

การพัฒนากระบวนการอย่างง่ายในการปลูกผักชีเชื่อมไอโอไดด์ (ทดลอง)



นายมานิตย์ จิตรภักดี

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2546

ISBN 974-17-5172-9

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

DEVELOPMENT OF A SIMPLE PROCESS FOR GROWING CsI(Tl) CRYSTAL



Mr. MANIT JITPUKDEE

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering in Nuclear Technology

Department of Nuclear Technology

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2003

ISBN 974-17-5172-9

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การพัฒนากระบวนการอย่างง่ายในการปลูกผักชีเขียวไฮโดรโปนิกส์ (ทัลเลียม)
โดย	นายมานิตย์ จิตรภักดี
สาขาวิชา	นิเวศวิทยาระบบเทคโนโลยี
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อาจารย์เคโซ ทองอร่าม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ณรงค์ จันทน์ขาว)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัยยะ)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(อาจารย์เคโซ ทองอร่าม)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล เดี่ยวฉิมชัย)

นายมานิตย์ จิตรภักดี : การพัฒนากระบวนการอย่างง่ายในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม). (DEVELOPMENT OF A SIMPLE PROCESS FOR GROWING CsI(Tl) CRYSTAL) อ.ที่ปรึกษา : ผศ. สุวิทย์ ปุณณชัยยะ, อ. ที่ปรึกษาร่วม : อ. เดโช ทองอร่าม จำนวน 79 หน้า. ISBN 974-17-5172-9.

ได้พัฒนากระบวนการอย่างง่ายในการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) [CsI(Tl)] ด้วยวิธีการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (Bridgman-Stockbarger) โดยใช้สารเริ่มต้นเป็นผงซีเซียมไอโอไดด์ความบริสุทธิ์ 99.9% ผสมกับสารทัลเลียมไอโอไดด์ความบริสุทธิ์ 99.999% บรรจุในภาชนะปลูกผลึกที่ทำด้วยแก้วไวคอร์ (Vycor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และแขวนอยู่ในท่อปลูกผลึกระบบปิดที่ทำด้วยท่อเหล็กกล้าไร้สนิมภายใต้การอัดก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% ความดัน 2 บรรยากาศ จากการทดลองแปรเปลี่ยนเงื่อนไขของสัดส่วนสาร แกรเดียนท์ของอุณหภูมิ และอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก ณ บริเวณโซนปลูกผลึกที่เหมาะสม ผลการปลูกผลึกพบว่า สามารถควบคุมคุณภาพของผลึกให้มีสารเจือทัลเลียมที่ความเข้มข้นอยู่ระหว่างร้อยละ 0.0256 – 0.0806 โดยโมล เมื่อนำผลึกที่ปลูกได้ประกอบกับฟิโนโฟโตไดโอดของบริษัท Hamamatsu รุ่น S3590-8 เพื่อใช้เป็นหัววัดเรืองรังสี สำหรับวัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมาพบว่าผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) ความหนา 8 มิลลิเมตร ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน 15.48 % ที่พลังงาน 662 keV นอกจากนี้ยังทดลองใช้ผลึกที่ปลูกได้ความหนา 8 มิลลิเมตร และ 4 มิลลิเมตร ประกอบกับหลอดไวแสงชนิดทิวคูณอิเล็กทรอนิกส์ของบริษัท RCA รุ่น 5819 วัดสเปกตรัมของรังสีแกมมา พบว่าให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน 13.67% ที่พลังงาน 662 keV และ 34.18% ที่พลังงาน 59.6 keV ตามลำดับ ซึ่งให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผลึกที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาควิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่อนิติ.....
สาขาวิชา	นิวเคลียร์เทคโนโลยี	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....
ปีการศึกษา	2546	ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4370450621 : MAJOR NUCLEAR TECHNOLOGY

KEY WORD: CESIUM IODIDE CRYSTAL / CESIUM IODIDE (THALLIUM) CRYSTAL /
SCINTILLATOR / SCINTILLATION DETECTOR / CRYSTAL GROWING

MANIT JITPUKDEE : DEVELOPMENT OF A SIMPLE PROCESS FOR GROWING
CsI(Tl) CRYSTAL. THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SUVIT PUNNACHAIYA,
THESIS CO-ADVISOR: DECHO TONG-ARAM, 79 pp. ISBN 974-17-5172-9.

A CsI(Tl) scintillation crystal was grown under a simple developed process using the Bridgman-Stockbarger method. The 99.9% purity CsI powder and 99.999% purity Tl powder were mixed and charged in a 10 mm inner diameter vycor crucible. The crucible was hanged in a closed system of stainless steel growth tube under 99.999% purity pressurized Argon gas at 2 atm. By varying the experimental parameters of a mixing ratio compound elements, gradient temperature and a moving rate of growth tube. Those parameters were applied at the suitable condition of the crystal growing zone. It was found that the concentration of doped Tl in CsI growth crystal can be controlled in a range of 0.0256 – 0.0806 mol%. The developed CsI(Tl) crystal was tested by coupling with the Hamamatsu P-I-N photodiode model S3590-8, assembled as a scintillation detector, for gamma spectrum analyzing. The tested results shown an energy resolution of 15.48% at 662 keV for 8 mm thickness of CsI(Tl) crystal. Beside, the energy resolution of 13.67% at 662 keV and 34.18% at 59.6 keV were found when a growth crystal at the crystal thickness of 8 mm and 4 mm were coupled with the RCA photomultiplier tube model 5819, respectively. The results were compatible to a commercial crystal.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

Department Nuclear Technology

Student's signature.....

Field of study Nuclear Technology

Advisor's signature.....

