-e

5) Schottky Defect เกิดจากขั้วเป็นคู่ทั้งประจุบวกและประจุลบหลุดออก จากตำแหน่งเดิม เพื่อรักษาประจุโครงสร้างให้เป็นกลางหรือเป็นการอนุรักษ์ประจุ ทำให้เกิดช่องว่าง ทั้งบวกและลบเกิดขึ้น แสดงในภาพที่ 2.1-f



ภาพที่ 2.1 ความไม่สมบูรณ์แบบจุด ชนิดต่าง ๆ (a) vacancy (b) interstitial atom (c) small substitutinal atom (d) large substitutinal atom (e) Frenkel defect (f) Schottky defect

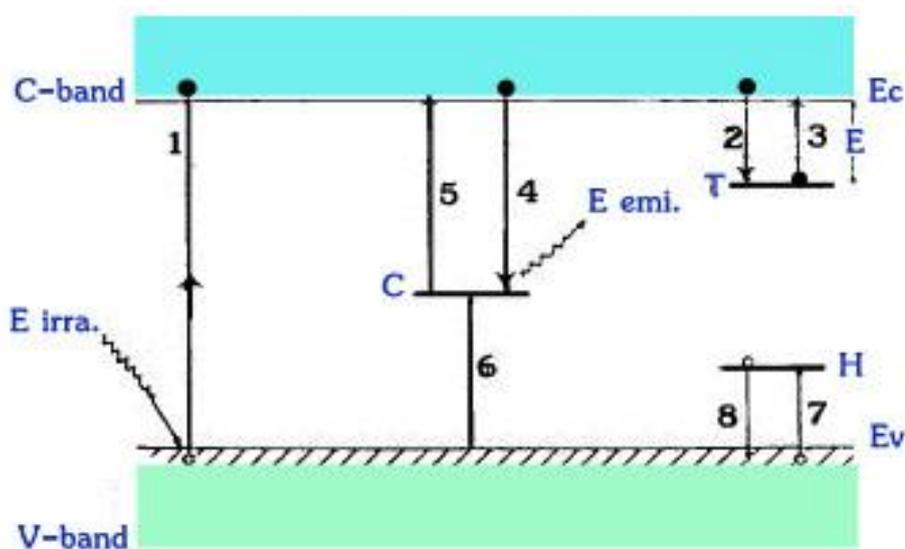


ภาพที่ 2.2 การแทนที่ cation 2^+ ในอะตอมหลักจะทำให้ cation 1^+ ที่อยู่ใกล้หลุดออกจากโครงสร้างเพื่ออนุรักษ์ประจุและทำให้เกิดช่องว่างขึ้น

2.1.3 แบบจำลองที่ใช้อธิบายการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนส์

แบบจำลองอย่างง่ายที่จะทำให้เข้าใจปรากฏการณ์นี้ได้แก่แบบจำลองแถบพลังงาน (energy band model) กล่าวคือในแบบจำลองนี้มีระดับพลังงานที่เกี่ยวข้องสามระดับด้วยกัน ดังแสดงในภาพที่ 2.3 ซึ่งศูนย์กลาง (center) ต่างๆ ที่เกิดขึ้นในผลึกเกิดจากความบกพร่องหรือความไม่บริสุทธิ์ของผลึก เมื่อผลึกได้รับรังสีจากแหล่งกำเนิดภายนอก พลังงานที่ผลึกได้รับจะเป็น E_{irra} ซึ่งมีค่ามากกว่าช่องพลังงาน (band gap) อันตรกิริยาระหว่างรังสีกับผลึกทำให้อิเล็กตรอนเป็นอิสระจากแถบวาเลนซ์ (valence band) แล้วไปอยู่ในแถบการนำ (conduction band) โดยมีผลต่างพลังงานเป็น $E_c - E_v$ เมื่อ E_c และ E_v คือระดับพลังงานของแถบการนำและแถบเวเลนซ์ตามลำดับ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดโฮลอิสระ (free hole) ที่แถบเวเลนซ์ (ลำดับที่ 1) แต่จะมีอิเล็กตรอนจำนวนหนึ่งตกกลับไปสถานะพื้น (ground state) โดยทันทีทันใด ตามด้วยการปล่อยแสงหรือถ่ายเทพลังงานให้เล็ด

ทึบและทำให้เกิดความร้อนในผลึกส่วน อิเล็กตรอน อีกจำนวนหนึ่งถูกจับที่กับดัก อิเล็กตรอน Trapping state, T (ลำดับที่ 2) พร้อมกับมีโฮลอิสระถูกจับที่กับดักโฮล Hole traps (H) (ลำดับที่ 7) อิเล็กตรอนและโฮลอาจรวมกันโดยผ่านศูนย์กลางการรวม recombination center (C) (ลำดับที่ 4 และ 6) นอกเหนือจากลำดับที่ 1 แล้วอิเล็กตรอนยังสามารถหลุดออกจากศูนย์กลางการรวม (C) ได้โดยการปล่อยรังสีที่มีพลังงานมากกว่าพลังงานที่แตกต่างระหว่าง E_c และ C (ลำดับที่ 5) อย่างไรก็ตามยังอาจมีการรวมกันของอิเล็กตรอนและโฮล ข้ามช่องว่างแถบพลังงานหวงห้าม (Forbidden band gap) ที่เรียกว่าการรวมกันโดยตรง (direct recombination) หรือเรียกอีกนัยหนึ่งว่าการส่ง ผ่านระหว่างแถบ (band-to-band) แต่จะมีโอกาสเกิดได้น้อยกว่าการรวมกันโดยอ้อม (indirect recombination) ที่เรียกว่าการส่งข้ามระหว่างแถบบนกับศูนย์กลาง (band-to-center) โดยเฉพาะในสารกึ่งตัวนำและฉนวน เพราะวัสดุเหล่านี้มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง ดังนั้นการรวมกันจะเกิด ขึ้นได้ โฮลจะต้องถูกจับที่ C ก่อน (ลำดับที่ 6) และรวมกับ อิเล็กตรอน โดยขบวนการ annihilation (ลำดับที่ 4) จึงจะเกิดการปลดปล่อยแสง



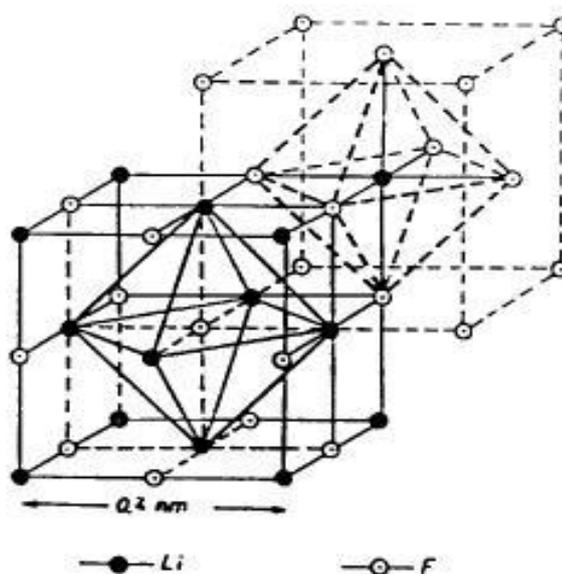
ภาพที่ 2.3 แผนภาพการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ตามแบบจำลองแถบพลังงาน โดยที่วงกลมทึบแทน อิเล็กตรอนและวงกลมกลวงแทนโฮล ลูกศร 1, 2, 3 4 และ 5 แทนการส่งผ่านอิเล็กตรอน ส่วนลูกศร 6, 7 และ 8 แทนการส่งผ่านโฮล

จากแบบจำลองที่กล่าวมาจะเห็นว่าปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์มีกระบวนการเกี่ยวข้องสองกระบวนการด้วยกันคือกระบวนการที่หนึ่งเป็นการเกิดไอออนในเซชัน (ionization) และการดักจับอิเล็กตรอน (electron trapping) กระบวนการที่สองคือการรวมกันของอิเล็กตรอนกับโฮลแล้วปล่อยแสง