Academic year 2003

Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวิทย์ ปุณณชัชยะ อาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์เดโช ทองอร่าม อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางการทำงานวิจัย สนับสนุน และตรวจแก้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้จนสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อิทธิพล เดี่ยวฉิมชัย ภาควิชาวิศวกรรมโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำปรึกษาด้านเทคนิค และ อาจารย์ณฤพวิจัก์ เงินวิจิตร คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชารังสีประยุกต์และไอโซโทป มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการตรวจวิเคราะห์ธาตุ

ขอขอบคุณ คุณบัญชา อุนพานิช ที่ให้คำแนะนำและช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

ขอขอบคุณเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้คำแนะนำเพิ่มเติมสำหรับการทำงาน

สุดท้ายขอขอบคุณทบวงมหาวิทยาลัยที่สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยในครั้งนี้เป็นอย่างสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
บทที่	

1. บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย.....	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3

2. ทฤษฎี

2.1 การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	5
2.1.1 ส่วนประกอบของระบบการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน- สต็อกบาร์เกอร์.....	7
2.1.2 กระบวนการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	9
2.2 ผลึกวัตรังสีชนิดซินทิลเลชันประเภทสารอินทรีย์.....	15
2.2.1 การเปล่งประกายแสงของผลึกวัตรังสีชนิดซินทิลเลชัน.....	16
2.2.2 คุณสมบัติที่ดีของผลึกวัตรังสี.....	19

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 หัววัดเรื่องรังสีและฟินโฟโตไดโอด.....	20
2.3.1 ฟินโฟโตไดโอด.....	23
2.3.2 หัววัดเรื่องรังสีชนิด CsI(Tl) ฟินโฟโตไดโอด.....	26
3. การพัฒนากระบวนการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม)	
3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบปลูกผลึก.....	30
3.2 การพัฒนาเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	32
3.2.1 ชุดเตาหลอมแบบ 2 โชน	32
3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ.....	34
3.2.3 ระบบบันทึกข้อมูลและเส้นกราฟอุณหภูมิ.....	36
3.2.4 ท่อปลูกผลึก.....	37
3.2.5 ระบบสุญญากาศและควบคุมความดันก๊าซในท่อ.....	37
3.2.6 ระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก.....	38
3.2.7 ภาชนะปลูกผลึก.....	39
3.3 การออกแบบอุปกรณ์ทดสอบการตอบสนองการวัดรังสีของผลึก CsI(Tl)	40
3.3.1 การประกอบอุปกรณ์ทดลองผลึกวัดรังสี.....	40
3.3.2 ระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสี.....	41
4. การทดลองและผลการทดลอง	
4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก.....	42
4.1.1 การทดสอบผลตอบสนองการเข้าสู่สถานะเสถียรของอุณหภูมิ.....	43
4.1.2 การทดสอบเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ.....	43
4.2 การทดลองปลูกผลึก.....	45
4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	45
4.2.2 การเตรียมสารปลูกผลึก.....	45
4.2.3 การปลูกผลึกด้วยกระบวนการแบบบริดจ์แมนชนิดแนวตั้ง.....	46
4.2.4 ผลการปลูกผลึก.....	47

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.3 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึก.....	49
4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกเดี่ยว.....	49
4.3.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณสารเจือทล่เลียมในผลึก.....	51
4.4 การวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงาน.....	51
4.4.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง.....	52
4.4.2 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานด้วยผลึก CsI(Tl) ประกอบกับ PMT	52
4.4.3 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานด้วยผลึก CsI(Tl) ประกอบกับฟีนโทไดโอด.....	54
4.4.4 ประสิทธิภาพการเปล่งประกายแสงของผลึก.....	55
5. สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย	
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	56
5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย.....	57
5.3 ข้อเสนอแนะ.....	57
รายการอ้างอิง.....	59
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก. แสดงความปลอดภัยในการใช้สารเคมี.....	61
ภาคผนวก ข. คุณสมบัติของซีเซียมไอโอดด์.....	66
ภาคผนวก ค. แสดงคุณสมบัติของขดลวดความร้อน.....	69
ภาคผนวก ง. แสดงคุณสมบัติของอิฐทนไฟ.....	72
ภาคผนวก จ. แสดงข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมแบบพีไอดี.....	73
ภาคผนวก ฉ. แสดงข้อมูลทางเทคนิคของฟีนโทไดโอด.....	75
ภาคผนวก ช. การวิเคราะห์ปริมาณแทลเลียมโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์.....	77
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	79

สารบัญตาราง

ตาราง	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกซิงทิลเลชันชนิดสารอนินทรีย์.....	16
ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) ชนิดต่างๆ.....	19
ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติการตอบสนองความยาวคลื่นของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ.....	22
ตารางที่ 4.1 แสดงเกรเดียนท์ของอุณหภูมิจากการทดลองใช้เบรฟเฟิลเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร.....	44
ตารางที่ 4.2 ปริมาณของส่วนผสมของสารที่ใช้ในการปลูกผลึก.....	46
ตารางที่ 4.3 ผลของการปลูกผลึก CsI(Tl).....	48
ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณสารเจือทลเลียมในผลึก CsI(Tl).....	51

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 2.1 ระบบการปลูกผลึกแบบ Verneuil	5
รูปที่ 2.2 ระบบการปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์.....	6
รูปที่ 2.3 แสดงรูปทรงภาชนะปลูกผลึกแบบต่างๆ	8
รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระเทียบกับรัศมีของนิวเคลียสของโลหะบริสุทธิ์.....	10
รูปที่ 2.5 แสดงการก่อตัวแบบ Heterogeneous nucleation.....	11
รูปที่ 2.6 การเกิดความบกพร่องของผลึก ไอออนิกแบบ Schottky และ Frenkel imperfection.....	13
รูปที่ 2.7 การเกิดความบกพร่องแบบ Dislocation.....	14
รูปที่ 2.8 การเกิดความบกพร่องแบบ Planar defect.....	14
รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการเรียงแสงของผลึกวัตรังสี.....	17
รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นที่ปล่อยออกมาของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอินทรีย์.....	17
รูปที่ 2.11 ตัวอย่างภาพโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ.....	20
รูปที่ 2.12 สเปกตรัมย่านตอบสนองความยาวคลื่นของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ.....	21
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของพินโฟโตไดโอด.....	24
รูปที่ 2.14 แสดงวงจรเทียบเท่าของพินโฟโตไดโอด.....	25
รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นของผลึกวัตรังสีเทียบกับการตอบสนองของ พินโฟโตไดโอด.....	26
รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของผลึก CsI ที่ความหนาและพลังงานต่างๆ.....	27
รูปที่ 2.17 แสดงประสิทธิภาพของวัสดุสะท้อนแสงชนิดต่างๆ.....	29
รูปที่ 2.18 การประกอบผลึกวัตรังสีกับพินโฟโตไดโอด.....	29
รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ที่พัฒนาขึ้น.....	31
รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของร่องบรรจุคลวดความร้อนทรงกระบอกที่บรรจุคลวดความร้อน...32	32
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของชุดเตาหลอม.....	34
รูปที่ 3.4 แผนภาพวงจรควบคุมเตาหลอม.....	35
รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของเตาปลูกผลึก.....	35
รูปที่ 3.6 แผนผังการอ่านค่าอุณหภูมิ.....	36
รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของท่อปลูกผลึก.....	37
รูปที่ 3.8 แสดงระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก.....	38
รูปที่ 3.9 เตาปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น.....	39