2.1.4 ลิเทียมฟลูออไรด์

ลิเทียมฟลูออไรด์ (LiF) ในธรรมชาติไม่มีคุณสมบัติที่จะนำมาใช้เป็นหัววัดรังสีได้ จะต้องนำมาโด๊ปให้เกิดคุณสมบัติพิเศษขึ้นภายในอะตอม คือเมื่อเจือด้วยโลหะบางชนิด (activator) จะสามารถแสดงคุณสมบัติการเรืองรังสีด้วยความร้อน จึงได้ผลึกชนิดนี้มาใช้วัดรังสี โดยเจือด้วยโลหะชนิดต่างๆ เช่น LiF:Mg, Ti LiF:Mg, Na LiF:Mg, Cu, P และ LiF:Cu, Cu, Na, Si เป็นต้น สามารถนำไปใช้ในทางงานทางด้านรังสีได้อย่างมีประสิทธิภาพในลักษณะที่แตกต่างกันออกไป เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะที่แตกต่างกันของทีแอลดีแต่ละชนิด โดยคุณลักษณะเฉพาะของ ลิเทียมฟลูออไรด์มีดังนี้

2.1.4.1 ลิเทียมฟลูออไรด์แสดงคุณสมบัติเป็นตัววัดที่ดีเนื่องจากเป็น alkali halide ที่ประกอบด้วย cation (M^+) และ anion (X^-) โดยแต่ละ Li^+ ไอออนซึ่งอยู่ที่ศูนย์กลางของลูกบาศก์ จะถูกล้อมรอบด้วย F^- ไอออนที่อยู่ใกล้ที่สุด 6 ไอออนและในทำนองเดียวกันอาจพิจารณาได้ว่า F^- มี Li^+ ไอออน จำนวน 6 ไอออนล้อมรอบอยู่เช่นกันดังแสดงในภาพที่ 2.4



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างผลึกของลิเทียมฟลูออไรด์ ซึ่งเป็นแบบ fcc (face center cubic) ประกอบด้วย Li^+ และ F^- ไอออน

2.1.4.2 ไอออนที่อยู่ชิดกันของลิเทียมฟลูออไรด์จะมีค่าคงที่แลตทิซ (lattice constant) เท่ากับ 0.4 nm ด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวกันที่สูงของอิเล็กตรอนกับแถบเวเลนซ์และความกว้างของช่องพลังงาน ซึ่งกว้างถึง 14.3 eV จึงทำให้ผลึกลิเทียมฟลูออไรด์ โปร่งแสงในช่วงที่ตา

มองเห็นและในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (UV) ด้วยคุณสมบัติข้อนี้การเรืองแสงที่เกิดขึ้นจากแถบพลังงานที่ทุกระดับความลึกสามารถวัดได้โดยปราศจากการสูญเสียไปในวัสดุ

2.1.4.3 ลิเทียมฟลูออไรด์มีความทนทานสูงต่อสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ เช่น ความชื้น แสง ความเสียหาย และ สารเคมีเกือบทุกชนิด ดังนั้นลิเทียมฟลูออไรด์จึงสามารถนำมาใช้ได้หลายครั้ง

2.1.4.4 จุดหลอมเหลวของลิเทียมฟลูออไรด์เท่ากับ 875 องศาเซลเซียส ซึ่งค่อนข้างต่ำ ดังนั้นการเติมสารเจือด้วยโลหะชนิดต่าง ๆ เข้าไปจะสามารถทำได้ง่ายโดยใช้การหลอมและตกผลึก นอกจากนี้ภายใต้สถานะกึ่งของเหลว (semi liquid) จึงสามารถขึ้นรูปอัดให้เป็นเม็ดได้โดยไม่ต้องใช้สารยึด (binding) ซึ่งอาจจะไปลดปริมาณเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ทำให้มีผลกระทบต่อการใช้งานไปใช้เป็นผลึกวัดรังสีได้

2.1.4.5 คุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีของผลึกลิเทียมฟลูออไรด์ในทุกๆ กรณีจะเหนือกว่าสารประกอบชนิดอื่นๆ เพราะว่าค่า effective atomic number (Z_{eff}) ของผลึกลิเทียมฟลูออไรด์มีค่าเท่ากับ 8.2 ส่วนเนื้อเยื่อ (Soft tissue) และอากาศมีค่าเท่ากับ 7.4 และ 7.3 ตามลำดับ ซึ่งใกล้เคียงกันจึงถือได้ว่าลิเทียมฟลูออไรด์สามารถเทียบเคียงได้กับเนื้อเยื่อ (tissue equivalence)

แม้ว่าลิเทียมฟลูออไรด์จะเป็นสารประกอบที่เสถียรแต่ ลิเทียมฟลูออไรด์ ก็ยังเป็นสารเคมีที่เป็นพิษเมื่อกลืนเข้าไปหรือสูดไไว้ได้ผิวหนังโดยตรง จากการศึกษาพบว่าผลึกวัด ลิเทียมฟลูออไรด์ที่ห่อหุ้มและฝังไว้ในเนื้อเยื่อจะละลายใน 3 สัปดาห์และหนูจะแสดงอาการป่วยเนื่องจากพิษของลิเทียมฟลูออไรด์ คือน้ำหนักลด ดิเชื้อ ซึม สั่นและตายในที่สุด ดังนั้นในบางประเทศจึงขึ้นบัญชีลิเทียมฟลูออไรด์เป็นสารพิษ และต้องระวังเป็นพิเศษเมื่อนำลิเทียมฟลูออไรด์มาใช้

2.1.5 เครื่องวัดรังสีชนิดเทอร์โมลูมิเนสเซนส์โดสิมิเตอร์

เทอร์โมลูมิเนสเซนส์โดสิมิเตอร์ หรือที่เรียกย่อๆ ว่าทีแอลดี เป็นเครื่องมือวัดปริมาณรังสีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัดรังสีได้ทั้งปริมาณปฐมภูมิและทุติยภูมิ (รังสีกระเจิง) มีขนาดเล็กและพกพาได้สะดวกมีความไวในการตอบสนองต่อรังสีสูง เมื่อใช้งานแล้วสามารถนำกลับมาใช้งานซ้ำได้ จึงเหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเครื่องมือวัดปริมาณรังสีในงานด้านต่างๆ เช่น ทางด้านสิ่งแวดล้อม และ ทางด้านการแพทย์ โดยผลึกที่ได้จะมีคุณสมบัติพิเศษคือเมื่อได้รับพลังงานจากรังสีแล้วจะทำให้เกิดสถานะกึ่งเสถียรขึ้นในอะตอม โดยที่พลังงานจำนวนหนึ่งจะถูกเก็บไว้ในผลึกและเป็นการเก็บอย่างถาวร และผลึกจะเก็บพลังงาน นั้นไว้จนกระทั่งผลึกนั้นได้รับพลังงานความร้อนที่เหมาะสมปริมาณหนึ่ง ผลึกจึงจะคายพลังงานนั้นออกมาในรูปของแสงสว่างและอะตอมกลับสู่สถานะพื้นฐานดั้งเดิม จึงเรียกผลึกพวกนี้ว่า ผลึกเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ (Thermoluminescence crystal) โดยพลังงานในรูปของแสงสว่างนี้สามารถวัดได้โดยการเปลี่ยนให้

เป็นพลังงานไฟฟ้าด้วยหลอดทวีคูณแสง (Photomultiplier tube) ซึ่งปริมาณแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณรังสีที่สะสมไว้

สิ่งที่สามารถอธิบายถึงความเข้มของแสงสว่างที่เกิดขึ้นจากที่แอลคีนนั้นได้รับการเสนอโดยทฤษฎีของแรนดอลล์วิลคินส์ (Randall and Wilkins) เมื่อพิจารณาถึงผลึกของสารที่มีกับดักอิเล็กตรอน พลังงานที่ความลึก (Energy depth; E) ของกับดักซึ่งมีหน่วยเป็น อิเล็กตรอนโวลต์ (eV) ที่อยู่ต่ำกว่าแถบ นำ ขณะที่สารนี้มีอุณหภูมิเท่ากับ องศาเคลวิน ดังนั้นความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากกับดัก (p) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1.1)

$$p = \frac{1}{\tau} = se^{-E/kT} \quad (1.1)$$

เมื่อ p คือ ความน่าจะเป็นของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนจากกับดักต่อหน่วยเวลา (วินาที)

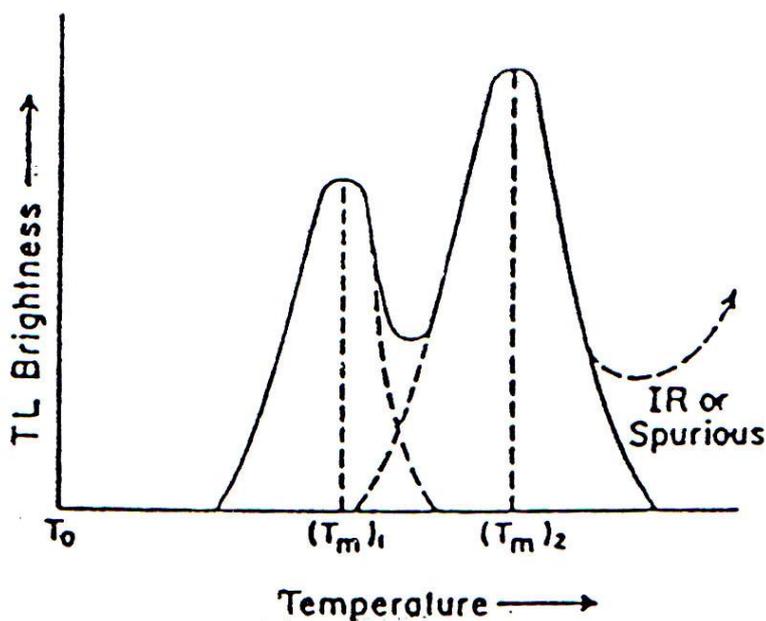
τ คือ ช่วงเวลาเฉลี่ยของอิเล็กตรอนที่อยู่ภายในกับดัก

K คือ Boltzman 's constant (โดยที่ $k = 1.381 \times 10^{-23}$ J/K , 8.62×10^{-5} eV/K)

S คือ frequency factor ซึ่งเกี่ยวข้องกับการผิปกติตรงส่วนโครงสร้างของผลึก (sec^{-1})

E คือ ความลึกของกับดัก (eV)

จากสมการที่ (1.1) จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อค่า k , E และ s คงที่ ถ้าค่าอุณหภูมิ (T) เพิ่มขึ้นก็จะเป็นสาเหตุให้ค่า p เพิ่มขึ้นและ τ มีค่าลดลง ดังนั้นถ้าลองเพิ่ม อุณหภูมิ เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เป็นเชิงเส้นเทียบเวลาโดยเริ่มจากอุณหภูมิของห้อง จะทำให้อัตราของการปลดปล่อยอิเล็กตรอนที่ถูกกับดักมีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงขีดสุดที่อุณหภูมิ (T_m) แล้วจำนวนอิเล็กตรอนที่ถูกกับดักไว้ก็จะค่อย ๆ หมดลงในที่สุด ความเข้มแสงสว่างที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนกันกับอัตราการปลดปล่อยอิเล็กตรอนฉะนั้นค่าสูงสุดของเส้นโค้งสัมพันธ์หรือที่เรียกว่า พีค (peak) ของความสว่างจากเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ จะสังเกตเห็นได้ ณ อุณหภูมิ T_m นี้เอง ซึ่งจะเรียกพีคนี้ว่า โกลพีค (glow peak) ซึ่งการมีหลุมกับดักมากกว่าหนึ่งจะทำให้มีโกลพีคมากกว่าหนึ่งเช่นกัน แสดงในภาพที่ 2.5



รูปที่ 2.5 โกลว์เคิร์ฟของเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ที่สัมพันธ์กับอุณหภูมิ

จากรูปที่ 2.5 เป็นผลจากการให้ความร้อนแก่สารเรืองแสงที่ได้รับรังสีที่มี 2 trap depths อุณหภูมิของสารเรืองแสงเป็น T ขณะที่ได้รับรังสี โกลว์เคิร์ฟจะมีด้วยกัน 2 โกลว์เคิร์ฟที่ $(T_m)_1$ และ $(T_m)_2$ แต่กรณีนี้จะไม่สามารถหาค่าได้อย่างสมบูรณ์ถูกต้อง แต่ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 องศาเซลเซียสแสงอินฟราเรดจากเครื่องอ่านให้ความร้อนจะเริ่มทำให้เกิดแสงสว่างที่สามารถตรวจวัดได้

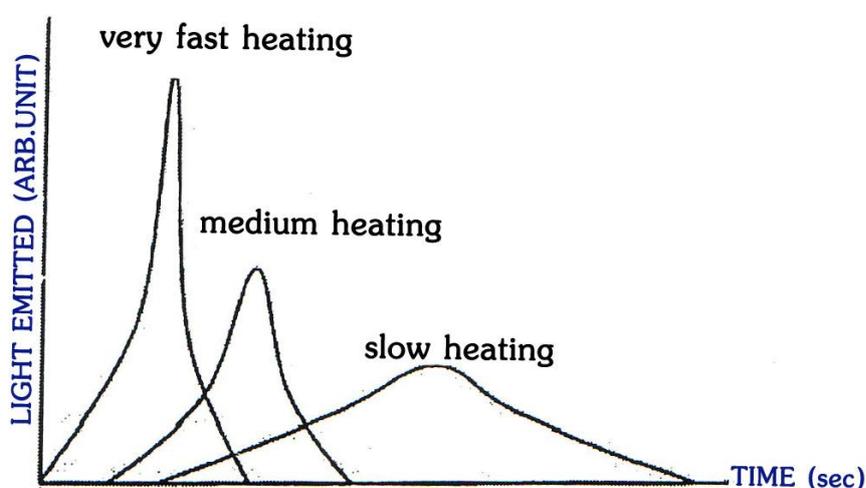
2.1.5.1 คุณสมบัติที่สำคัญของทีแอลดี

ทีแอลดีที่จะนำไปใช้งานในการวัดปริมาณรังสีนั้นจำเป็นจะต้องศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1) โกลว์เคิร์ฟ (glow curve)

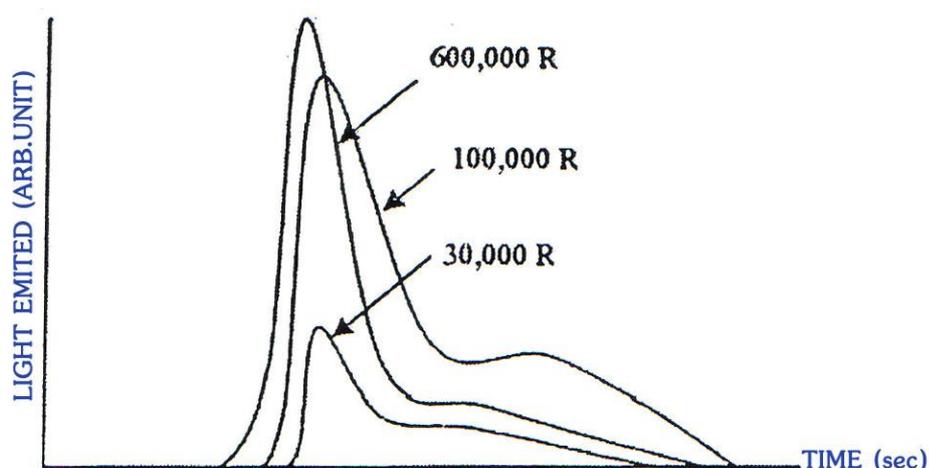
โกลว์เคิร์ฟเป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้ม ของแสงที่ทีแอลดีปล่อยออกมากับคุณสมบัติหรือเวลาที่ใช้ในการให้ความร้อน ถ้าอัตราการให้ความร้อน (heating rate) กับทีแอลดี มีค่าคงที่สม่ำเสมอกราฟทั้งสองนั้นจะคล้ายกันมาก ซึ่งพื้นที่ใต้กราฟจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่าง เทอร์โมลูมิเนสเซนส์กับเวลาจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ ผลรวมเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ ดังนั้นถ้ากล่าวถึง โกลว์เคิร์ฟ ปกติจะหมายถึงกราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง เทอร์โมลูมิเนสเซนส์กับเวลา ซึ่งปัจจัยและตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลทำให้ โกลว์เคิร์ฟ เปลี่ยนแปลงไปได้แก่ อัตราการให้ความร้อน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนจะมีผลต่อ โกลว์เคิร์ฟ อย่างมาก กล่าวคือถ้าเพิ่มอัตราการให้ความร้อนขึ้นเป็นสองเท่าจะทำให้ความสูงของพีคเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าแต่ความกว้างของพีคจะแคบลง แสดงดังภาพที่ 2.6

ขนาดรูปร่างลักษณะของทีแอลดี เนื่องจากส่วนของทีแอลดีสัมผัสกับ ความร้อน (heating element) จะได้รับความร้อนก่อนส่วนที่อยู่ห่างออกไปจะได้รับความร้อนจากการนำความร้อน ดังนั้นจะเห็นว่าขนาด รูปร่างและสภาพการนำความร้อนของทีแอลดีมีผลต่อ โกลว์เคิร์ฟอย่างมาก ดังนั้นถ้าทีแอลดีมีความหนาเกินไปส่วนที่อยู่ห่างจากความร้อนจะยังมีอุณหภูมิต่ำอยู่ จึงได้ โกลว์พีค(Glow peak) ที่อุณหภูมิต่ำในขณะที่ส่วนที่อยู่ใกล้ ความร้อน จะให้ตำแหน่งพีคหลักที่อุณหภูมิสูง ซึ่งผลรวมก็คือ โกลว์เคิร์ฟค่อนข้างจะกว้างขึ้นมากและมีรูปร่างผิดไปจากเดิมเพราะพีคมาซ้อนกัน ซึ่งผลนี้จะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการให้ความร้อนสูง