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
รูปที่ 3.10 แสดงการประกอบ PMT กับผลึก CsI(Tl)	40
รูปที่ 3.11 แสดงการประกอบ P-I-N Photodiode กับผลึก CsI(Tl).....	40
รูปที่ 3.12 การจัดระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสี.....	41
รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งของการอ่านอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก.....	42
รูปที่ 4.2 เส้นกราฟแสดงผลตอบสนองการเข้าสู่สถานะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลูกผลึก.....	43
รูปที่ 4.3 เส้นกราฟคุณลักษณะแอมพลิจูดของอุณหภูมิของเตาปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น เมื่อใช้แบบเฟลิกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร.....	44
รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของภาชนะบรรจุสารและรูปร่างผลึก.....	45
รูปที่ 4.5 การจัดตำแหน่งของภาชนะบรรจุสารในการปลูกผลึก.....	47
รูปที่ 4.6 ตัวอย่างผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ที่ปลูกขึ้น.....	48
รูปที่ 4.7 แสดงการตัดผลึกเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์.....	49
รูปที่ 4.8 ผลการตรวจวิเคราะห์ผลึก CsI(Tl) ที่ปลูกขึ้นด้วยเทคนิค XRD	50
รูปที่ 4.9 แผนภาพการจัดระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมา.....	52
รูปที่ 4.10 สเปกตรัมพลังงานของ Cs-137 จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้น.....	53
รูปที่ 4.11 สเปกตรัมพลังงานของ Am-241 จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้น.....	53
รูปที่ 4.12 สเปกตรัมพลังงานของ Cs-137 จากผลึก CsI(Tl) กับฟิโนโฟโตไดโอด.....	54
รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบตำแหน่งพีคพลังงานของ Cs-137 จากการวิเคราะห์พลังงาน ด้วยผลึก CsI(Tl) ที่มีสารเจือทลเลียมต่างกัน.....	55

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของปัญหา

หัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชัน (Scintillation detector) เป็นหัววัดรังสีชนิดหนึ่งที่น่าสนใจในกระบวนการตรวจวัดรังสีในด้านต่างๆ ได้แก่ งานที่เกี่ยวข้องกับการสร้างภาพถ่ายรังสีในอุตสาหกรรมและการแพทย์ งานตรวจวัดรังสีภาคสนาม งานวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุด้วยเทคนิคทางนิวเคลียร์ และระบบควบคุมคุณภาพผลิตภัณฑ์ทางอุตสาหกรรมด้วยเทคนิคนิวเคลียร์ เป็นต้น หัววัดรังสีประเภทนี้ประกอบด้วยส่วนประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ ผลึกวัดรังสีและอุปกรณ์ไวแสงชนิดหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ (PMT) โดยผลึกวัดรังสีจะต้องเลือกใช้ให้เหมาะสมกับคุณสมบัติของรังสี ในส่วนของอุปกรณ์ไวแสงชนิดหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์เป็นส่วนประกอบซึ่งมีราคาสูง แดกร้าวงายต้องการแรงดันไฟฟ้าไบอัสสูง ตลอดจนไวต่อการรบกวนของสนามแม่เหล็กและอุณหภูมิ จึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้งานอยู่บ้าง

เมื่อเทคโนโลยีโฟโตนิกส์ (Photonics) ก้าวหน้าขึ้น ไดโอดไวแสงได้รับการพัฒนาให้มีความไวต่อการตอบสนองแสงมากขึ้น จึงมีการนำพินโฟโตไดโอด (P-I-N Photodiode) มาใช้เป็นอุปกรณ์ไวแสงแทนหลอดทวิคูณอิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจาก มีขนาดเล็ก ไม่ไวต่อสนามแม่เหล็ก รบกวน ต้องการแรงดันไบอัสต่ำ และราคาถูกกว่า ดังนั้น ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยีจึงได้มีการศึกษาวิจัยความเป็นไปได้ในการพัฒนากระบวนการปลูกผลึกวัดรังสี โดยใช้สารในกลุ่มอัลคาไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halide) พบว่าสามารถจะปลูกผลึก CsI ได้ในห้องปฏิบัติการด้วยเครื่องมือที่ไม่ซับซ้อนมากนักและได้ปรับปรุงคุณสมบัติผลึกให้ตอบสนองการวัดรังสีเอกซ์ได้ ด้วยการเจือสารลงในผลึกครั้งแรกด้วยโซเดียม [CsI(Na)] อย่างไรก็ตามคุณสมบัติในการเกิดประกายแสงของผลึกดังกล่าวให้ความยาวคลื่นไม่เหมาะสมกับพินโฟโตไดโอดและเพื่อให้งานวิจัยที่ผ่านมาเกิดความต่อเนื่องและสัมฤทธิ์ผล จึงมีความสนใจที่จะพัฒนากระบวนการปลูกผลึกขึ้นใหม่เพื่อปรับแถบพลังงาน (Energy gap) ของสารประกอบ CsI ให้มีความยาวคลื่นอยู่ในย่านความไวของพินโฟโตไดโอด (540 nm) ด้วยการเจือสารทาลเลียมลงไป ผลึกที่จะพัฒนาขึ้นใหม่จากกระบวนการปลูกผลึกอย่างง่ายในห้องปฏิบัติการจะเป็นผลึก CsI(Tl) โดยจะทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ในการจัดระเบียบโครงสร้างผลึกให้เป็นผลึกเดี่ยวและการตอบสนองการวัดรังสีของผลึกที่ปลูกขึ้นจากกระบวนการนี้

1.2 วัตถุประสงค์

เพื่อพัฒนากระบวนการและทดลองปลูกผลึกวัตรังสีชนิด CsI(Tl) สำหรับประกอบกับฟิโนโพลีไดโอดให้เป็นหัววัตรังสีชนิดซินทิลเลชันขนาดเล็ก

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

1. พัฒนาอุปกรณ์การปลูกผลึก CsI(Tl) ด้วยวิธีของบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ แบบระบบปิดและกระบวนการวิธีปลูกผลึกอย่างง่าย
2. ทดลองปลูกผลึกและศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก เช่น แกรเดียนท์ของอุณหภูมิ และความเร็วในการเคลื่อนที่ของคอแลมน์ เป็นต้น
3. ทดสอบและเปรียบเทียบผลตอบสนองการวัตรังสีกับหัววัตรังสีชนิดเดียวกันที่ผลิตจากต่างประเทศ