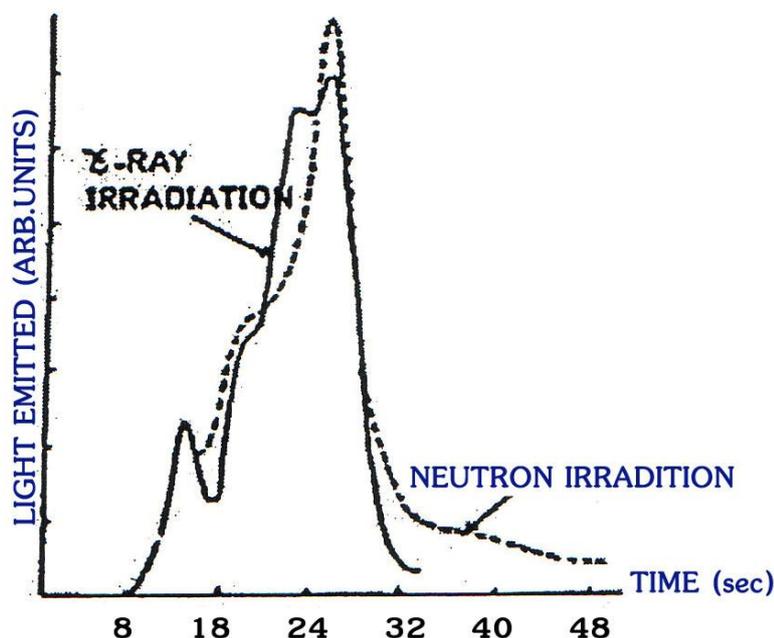
ภาพที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงอัตราการให้ความร้อนที่มีผลต่อรูปร่างของ โกลว์เคิร์ฟ

ระดับของปริมาณรังสี (level of exposure) ปริมาณรังสีที่ทีแอลดี ได้รับความร้อนจะมีผลต่อ โกลว์เคิร์ฟด้วยเพราะกับดักต่างๆ จะไม่อิ่มตัวที่ปริมาณรังสีเดียวกันดังแสดงในภาพที่ 2.7



ภาพที่ 2.7 ผลของปริมาณรังสีที่มีผลต่อ โกลว์เคิร์ฟ

ชนิดของรังสี (type of radiation) เมื่อทีแอลดีได้รับรังสีต่างชนิดกันจะให้ โกลว์ เคิร์ฟที่มีรูปร่างต่างกันด้วย ดังแสดงในภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 โกลว์เคิร์ฟของลิเทียมฟลูออไรด์ซึ่งนำไปฉายรังสีนิวตรอนและรังสีแกมมา

ประวัติการได้รับรังสี และการแอนนิลของทีแอลดีเมื่อทีแอลดีได้มีการใช้งานซ้ำหลาย ๆ ครั้ง จะทำให้ความไวในการตอบสนองต่อรังสีของทีแอลดีต่ำลงมีวิธีแก้ไขคือนำไปแอนนิลก่อนใช้งาน

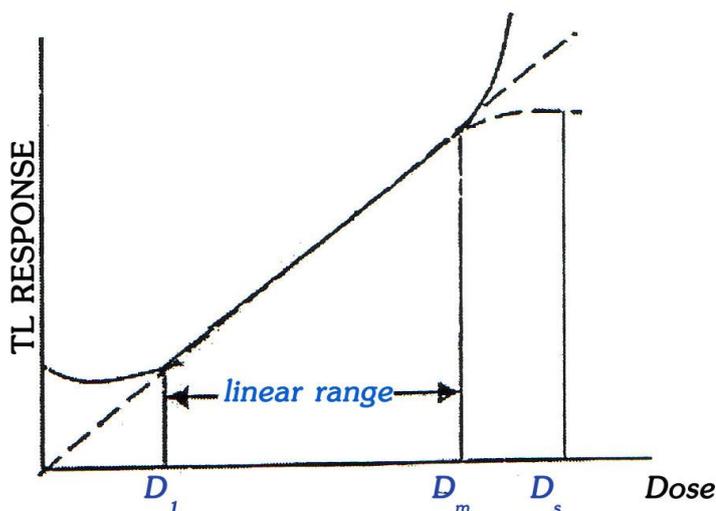
เครื่องมือที่ใช้บันทึก โกลว์เคิร์ฟ (recording instrument) กล่าวคือถ้าเครื่องมืออยู่ในสภาพที่ ผิดปกติ เช่น เทอร์โมคัปเปิลทำงานผิดปกติหากไม่มีการปรับเทียบอุณหภูมิของเทอร์โมคัปเปิล ที่ให้กับ ถาดรองให้ความร้อนอาจทำให้ตำแหน่งอุณหภูมิของฟิคหลักผิดไป

2) ความไวในการตอบสนองต่อรังสี (Sensitivity)

ความไวในการตอบสนองต่อรังสี หมายถึงความสัมพันธ์ระหว่างแสงที่ปล่อยออกมาจากทีแอลดีต่อหนึ่งหน่วยปริมาณรังสี ซึ่งสิ่งที่จะมีผลต่อความไวในการตอบสนองต่อรังสีคือลักษณะรูปร่างของทีแอลดี ขนาดของผลึก และผลของการแอนนิล

3) ความเป็นเชิงเส้น (Linearity)

ความเป็นเชิงเส้นหมายถึงความสัมพันธ์ที่เป็นเชิงเส้นระหว่างปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาจากทีแอลดี กับปริมาณรังสีที่ทีแอลดีได้รับ ลักษณะสัญญาณที่ได้จากทีแอลดีแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 ตัวอย่างความเป็นเชิงเส้นของ TL ที่ปริมาณรังสีต่าง ๆ

จากภาพเมื่อ D_1 คือ Minimum Linear Dose D_m คือ Maximum Linear Dose D_s คือ Saturated Dose ปริมาณรังสีที่ทีแอลดีได้รับในช่วง D_1 ถึง D_m เรียกว่า linear range ซึ่งปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาจากทีแอลดีจะเป็นเชิงเส้นกับปริมาณรังสีและกับ ดัก ต่างๆจะอิมตัวที่ปริมาณรังสี D_m ดังนั้นปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาจากทีแอลดีจะมีปริมาณคงที่ตรงปริมาณรังสี D_s

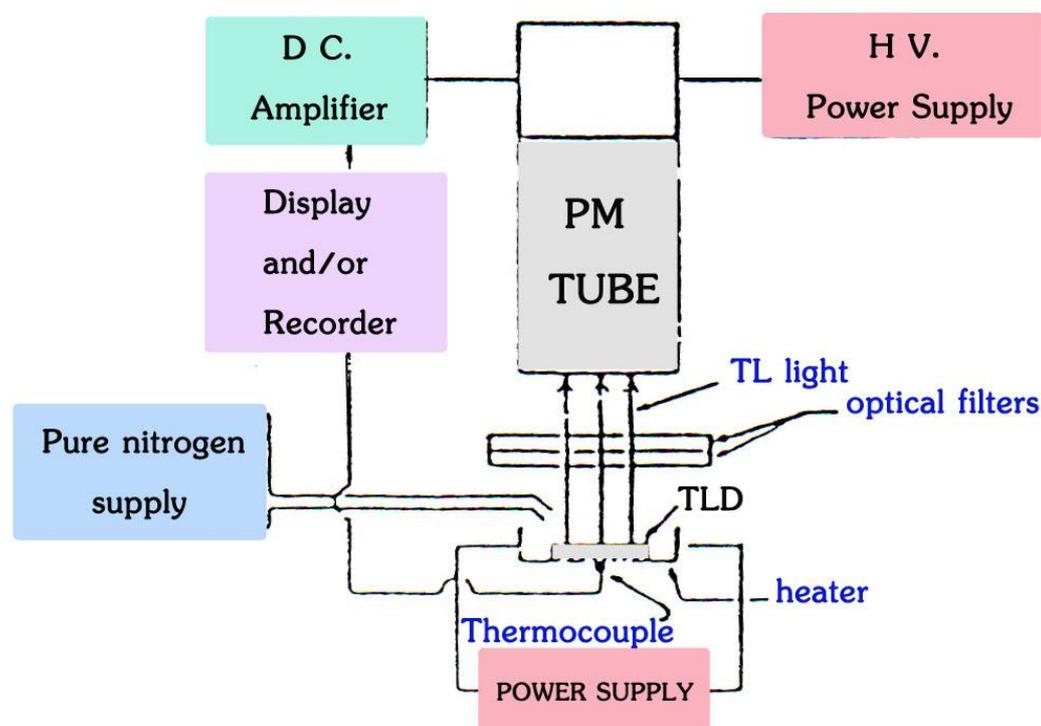
4) การจางหายไปของสัญญาณ (Fading)