1.4 ขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการวิจัย
2. ศึกษาคุณสมบัติของสารเริ่มต้นและความเป็นพิษในขั้นตอนการเตรียมสาร
3. พัฒนาอุปกรณ์และกระบวนการวิธีปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์
4. ทดลองปลูกผลึกและศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อคุณสมบัติของผลึก
5. ทดสอบและเปรียบเทียบผลตอบสนองการวัตรังสีกับหัววัตรังสีชนิดเดียวกันที่ผลิตจากต่างประเทศ
6. สรุปและเขียนวิทยานิพนธ์

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ได้กระบวนการปลูกผลึก CsI(Tl) อย่างง่ายทำได้ในห้องทดลองและกระบวนการดังกล่าวยังใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการปลูกผลึกวัตรังสีด้วยสารอื่นๆ อีก

1.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

- ปี ค.ศ. 1990 P. Schotanus, R. Kamermans และ P. Dorenbos จาก Delft University of Technology, The Netherlands ได้ศึกษาคุณสมบัติการวัดรังสีของผลึก CsI เปรียบเทียบกับ CsI(Tl) เมื่อเปลี่ยนความเข้มข้นของสารเจือທัลดียมระหว่าง 0.006 ถึง 0.3 เปอร์เซ็นต์โมล ด้วยการวัดรังสีแกมมา 662 keV ของ ^{137}Cs และอนุภาคแอลฟาของ ^{239}Pu โดยใช้หลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กตรอน (PMT) และซิลิคอนโฟโตไดโอด (Silicon photodiode) เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสง พบว่าผลึก CsI บริสุทธิ์มีประสิทธิภาพการให้แสงสูงสุด (Light yield) ที่ความยาวคลื่น 315 nm. ส่วน CsI(Tl) ให้ประสิทธิภาพการให้แสงสูงสุดด้วยความยาวคลื่น 550 nm. ที่ความเข้มข้น 0.03 เปอร์เซ็นต์โมลของທัลดียม เมื่อใช้ผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 18 mm. หนา 30 mm. ที่ความเข้มข้น 0.03 เปอร์เซ็นต์โมลของທัลดียม ทดสอบด้วยรังสีแกมมาและอนุภาคแอลฟา พบว่าโฟโตไดโอดจะให้จำนวนคู่อิเล็กตรอนและโฮล (Electron-hole pair) มากกว่าโฟโตอิเล็กตรอนจากหลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กตรอน แต่ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน (Resolution) ต่ำกว่าที่ระดับพลังงานเดียวกัน
- ปี ค.ศ. 2000 E. Fioretto, F. Innocenti, G. Viesti, M. Cinausero, L. Zuin, D. Fabris, M. Lunardon, G. Nebbia และ G. Prete จาก Laboratori Nazionali di Legnaro, Legnaro, Italy ได้ศึกษาผลของปริมาตรผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ขนาด 12.8 cm^3 , 37.5 cm^3 , 344.6 cm^3 และ 833 cm^3 ที่ใช้ร่วมกับซิลิคอนโฟโตไดโอดเพื่อตรวจสอบหาวัตถุที่สามารถระเบิดได้ ซึ่งโดยทั่วไปวัตถุที่สามารถระเบิดได้จะมีในโตรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ ดังนั้นจึงใช้นิวตรอนพลังงานต่ำ (Thermal neutron) เข้าไปทำอันตรกิริยากับนิวเคลียสของไนโตรเจน ซึ่งจะให้รังสีแกมมาออกมา (Prompt gamma) ที่ระดับพลังงาน 10.8 MeV พบว่าเมื่อปริมาตรของผลึก CsI(Tl) เพิ่มขึ้นสามารถวัดรังสีแกมมาระดับพลังงานสูงได้ดี ความสามารถในการแจกแจงพลังงานเทียบเท่าหรือดีกว่าผลึก NaI(Tl) ที่ใช้ร่วมกับหลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กตรอน ทั้งนี้ผลึก CsI(Tl) ที่ใช้ร่วมกับซิลิคอนโฟโตไดโอดมีราคาต่ำกว่า มีความเป็นเชิงเส้นในการตอบสนองพลังงานสูง ไม่ไวต่อการรบกวนของสนามแม่เหล็ก และมีขนาดเล็กกว่า

3. ปี พศ. 2538 วิญญู สกุลจรรยาพร ภาควิชานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทดลองปลูกผลึก CsI(Na) ด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (Bridgman-Stockbarger) โดยใช้ผงซีเซียมไอโอไดด์บริสุทธิ์เจือด้วยสารโซเดียมไอโอไดด์บริสุทธิ์ด้วยความเข้มข้น 0.2% - 0.3% โดยน้ำหนัก บรรจุในภาชนะปลูกผลึกทำด้วยควอทซ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มม. แขนงในท่อเหล็กกล้าไร้สนิมในระบบปิดภายใต้ความดัน 1 บรรยากาศของก๊าซอาร์กอน พบว่าผลึก CsI(Na) มีความใส ไม้ไวต่อความชื้นมาก ขัดผิวเรียบได้ง่าย เมื่อตัดผลึกให้มีความหนา 2 - 3 มม. มาประกอบกับหลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กทรอนิกส์ (PMT) เพื่อวัดสเปกตรัมของ Am-241 พบว่าความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 59.6 keV อยู่ในช่วง 26% - 28% แต่เมื่อประกอบกับฟิโนโตไดโอด ประสิทธิภาพการวัดรังสีต่ำมาก เนื่องจากความยาวคลื่นของประกายแสงไม่เหมาะสมกับความไวแสงของฟิโนโตไดโอด



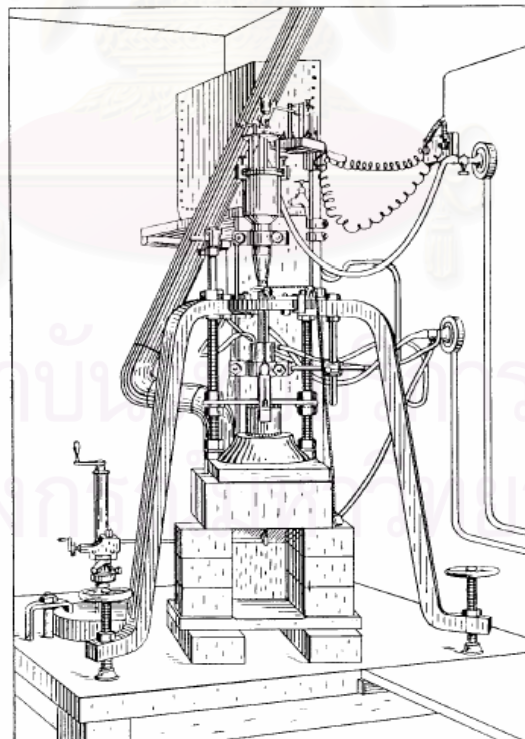
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎี

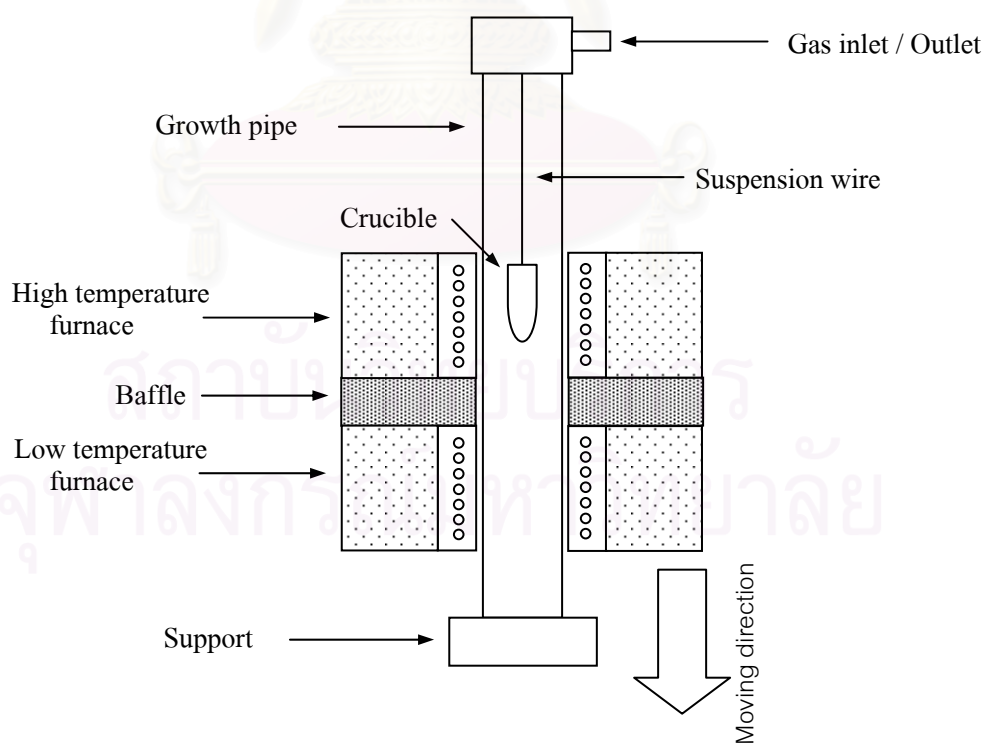
2.1 การปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

ในปี 1902 Verneuil สามารถปลูกผลึกในเชิงอุตสาหกรรมด้วยวิธี Flame – Fusion Growth ได้เป็นครั้งแรก โดยปลูกผลึกเดี่ยวของทับทิม (Ruby) และ บุษราคัม (Sapphire) ที่มีจุดหลอมเหลวประมาณ 2000°C และหลักการต่างๆ ของ Verneuil ไม่ว่าจะเป็น การก่อตัวของนิวเคลียส (Nucleation) อัตราการโตของผลึก และวิธีการควบคุมขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของผลึก นำไปสู่หลักการเบื้องต้นสำหรับวิธีการปลูกผลึกของ Tammann 1914, Bridgman 1923, Stöber 1925, Stockbarger 1936, Czochralski 1950 and Wilke-Bohm 1988 [1] ดังนั้น Verneuil จึงเป็นคนแรกที่ค้นพบเทคโนโลยีการปลูกผลึก อย่างไรก็ตามระบบการปลูกผลึกแบบ Czochralski ได้รับความนิยมมากที่สุดในปัจจุบัน เนื่องจากมีความเหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกในกลุ่มเซมิคอนดักเตอร์ ซึ่งเป็นกลุ่มที่ใช้งานในเชิงอุตสาหกรรมมากที่สุด



รูปที่ 2.1 ระบบการปลูกผลึกแบบ Verneuil [1]

เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ (Bridgman-Stockbarger Method) เป็นกระบวนการอย่างง่ายกระบวนการหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผลึกที่มีขนาดใหญ่ วิธีการปลูกผลึกพัฒนามาจากการปลูกผลึกเดี่ยวของ Bridgman โดยการทำให้สารหลอมเหลวแล้วปล่อยให้เย็นตัวลงอย่างช้าๆ ภายในภาชนะบรรจุสารหลอมเหลวเมื่อปี ค.ศ. 1925 ต่อมาในปี ค.ศ. 1936 Stockbarger ทำการปรับปรุงเทคนิคการปลูกผลึกของ Bridgman โดยการเคลื่อนภาชนะที่บรรจุสารหลอมเหลวผ่านเตาหลอมในแนวตั้ง เกิดจุดก่อตัวของผลึกที่ปลายสุดของภาชนะปลูกผลึก ซึ่งในผลึกบางชนิดอาจจำเป็นต้องใส่ผลึกเดี่ยวเริ่มต้น (Seed crystal) เพื่อทำให้เกิดผลึกได้ง่ายขึ้น ประมาณปี ค.ศ. 1958 บริษัท Harshaw และ Semi-Element ได้ใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ในการปลูกผลึกซิลเวอร์เฮไลด์ (Silver halide crystal) ของ AgCl และ AgBr ในลักษณะผลึกแท่ง (Ingots) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 นิ้ว ยาว 7 นิ้ว โดยใช้เตาหลอมแนวตั้งประกอบด้วยขดลวดความร้อน 2 ชุด ควบคุมอุณหภูมิให้อิสระจากกันพร้อมทั้งมีแผ่นกันเพื่อลดการรบกวนทางความร้อนระหว่างโซนของขดลวดทั้งสอง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 เตาหลอมส่วนบนจะคงอุณหภูมิไว้ที่ $10 - 15^{\circ}\text{C}$ เหนือจุดหลอมเหลวของซิลเวอร์เฮไลด์ ($\text{AgBr} = 434^{\circ}\text{C}$, $\text{AgCl} = 455^{\circ}\text{C}$) และเตาหลอมส่วนล่างคงอุณหภูมิไว้ที่ 400°C คงที่เกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient) ไว้ที่ $10^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ อัตราการโตของผลึก (Growth rate) อยู่ในช่วง 1 ถึง 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง [2]



รูปที่ 2.2 ระบบการปลูกผลึกเดี่ยวด้วยวิธีบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ [1]

2.1.1 ส่วนประกอบของระบบการปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

ระบบปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ได้พัฒนามาจากระบบปลุกผลึกแบบบริดจ์แมนชนิดแนวตั้งดั้งเดิม (Conventional Vertical Bridgman) มีส่วนประกอบที่สำคัญดังในรูปที่ 2.2 ดังนี้

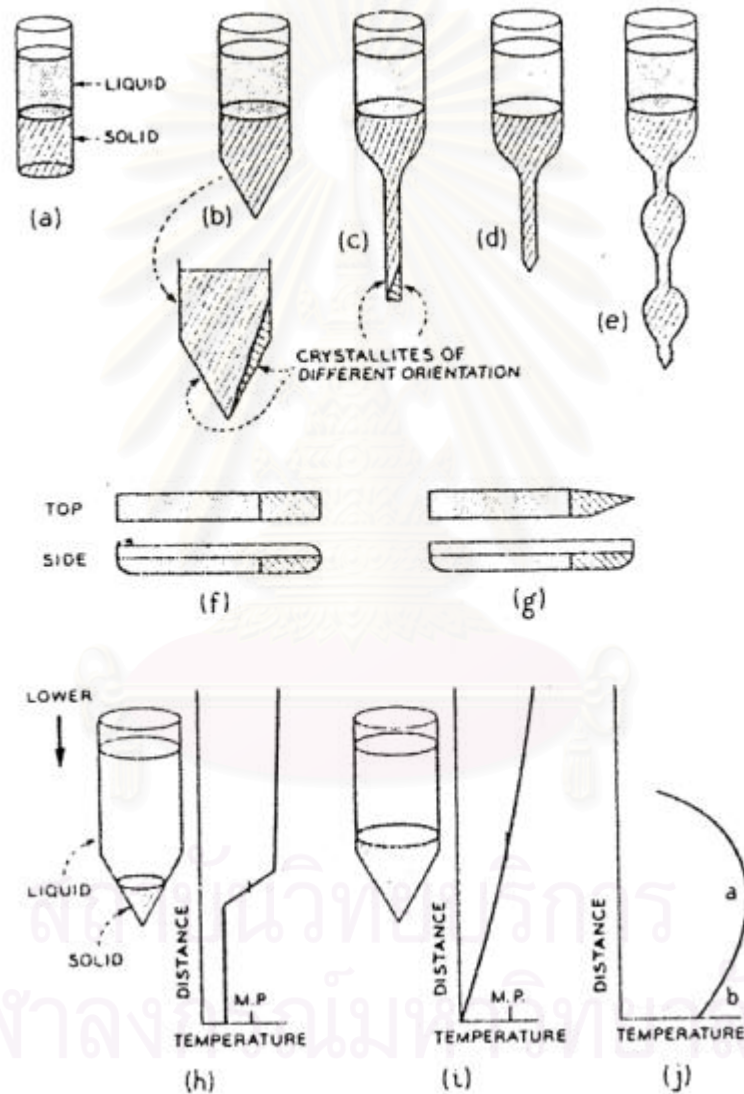
1. ชุดเตาหลอมและฉนวนกันความร้อน (Baffle)
2. ระบบควบคุมอุณหภูมิ
3. ท่อปลุกผลึก
4. ระบบควบคุมสุญญากาศและความดันก๊าซ
5. ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึก
6. ภาชนะปลุกผลึก

ชุดเตาหลอมปลุกผลึกมีลักษณะเป็นเตาหลอม 2 โซน แต่ละโซนกันด้วยฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการรบกวนความร้อนระหว่างกัน อุณหภูมิของเตาหลอมแต่ละโซนจะควบคุมอุณหภูมิด้วยระบบควบคุมอุณหภูมิอิสระจากกัน เพื่อจัดแกรเดียนต์ของอุณหภูมิให้มีโปรไฟล์เหมาะสมกับการก่อผลึกของสาร เตาหลอมส่วนบนซึ่งเป็นชุดอุณหภูมิสูง (High temperature furnace) จะออกแบบให้สามารถทำอุณหภูมิได้เหนือระดับจุดหลอมละลายของสารที่ต้องการปลุกผลึก

ท่อปลุกผลึกจะต้องเลือกวัสดุที่ทนต่ออุณหภูมิในการปลุกผลึก มีลักษณะเป็นท่อปลายปิดเพื่อลดผลการเคลื่อนตัวของอากาศบริเวณช่องว่างระหว่างท่อปลุกผลึกกับภาชนะปลุกผลึกและเกิดการพาความร้อน (Heat convection) อันจะกระทบต่อแกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่จัดไว้ ขณะเดียวกันระบบท่อปิดสามารถสร้างความดันสุญญากาศในระดับต่างๆ ภายในท่อปลุกผลึกบางครั้งสารปลุกผลึกมีการระเหยง่ายที่อุณหภูมิสูง ยังสามารถอัดก๊าซเฉื่อยให้สูงกว่าความดันบรรยากาศป้องกันการระเหยของสารได้ จึงมีการออกแบบระบบควบคุมความดันสุญญากาศและความดันก๊าซไว้กับท่อปลุกผลึกด้วย

ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึก เป็นกลไกสำคัญส่วนหนึ่งที่จะจัดอัตราการเคลื่อนที่ของบริเวณก่อผลึกของสารในภาชนะปลุกผลึกให้เคลื่อนที่ผ่านบริเวณแกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่จัดไว้ด้วยอัตราที่เหมาะสมกับอัตราการก่อผลึก และกลไกในการขับเคลื่อนจะต้องออกแบบให้มีการสิ้นเปลืองต่อภาชนะปลุกผลึกน้อยที่สุดและมีความสม่ำเสมอในการเคลื่อนที่ ซึ่งอาจเป็นระบบ pneumatic ระบบเฟืองทด หรือระบบสกรู เป็นต้น อย่างไรก็ตามในระบบปลุกผลึกขนาดเล็ก อาจจัดให้ชุดเตาหลอมเคลื่อนที่แทนการเคลื่อนที่ของท่อปลุกผลึก