การจางหายไปของสัญญาณหมายถึงการจางหายไปของสัญญาณในทีแอลดีตามกระบวนการการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนส์ ดังนั้น เมื่ออะตอม ของทีแอลดี ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานโฟตอนอิเล็กตรอนจะกระโดดไปค้างอยู่ในกับดัก การเก็บทีแอลดีไว้นานๆ หลังจากทีแอลดีได้รับรังสีหรืออุณหภูมิในการเก็บสูงหรือมีแสงสว่างมากจะมีผลทำให้ไอเล็ด คตรอนที่ค้างอยู่ในกับดักพลังงานแถบต่างๆ ตกลงมาที่แถบวาเลนซ์เมื่อนำทีแอลดีไปอ่านค่าปริมาณ แสงค่าที่ได้จะลดลงจากความเป็นจริง

2.1.6 เครื่องอ่านค่า ทีแอลดี

เครื่องอ่านค่า ทีแอลดีเป็นเครื่องมือที่ใช้ในการ ให้ความร้อน สารเรืองแสงทีแอลดี และวัสดุที่ปลดปล่อยออกมาซึ่งมีส่วนประกอบดังแสดงในภาพที่ 2.10 ตัวสารเรืองแสงจะถูกใส่เข้าไปในแผงให้ความร้อนที่อุณหภูมิห้องแล้วจึงทำการ ให้ความร้อน ตัวสารเรืองแสงนั้นและเมื่อมันปลดปล่อยแสงสว่างนั้นออกมาจึงทำการวัดด้วยหลอดทวีคูณแสง (photomultiplier tube) ในการให้ความร้อน หรือให้ความร้อนนั้นมีหลายรูปแบบด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้กันนั้นจะให้ความร้อนแก่สารเรืองแสงอย่างรวดเร็วให้ทั่วบริ เวณกับดักที่ไม่เสถียรนั้น โดยจะยังไม่คำนึงถึงแสงสว่างที่ถูกปลดปล่อยออกมาในช่วงแรก ๆ จนกว่าจะถึงอุณหภูมิที่ตั้งเอาไว้ เมื่อสารเรืองแสงได้รับความร้อนที่เหมาะสมที่จะก่อให้เกิด โกลว์เคิร์ฟได้จนครบหมดในทางการวัดจึงดำเนินการวัดผลรวมของความ

สว่างของแสงที่ปลดปล่อยออกมาทั้งหมด ซึ่งอาจจะแสดงในรูปของประจุที่วัดได้หรือปริมาณรังสีที่อ่านค่าได้ ขั้นตอนสุดท้ายจึงเป็นการให้ความร้อนแก่ผลึกเรืองแสงนั้น จนถึงอุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส เพื่อปลดปล่อยประจุที่ยังคงค้างอยู่ในกับดักที่ลึก ๆ โดยไม่คำนึงถึงแสงสว่างนอกเหนือจากนี้ที่ถูกปลดปล่อยออกมาจากปรากฏการณ์ spurious effect ในปัจจุบันเครื่องอ่านที่แอลดี สำหรับวัดปริมาณรังสีที่บุคคลได้รับนั้นได้ผลิตขึ้นมาเป็นแบบ ช่องบรรจุที่แอลดีเป็นจำนวนมาก ๆ และสามารถป้อนเข้าเครื่องอ่านได้ที่ละมาก ๆ หรือเป็นเซต โดยอัตโนมัติเป็นรหัสตัวเลขด้วยระบบคอมพิวเตอร์สามารถเก็บข้อมูลและบอกปริมาณรังสีและข้อมูลต่าง ๆ ได้อย่างละเอียด บริษัทผู้ผลิตมีหลายบริษัท ได้แก่ Eberline, Harshaw, Panasonic, Scanditronix, Teledyne Isotopes และ Victorreen เป็นต้น



ภาพที่ 2.10 แผนผังของเครื่องอ่านค่าของทีแอลดี

2.1.7 เทคนิคการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์กับดักพลังงานจลน์

นับเป็นเวลายาวนานเกือบ 50 ปี ที่ได้มีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์กับดักพลังงานจลน์ (kinetics trapping parameter) จากเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ โกลว์เคิร์ฟ ซึ่งได้มีเอกสารวิจัยเป็นจำนวนมากเกี่ยวกับวิธีการหาพารามิเตอร์ของหลุมกับดัก (ทั้ง E และ s) จากโกลว์เคิร์ฟ (glow curve) โดยใช้เทคนิคที่ต่าง ๆ กัน เช่น initial rise method, glow curve peak shape method, phosphorescence decay analysis, curve fitting technique และ variable heating rates

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เทคนิคการเปลี่ยนอัตราให้ความร้อน (variable heating rates) กับเม็ดทีแอลดี เพื่อใช้ในการคำนวณหาค่า activation energy (E) และ frequency factor (s) โดยใช้โมเดลของแรนดอลล์และวิลคินส์ (Randall & Wilkins model) ตามสมการที่ (2.1) [10]

$$\ln \frac{T_m^2}{\beta} - \left(\frac{E}{k}\right) \frac{1}{T_m} = \ln \frac{E}{sk} \quad (2.1)$$

เมื่อ T_m คือ ตำแหน่งอุณหภูมิพีดหลัก ($^{\circ}\text{K}$)

β คือ อัตราความร้อนที่ให้กับเม็ดทีแอลดีขณะอ่านปริมาณแสง ($^{\circ}\text{Ksec}^{-1}$)

k คือ ค่าคงที่ Boltzmann's (1.381×10^{-23} J/k)

E คือ activation energy (eV)

s คือ frequency factor (sec^{-1})

2.1.8 กระบวนการเตรียมวัสดุ

2.1.8.1 กระบวนการเตรียมผลึกโพลี (Polycrystalline)

กระบวนการเตรียมผลึกแบบโพลีมีหลายเทคนิค ตัวอย่างเช่น เทคนิค การหลอมที่อุณหภูมิสูง (melting method) [11][12] และ [13] ซึ่งผลึกที่ได้จากกระบวนการเตรียมแบบ Polycrystalline เป็นผลึกแบบผลึกโพลี ผลึกมีการจัดเรียงของระนาบแบบไม่เป็นระเบียบจึงส่งผลให้ผลึกที่ได้มีสีขุ่น ไม่โปร่งแสง ดังนั้นจึงเกิดการดูดกลืนแสงในตัวเอง

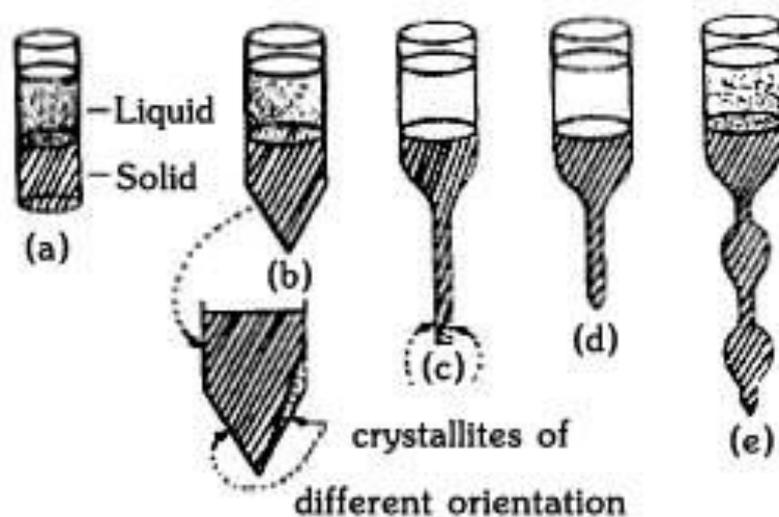
2.1.8.2 กระบวนการเตรียมผลึกเชิงเดี่ยว (Crystal Growth)