ภาชนะปลูกผลึก มักจะเลือกใช้วัสดุที่ทนต่ออุณหภูมิในการปลูกผลึกและต้องไม่มีสารแปลกปลอมที่สามารถทำปฏิกิริยาทางเคมีกับสารที่ปลูกผลึก เนื่องจากผิวของภาชนะจะสัมผัสโดยตรงกับสารปลูกผลึก ขณะเดียวกัน ภาชนะปลูกผลึกในกระบวนการที่อาศัยการก่อผลึกเดี่ยวในตัวเอง จะต้องออกแบบมุมกันของภาชนะให้เหมาะสมกับสารและอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก ซึ่งในงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการออกแบบรูปทรงของปลายภาชนะปลูกผลึกในรูปแบบและมุมที่ต่างกัันดังในรูปที่ 2.3



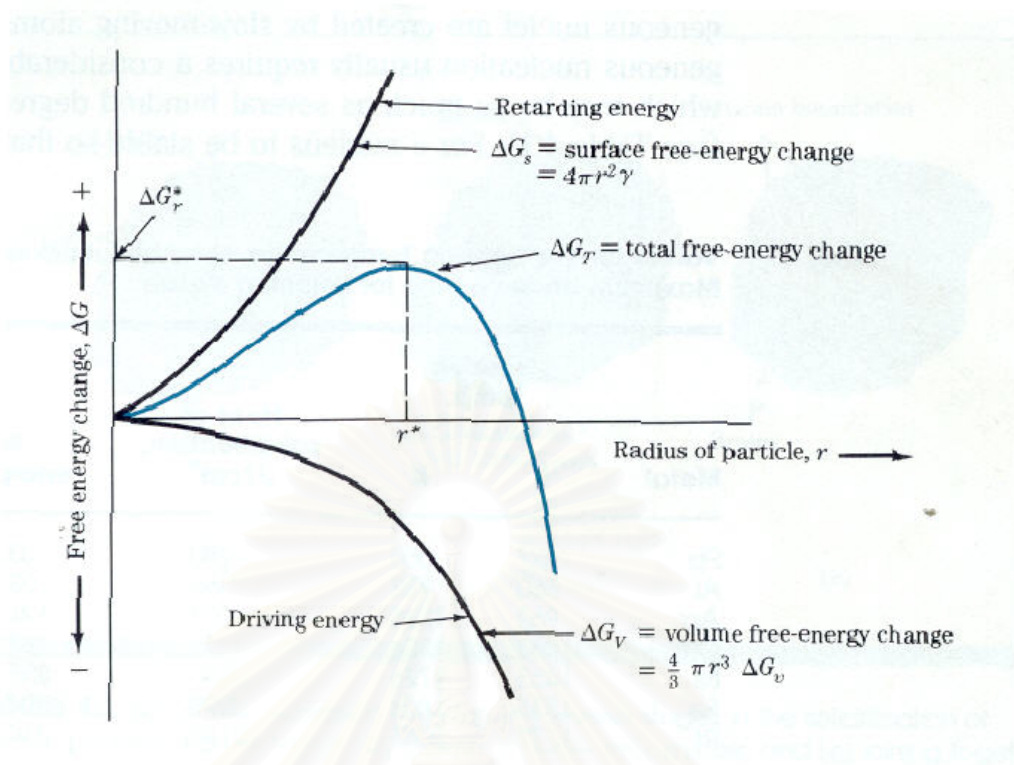
รูปที่ 2.3 แสดงรูปทรงของภาชนะปลูกผลึกแบบต่างๆ [3]

2.1.2 กระบวนการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อคบาร์เกอร์

การปลูกผลึกชนิดนี้อาศัยกระบวนการการหลอมสารที่จะปลูกซึ่งบรรจุอยู่ในภาชนะปลูกผลึกให้เป็นของเหลว แล้วควบคุมให้ภาชนะเคลื่อนด้วยความเร็วที่เหมาะสมกับเกรเดียนต์ของอุณหภูมิจนกระทั่งอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลว โดยผลึกเริ่มก่อตัวจากจุดปลายของภาชนะปลูกผลึกทำให้เกิดบริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว (Solid-liquid Interface) ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการปลูกผลึกที่สำคัญ คือ ทฤษฎีเกี่ยวกับการแข็งตัวของสาร (Solidification) และการก่อตัวของสาร (Segregation) ซึ่งช่วยให้เกิดความเข้าใจและสามารถควบคุมการจัดระเบียบอะตอมในการก่อผลึกของสาร ขั้นตอนการก่อผลึกเริ่มจากในบริเวณอุณหภูมิที่พอเหมาะของสารหลอมเหลว จะเกิดการก่อตัวของนิวไคลด์สตีร์ (Nucleation) จากนั้นจะเริ่มเกาะกันเป็นผลึก ด้วยอัตราการลดลงของอุณหภูมิที่ช้ามากที่บริเวณรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลว ทำให้เกิดการจัดระเบียบของการยึดเกาะกันของนิวไคลด์ที่ระนาบ (Plane) เดียวกันเป็นชั้นในลักษณะผลึกเดี่ยว

ในการก่อผลึกจากสถานะของเหลวเป็นของแข็งนั้น มีพื้นฐานมาจากการก่อตัวของนิวไคลด์ซึ่งมีกลไกการก่อตัวสองแบบ คือ Homogeneous nucleation และ Heterogeneous nucleation ของแข็งบริสุทธิ์ที่ถูกทำให้หลอมเหลวเป็นของเหลวบริสุทธิ์จะเกิดกระบวนการ Homogeneous nucleation เมื่อของเหลวถูกลดอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึงตัว (Freezing temperature) ของสารหลอมเหลวนั้นๆ อย่างเพียงพอ จำนวนนิวไคลด์จะก่อตัวขึ้นจากการเกิดพันธะของอะตอมอย่างช้าๆ หากการรวมตัวของอะตอมมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤต (Critical size) จะเรียกว่า embryo ซึ่งจะเกิดขึ้นและสลายไปอย่างต่อเนื่อง แต่หากการรวมตัวมีขนาดใหญ่กว่าขนาดวิกฤตจะเรียกว่านิวเคลียส (Nucleus) ซึ่งมีความเสถียรและสามารถโตเป็นผลึกต่อไปได้