ผลึกที่ได้จากกระบวนการนี้เป็นผลึกเชิงเดี่ยวมี การจัดเรียงตัวกันของอะตอมที่เป็นระเบียบ จึงส่งผลให้ผลึกที่ได้มีความใส และ โปร่งแสง ดังนั้นจึงไม่เกิดการดูดกลืนแสงในตัวเอง ในงานวิจัยนี้ได้ทำกระบวนการเตรียมผลึกเชิงเดี่ยวด้วยเทคนิคแบบวิธีบริดจ์แมน (Brigdman) [20]

กระบวนการเตรียมผลึกเชิงเดี่ยวด้วยเทคนิคแบบวิธี บริดจ์แมนนั้นเป็นวิธีเตรียมผลึกจากการหลอมเหลวสาร โดยผลึกเดี่ยวจะเกิดขึ้นจากการก่อนิวเคลียส (nucleation) จากการเย็นตัวลงอย่างช้า ๆ ของสารที่หลอมภายในภาชนะบรรจุสารตรงรอยต่อที่มีผลต่างของอุณหภูมิจากสารที่หลอมที่อุณหภูมิสูงมายังบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่าจะทำให้ เกิดผลึกขึ้น โดยที่ผลต่างของอุณหภูมิจะเกิดจากการเลื่อนภาชนะบรรจุสารหรืออาจทำได้โดยการเลื่อนเตาซึ่งการก่อตัวของผลึกจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลายของภาชนะบรรจุสารแล้วจึงเกิดต่อเนื่องไปจนทั่วทั้งภาชนะ โดยผลต่างของอุณหภูมิ

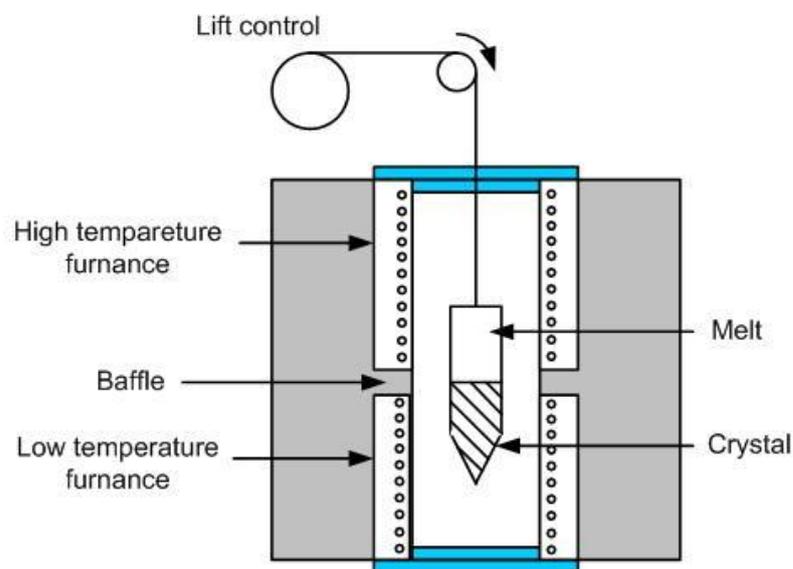
ที่บริเวณปลายภาชนะบรรจุสารจะมีผลต่อการเกิดผลึก ก่ออย่างมาก ภาชนะปลายแหลมที่ใช้บรรจุสาร จะมีรูปทรงต่าง ๆ แสดงภาพที่ 2.11

ภาชนะบรรจุสารหลอมเหลวรูปทรงกระบอกที่ด้านปลายมีพื้นที่กว้างเท่าปาก กระบอกไม่สามารถสร้างสภาวะเริ่มต้นการก่อตัวเป็นผลึกระนาบเดียวกันทั้งพื้นที่ได้ (ภาพที่ 2.11-a) ดังนั้น การก่อตัวของผลึกจะเกิดขึ้นได้จะต้องเป็นภาชนะที่มีพื้นที่ของภาชนะที่บริเวณปลายกับปาก กระบอกที่แตกต่างกันกล่าวคือภาชนะบรรจุสารที่ใช้ในการปลูกผลึก จะต้องมียูปร่างเป็นปลายแหลม แสดงในภาพที่ 2.11 b ถึง c โดยภาพที่ 2.11-b เป็นภาชนะบรรจุสารที่มีรูปทรงกรวย ซึ่งเป็นการสร้างสภาวะการเริ่มต้นของสารหลอมเหลวในปริมาณน้อยๆ ในการทำให้เย็นตัวลงเพื่อการเกิดผลึกอย่างเป็นระเบียบตลอดทั้งภาชนะ ภาพที่ 2.11-c เป็นภาชนะที่มีรูปทรงคาปิลลารี (capillary) ซึ่งมีเพียงสารหลอมเหลวปริมาณน้อย ๆ ที่ตรงปลายเท่านั้นที่เกิดการรวมตัวในช่วงเริ่มต้นจะเป็นการเพิ่มโอกาสในการจัดเรียงระนาบอย่างมีระเบียบตรงบริเวณรอยต่อของการปลูกผลึกผ่านหลอดคาปิลลารีไปสู่ภาชนะที่ปลูกผลึกภาพที่ 2.11-d เป็นภาชนะบรรจุสารที่มีปลายเป็นรูปกรวยและปลายของรูปทรงกรวยเชื่อมต่อกับภาชนะปลูกผลึกหลัก ซึ่งการก่อตัวของผลึกจะติดจากรูปทรง b และ c ภาพที่ 2.11- e จะมีรูปทรงที่เป็นกรวยเชื่อมผ่านส่วนของกระเปาะที่บานออกในปริมาณที่เหมาะสมผ่านคาปิลลารีไปยังปริมาตรหลักของภาชนะ ซึ่งภาชนะแบบนี้จะทำให้เกิดการก่อตัวขึ้นที่ปริมาตรทรงกรวยเล็กๆผ่านกระเปาะเพื่อเพิ่มโอกาสการเกิดผลึกเดี่ยวในกระเปาะเล็ก ๆ ซึ่งเหมือนกับการใช้ผลึกล่อบริเวณปลายภาชนะรูปกรวย



ภาพที่ 2.11 ลักษณะภาชนะบรรจุสารที่มีปลายแหลมรูปทรงที่แตกต่างกัน

กระบวนการเตรียมผลึกเชิงเดี่ยวแบบบริดจ์แมนจัดเป็นการเตรียมผลึกขึ้นจากสภาวะหลอมเหลวของสารการเกิดผลึกจากการหลอมจะทำให้ได้ผลึกเดี่ยวที่มีความเป็นผลึกสูง เทคโนโลยีที่ใช้ในการเตรียมจะซับซ้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อความดันไอและอุณหภูมิขณะเตรียมมีค่าสูง และเงื่อนไขการควบคุมอุณหภูมิต้องการความแม่นยำอย่างมากเพื่อให้แน่ใจว่าผลึกที่ได้มีโครงสร้างมาตรฐานวิธีการที่เป็นพื้นฐานมากที่สุดคือทำให้วัสดุที่หลอมเย็นตัวลง เช่นการเตรียมผลิตภัณฑ์บางตัวจะทำให้เย็นตัวอย่างช้า ๆ โดยมีโปรแกรมการลดอุณหภูมิเป็นตัวควบคุม โดยวิธีนี้ภาชนะที่ใช้ในการหลอมจะต้องไม่ติดกับวัสดุที่หลอมเพื่อจะสามารถนำผลึกออกได้ง่ายและช่วยลดความเค้น (stress) ในผลึกซึ่งอาจเกิดจากสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนไม่เท่ากัน ดังนั้นภาชนะที่ใช้จะต้องเป็น แกรไฟต์ (graphite) หรือแพลตตินัม (platinum) ซึ่งการปลูกผลึกด้วยวิธีนี้สารที่บรรจุอยู่ในภาชนะจะถูกหย่อนลงตามแนวตั้งอย่างช้า ๆ ดังนั้นส่วนที่หลอมซึ่งอยู่ต่ำสุดในภาชนะจะก่อตัวเป็นผลึกก่อน การเกิดนิวเคลียสของผลึก (nucleation) ที่ปลายของภาชนะมีความสำคัญมาก และมีผลจากรูปร่างของภาชนะ นอกจากนี้ที่ปลายภาชนะอาจใส่ผลึกล่อ (seed) ไว้ โดยทั่วไปถ้าภาชนะยังเคลื่อนที่ช้าผลึกที่ได้ก็ยังมีคุณภาพสูง ซึ่งอัตราการเคลื่อนที่ของภาชนะที่นิยมใช้มากที่สุดจะอยู่ในช่วง 2 ถึง 10 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง การปลูกผลึกเดี่ยวโดยเทคนิคบริดจ์แมนแสดงในภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 แผนภาพการเตรียมผลึกเดี่ยวด้วยเทคนิคแบบ บริดจ์แมน [20]

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Danails et al. (1953) [21] เป็นกลุ่มแรกที่ได้นำคุณสมบัติเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ มาใช้เป็นเครื่องมือวิจัยเพื่อ วัดปริมาตรรังสีและยังได้ศึกษาคำนวณค่า เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ จากถ่านหิน

Nakajima et al. (1979) [22] ได้ศึกษาคุณสมบัติของเครื่องวัดปริมาณรังสีที่เตรียมได้จาก LiF เจือด้วยสารแมกนีเซียมและคอปเปอร์ พบว่ามีความไวในการตอบสนองต่อรังสีดี โดย ผลึกจะให้แสงที่มีความยาวคลื่นใกล้ 410 นาโนเมตร แต่ถ้าเติมฟอสฟอรัสเข้าไปจะได้แสงที่มีความยาวคลื่นอื่นเพิ่มจากเดิมอีก 340 นาโนเมตร และเมื่อให้ความร้อนแก่ผลึกอย่างเหมาะสม ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที สารดังกล่าวมีความไวแสง (sensitivity) เทียบเท่ากับ CaSO_4 , CaF_2 และ MgSiO_4 ซึ่งมีคุณสมบัติดีกว่า TLD-100 ประมาณ 20-50 เท่าและมีความไวในการตอบสนองรังสีสูง นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยอีกมากที่ทำวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนา TLD ชนิด LiF : Mg, Cu, P [23] [24] [25] [26] [27] และ [28]

Takeo Niwa (1993) [29] ได้ประสบความสำเร็จในการเตรียมหัววัด ทีแอลดีชนิดลิเทียมฟลูออไรด์ แบบผลึกเดี่ยว ซึ่งผลึกเดี่ยวที่ได้มีลักษณะใสจึงไม่ดูดกลืนแสงในตัวเอง และมีประสิทธิภาพในการ วัดรังสีสูงเขาได้ใช้สารตั้งต้น ลิเทียมฟลูออไรด์ ที่มีความบริสุทธิ์สูง 99.99 เปอร์เซ็นต์ และใช้สารเจือ 2 ตัว คือ $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ หรือ Li_3PO_4 ในสถานะแกรไฟต์ ปลายแหลมที่แขวนอยู่ในห้องสุญญากาศความดัน 10^{-2} Torr ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส ด้วยเตาหลอมแบบท่อซึ่งควบคุมให้ เคลื่อนที่ในแนวตั้งด้วยความเร็ว 2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ใช้เวลาในการปลูกทั้งหมด 30 ชั่วโมง จากนั้นลดอุณหภูมิลงที่ 700 องศาเซลเซียส แล้วทิ้งไว้อีก 50 ชั่วโมง พบว่าการกระจายตัวของสารเจือทั้งสามชนิดไม่สม่ำเสมอ และผลึกที่ได้มีพิคหลักอยู่ที่ 200 องศาเซลเซียส และมีความเป็นเชิงเส้นต่อรังสีในช่วง 10^{-6} - 10^{-3} C.kg⁻¹

S.H.Doh (1980) [30] ประเทศเกาหลีใต้ มี การพัฒนาผลึกลิเทียมฟลูออไรด์ที่เจือด้วยแมกนีเซียม คอปเปอร์ โซเดียม และ ซิลิกอน โดยในการทำการทดลองจะใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารเจือเป็นช่วงกว้าง ๆ คือใช้สารเจือแมกนีเซียม 0.6 โมลเปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ 0.8 โมลเปอร์เซ็นต์ และโซเดียม และ ซิลิกอน 1.8 โมลเปอร์เซ็นต์ ซึ่งคุณสมบัติในการตอบสนองต่อรังสีของ ทีแอลดีชนิดนี้สามารถตอบสนองต่อ รังสีได้ดีในช่วงที่พลังงานต่ำๆ และปริมาณแสงที่ปล่อยออกมาจะสูงกว่า LiF : Mg, Cu, P ประมาณ 2 เท่า ที่พลังงาน 30 keV ของ ⁶⁰Co

P. Bilski et al. (1996) [31] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ของ โกลว์เคิร์ฟ และคุณสมบัติต่างๆ ของการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ พบว่าแมกนีเซียม ที่ใช้เป็นสารเจือมีอิทธิพลสำคัญต่อความไว (sensitivity) ในการตอบสนองทางรังสี ซึ่งผลึก LiF: Mg, Cu, Na, Si จะเตรียมได้จากสถาบัน (Korea Atomic Energy Research: KAERI) นำไปซินเตอร์ในเตาให้ความร้อนอุณหภูมิ 800 องศา

เซลล์ซีเอสที บรรยากาศในโตรเจน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีผลึกมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร ความหนา 0.8 มิลลิเมตร [32] จากนั้นนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับเม็ดผลึกมาตรฐาน ตามมาตรฐานทางการค้าที่ยอมรับว่า มีค่าความไวในการตอบสนองทางรังสีสูง คือ MCP-N (LiF:Mg, Cu, P) จากบริษัท TLD Niewiadomski จำกัด นับจากนั้นเป็นต้นมาทีแอลดีประเภทนี้ ได้ถูกพัฒนาโดยจากหลาย ๆ สถาบันวิจัย อาทิ ในประเทศจีน สถาบันวิจัย Solid Dosimetric Detector and Method Laboratory ศึกษาคุณสมบัติเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ และอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการแอนนัล คือ 240 ถึง 270 องศาเซลเซียส เมื่อนำผลมาเทียบกับ MCP-N (LiF : Mg,Cu,P)

J. I. Lee et al. (2004) [12] ประเทศเกาหลีใต้ได้มีก ารวิจัยและพัฒนาทีแอลดีชนิด LiF : Mg, Cu, Na, Si เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งาน โดยเติมปริมาณความเข้มข้นของสารสารเจือแมกนีเซียม 0.2 โมลเปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ และ โซเดียม และ ซิลิกอน 0.90 โมลเปอร์เซ็นต์ ทำการเตรียมโดยการผสมสารเคมี ให้เข้ากันและนำไปให้ความร้อนในเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของ ลิเทียมฟลูออไรด์เป็นเวลา 30 นาที ภายใต้บรรยากาศในโตรเจน และปล่อยให้เย็นอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำผลึกดังกล่าวไปบดและอัดเป็นเม็ดมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4.5 มิลลิเมตร หนา 0.8 มิลลิเมตร และนำไปซินเตอร์ด้วยเตาไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 785 ถึง 832 องศาเซลเซียส หลังจากที่ผลึกเย็นตัวลงจึงแอนนัลต่อที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส พบว่าลักษณะของ โกลว์เคิร์ฟ และความไวในการตอบสนองทางรังสีมีคุณสมบัติเหมือนกับทีแอลดีชนิด GR-200A ต่อมาจึงถูกนำมาพัฒนาเป็น เครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคลโดย Kaiyong Tang [33] ได้ถูกพัฒนาขึ้นจากการเติมปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ อ โดยใช้สารเจือโซเดียม 0.00 ถึง 0.45 โมลเปอร์เซ็นต์ และแอนนัลที่อุณหภูมิประมาณ 240 ถึง 310 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อค่อย ๆ เพิ่มปริมาณความเข้มข้นของ โซเดียมทำให้ทีแอลดีมีความไวในการตอบสนองทางรังสีสูงตามที่ปรากฏในพิคหลัก แต่เมื่อลดอุณหภูมิในการแอนนัลน้อยกว่า 300 องศาเซลเซียส หรือเพิ่มอุณหภูมิในการแอนนัล จะทำให้ตำแหน่งของพิคหลักจะเลื่อนออกไป ดังนั้นสรุปได้ว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการแอนนัล มีผลต่อความสูงของพิค จากนั้น Haiyong Jung และคณะ [34] ได้ทำการวิจัยและผลิตทีแอลดี ส่วนบุคคลชนิดใหม่จาก LiF : Mg, Cu, Na, Si โดยใช้โปรตอนเป็นตัวกระตุ้นพลังงาน โดยผลึกหัววัดชนิดนี้จะมีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่น คือ เป็นทีแอลดีแบบผลึกผงที่ถูกนำมาขึ้นรูปโดยการอัดเม็ดและเพิ่มความคงทนโดยผ่านกระบวนการซินเตอร์ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิประมาณ 830 องศาเซลเซียส ซึ่งระบบ Badge ของทีแอลดี ออกแบบ Filter Badge โดยยึดหลักการแผ่รังสีแบบ Monte Carlo Simulation ซึ่งมีคุณสมบัติเฉพาะตัวอยู่ที่ energy response และ angular dependence โดยทำการทดสอบผ่านการแผ่รังสีของโพตอนตามมาตรฐาน ISO ของโดส (dose) ระหว่างค่า 0.78-1.08

J. L. Kim et al. (2008) [13] ประเทศเกาหลีใต้ได้มีการวิจัยและพัฒนาที่แอลดีชนิด LiF: Mg, Cu, Si โดยเติมปริมาณความเข้มข้นของสารเจือแมกนีเซียม 0.2 โมลเปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ และซิลิกอน 0.9 โมลเปอร์เซ็นต์ โดยใช้วิธีการเตรียมแบบซินเตอร์ (Sintering) เป็นวิธีการเตรียมที่ได้ผลึกโพลี (Poly Crystal) พบว่าที่แอลดี ชนิดใหม่นี้มีข้อดีกว่าชนิดเก่าอยู่หลายประการ เช่น มีความไวในการตอบสนองต่อรังสีดีกว่า TLD-100 (LiF: Mg, Ti) ถึง 55 เท่า และเมื่อทำการแอนนัลด้วยเทคนิคแบบ Dual-Step Thermal treatment จะทำให้ผลึกโพลีที่มีตำแหน่งฟิคหลักที่ประมาณ 250 องศาเซลเซียส และเมื่อนำมาแอนนัลด้วยอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ก่อนการนำงานซ้ำ พบว่าคุณสมบัติความเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์และโครงสร้าง โกลว์เคิร์ฟไม่เปลี่ยนแปลงแม้ถูกนำมาใช้งานซ้ำ ๆ

V. Chernov et al. (1998) [14] ได้ทำการปลูกผลึกที่แอลดีชนิด LiF: Mg, LiF: Mg, Cu และ LiF: Mg, Cu, P ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกเชิงเดี่ยวแบบบริดจ์แมน- สต็อกบาร์เจอร์ซึ่งมีปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ CuF_2 0.005 ถึง 0.1 โมลเปอร์เซ็นต์ MgF_2 0.05 ถึง 0.03 โมลเปอร์เซ็นต์และ $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ 2.5 โมลเปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาคุณสมบัติการเรืองแสงด้วยความร้อนและการดูดกลืนในย่าน UV-VIS (1.5-6.5 eV) เมื่อให้ความร้อนจากอุณหภูมิห้องถึง 400 องศาเซลเซียส ของผลึกเดี่ยว LiF: Mg, LiF: Mg,Cu และ LiF: Mg,Cu,P เพื่อให้เกิดความเข้าใจในขบวนการเกิด เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ ในหัววัดรังสีที่มีลิเทียมฟลูออไรด์เป็นสารหลัก พบว่าสเปกตรัมการดูดกลืนของผลึก LiF: Mg, Cu และ LiF: Mg, Cu, P มีลักษณะเหมือนกัน คือ อยู่ในช่วง 1.5 ถึง 6.0 eV ที่อุณหภูมิห้องถึง 200 องศาเซลเซียส โดยคอปเปอร์มีส่วนต่อการเกิดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงที่ย่านพลังงานสูง ความแตกต่างที่เกิดขึ้นในผลึกที่เจือด้วย แมกนีเซียม กับคอปเปอร์ แมกนีเซียม คอปเปอร์ และฟอสฟอรัส กับผลึกที่เจือด้วยแมกนีเซียมเพียงอย่างเดียวอยู่ที่การสลายตัวที่ต่างกันของแถบพลังงานที่เหนี่ยวนำขึ้นโดยรังสีที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส ในผลึกที่เจือ แมกนีเซียมกับคอปเปอร์ แมกนีเซียมคอปเปอร์ และฟอสฟอรัส แถบพลังงาน 4.0 และ 5.0 eV จะสลายพร้อมกันกับแถบที่ 4.0 eV และที่อุณหภูมิสูงกว่า 250 องศาเซลเซียส จะเริ่มเกิดแถบพลังงาน 4.0 และ 4.5 eV นอกจากนี้แถบพลังงาน 5.5 eV พบในผลึกที่เจือด้วยแมกนีเซียม เพียงอย่างเดียวเท่านั้นและการสลายตัวของแถบพลังงานลดลงอย่างรวดเร็วในผลึกที่เพิ่มสารเจือต่างชนิดมากขึ้นตามลำดับ

T.C. Chen et al. (1997) [9] ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของการแอนนัลต่อค่าพารามิเตอร์กับดักลังงานจลน์ของที่แอลดีชนิด LiF: Mg, Cu, P โดยได้ทำการศึกษาและเปรียบเทียบกับ ที่แอลดี 3 ชนิด ที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ คือ MCP-N ที่เป็นแบบเม็ด (ประเทศโปแลนด์) GR-200 ที่เป็นแบบแท่ง (ประเทศจีน) และผลึกเชิงเดี่ยวของ Dr. T. Niwa (ประเทศญี่ปุ่น) พบว่าที่แอลดีทั้ง 3 ชนิด มีฟิคหลัก 2 ฟิค คือฟิค 4 และ ฟิค 5 และจากการคำนวณหาค่ากับดักลังงานจลน์ลำดับที่หนึ่งโดยใช้

โมเดลของ ได้ผลการทดลองดังนี้ กลุ่มตัวอย่างของ MCP และ GR-200 จะแสดงสัญญาณการเปลี่ยนตำแหน่งของอนุกรม มีพีคหลักโดยตำแหน่งพีคหลักและ ค่าพารามิเตอร์กับดักพลังงานจลน์ หลังจากทำการแอนนัลที่อุณหภูมิสูงกว่า 260 องศาเซลเซียส และค่าของ activation energy (E) และ frequency factor (s) จะมีการลดลงเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิของการแอนนัลที่สูงขึ้นตามลำดับ

จากปี พ.ศ. 2542 จนถึง พ.ศ. 2551 จินตนา เหล่าไพบูลย์และคณะ ของมหาวิทยาลัย อุบลราชธานี ได้ทำการศึกษาคิดค้น และวิจัยพัฒนาเครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคล เป็นผลึกเชิงเดี่ยว ชนิด LiF: Mg, Cu, P [15] [16] [17] [18] และ [19] ด้วยเทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมนพบว่า ปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่ใส่ที่เหมาะสมในการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ คือใช้แมกนีเซียม 0.60 โมลเปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ 0.06 โมลเปอร์เซ็นต์ และฟอสฟอรัส 0.1 โมลเปอร์เซ็นต์ ซึ่งลักษณะโกลเดิลที่ ได้มีตำแหน่งพีคหลักอยู่ที่ประมาณ 250 องศาเซลเซียส และมีความไวในการตอบสนองทางรังสีสูง จึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำมาพัฒนาเป็นเครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคลที่ใช้ งานในด้านการวัดทางรังสี อีกทั้งยังได้ทำการวิจัยเบื้องต้นในการพัฒนาเครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคลเป็นผลึกเชิงเดี่ยวชนิด LiF: Mg, Cu, Na, Si [20] พบว่า ที่ปริมาณความเข้มข้นสารเจือที่ใส่ที่เหมาะสมในการเกิดเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ คือใช้แมกนีเซียม 0.20 โมลเปอร์เซ็นต์ คอปเปอร์ 0.05 โมลเปอร์เซ็นต์ โซเดียมและซิลิกอน 0.15 โมลเปอร์เซ็นต์

จากข้อมูลดังกล่าวที่แอลดีชนิดนี้จึงมีความน่าสนใจเป็นที่ จะ นำมาทำวิจัยและพัฒนา ต่อ โดยใช้เทคนิคการเตรียมที่ต่างจากกลุ่มวิจัยในประเทศเกาหลี คือ การเตรียมที่แอลดีด้วยเทคนิคบริดจ์แมน [21] ซึ่งผู้วิจัยคาดหวังว่าจะได้คุณสมบัติที่แตกต่างจากเดิม ทั้งนี้เนื่องจากเป็นเทคนิคที่จัดโครงสร้าง unit cell ของลิเทียมฟลูออไรด์ให้ เป็นระเบียบมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนภายในอะตอมและคุณสมบัติความเป็นเทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ เพื่อให้ได้ข้อมูลในการพัฒนาเครื่องวัดรังสีประจำตัวบุคคลต่อไป