พลังงานที่ก่อให้เกิด Homogeneous nucleation มี 2 ส่วนด้วยกันคือ พลังงานอิสระต่อปริมาตร (Volume free energy) เป็นพลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจากการเปลี่ยนแปลงสถานะของเหลวไปสู่ของแข็ง และพลังงานของพื้นผิว (Surface energy) เป็นพลังงานที่ต้องการสำหรับทำให้เกิดการก่อตัวของพื้นผิวใหม่บนของแข็งที่ได้ก่อตัวไปก่อนแล้ว เมื่อของเหลวถูกลดอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิจึงตัว ทำให้เกิดพลังงานผลักดัน (Driving energy) ให้ของเหลวก่อตัวเป็นของแข็งจากความแตกต่างของพลังงานอิสระต่อปริมาตร (ΔG_v) ของของแข็งและของเหลว ถ้าการก่อตัวของนิวเคลียสเป็นแบบทรงกลมรัศมี r พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลงต่อปริมาตรของทรงกลมจะเท่ากับ $\frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v$ การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระต่อปริมาตรกับรัศมีของ embryo หรือ นิวเคลียสแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แสดงการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระเทียบกับรัศมีของนิวเคลียสของโลหะบริสุทธิ์ [4]

ในทางตรงกันข้ามจะมีพลังงานที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดการก่อตัวของพื้นผิวของ embryo หรือนิวเคลียส พลังงานสำหรับการก่อพื้นผิวทรงกลมคำนวณได้จากผลคูณของพลังงานอิสระของพื้นผิวจำเพาะ (Specific surface free energy, γ) กับพื้นที่ผิวทรงกลม ($4\pi r^2$) ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระรวมสำหรับการก่อตัวของ embryo หรือนิวเคลียสจึงเป็นผลรวมของการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระต่อปริมาตรกับพลังงานอิสระของพื้นผิว ในกรณีของการเกิดการก่อตัวของ embryo หรือนิวเคลียสเป็นทรงกลมสามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระรวมได้จาก [4]

$$\Delta G_T = \frac{4}{3}\pi r^3 \Delta G_v + 4\pi r^2 \gamma \dots\dots\dots(1)$$

- เมื่อ ΔG_T = Total free energy change
- r = Radius of embryo or nucleus
- ΔG_v = Volume free energy
- γ = Specific surface free energy

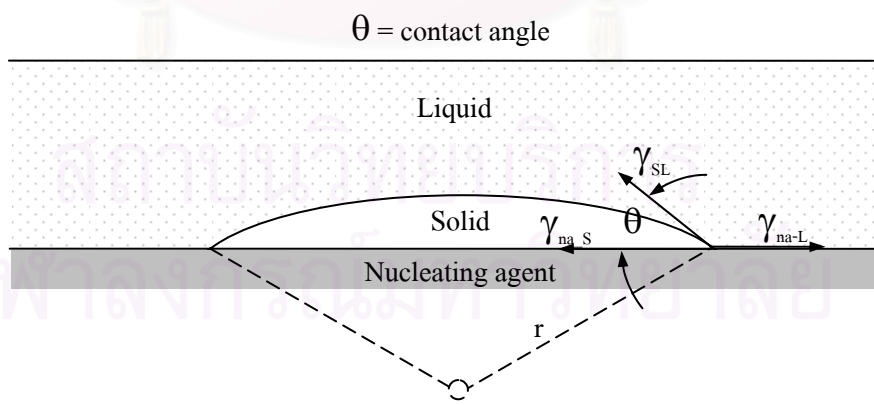
จากรูปที่ 2.4 การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระสูงสุดเมื่อกราฟความชันของพลังงานอิสระเทียบกับรัศมีเท่ากับศูนย์ ในขณะที่รัศมีการก่อตัวเท่ากับค่ารัศมีวิกฤต ($r = r^*$) ซึ่งสามารถคำนวณจากสมการอนุพันธ์ $d(\Delta G)/dr$ ดังนี้

$$\frac{d(\Delta G_T)}{dr} = \frac{d}{dr} \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \Delta G_v + 4 \pi r^2 \gamma \right)$$

$$0 = \frac{12}{3} \pi r^*{}^2 \Delta G_v + 8 \pi r^* \gamma$$

ดังนั้น
$$r^* = - \frac{2\gamma}{\Delta G_v} \dots\dots\dots(2)$$

โดยทั่วไปแล้วการก่อตัวของนิวเคลียสจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวของภาชนะบรรจุ สารเจือที่ไม่ละลาย หรือบนวัสดุอื่นใดก็ตามที่มีพลังงานอิสระวิกฤต (Critical free energy) ต่ำกว่าพลังงานที่ต้องการเพื่อทำให้เกิดการก่อตัวของนิวเคลียส ดังนั้นการก่อตัวของนิวเคลียสในความเป็นจริงแล้วจะเป็นแบบ Heterogeneous nucleation ดังรูปที่ 2.5 การก่อตัวของนิวเคลียสจะเกิดขึ้นบนตัวทำให้เกิดการก่อตัว (Nucleating agent) และจะเกิดมุม θ ซึ่งเป็นมุมของผิวสัมผัสระหว่างของแข็งและของเหลว เมื่อพลังงานพื้นผิวของ Heterogeneous nucleation ต่ำ ก็จะทำให้การเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระรวมต่ำไปด้วย ส่งผลให้ขนาดของนิวเคลียสวิกฤตก็ต่ำไปด้วย



รูปที่ 2.5 แสดงการก่อตัวแบบ Heterogeneous nucleation [4]

เมื่อเปรียบเทียบกับสมการที่ (1) สามารถคำนวณการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระในการก่อตัวของนิวเคลียสได้เป็น

$$\Delta G_T = \frac{\pi r^3}{3} (2 - 3 \cos \theta + \cos^3 \theta) \Delta G_v + \gamma_{SL} (2\pi r^2 (1 - \cos \theta) - \pi r^2 \cos \theta (1 - \cos^2 \theta)) \dots \dots \dots (3)$$

จากสมการ (3) การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระรวมจะมีค่าสูงสุดเมื่อ $r = r^*$ ดังนั้นถ้า $r < r^*$ การก่อตัวจะไม่เสถียร แต่ถ้า $r > r^*$ การก่อตัวจะเกิดสถานะเสถียรและสามารถรวมตัวเป็นของแข็งได้ เมื่อแทนค่ารัศมีวิกฤติจากสมการ (2) ในสมการ (3) จะคำนวณการเปลี่ยนแปลงของพลังงานอิสระน้อยที่สุดที่ทำให้เกิดการก่อตัวเป็นของแข็งได้ โดยรัศมีและมุมของการก่อตัวคงที่ได้ดังสมการ

$$\Delta G_T = \frac{16\pi\gamma_{SL}^3 (2 + \cos \theta)(1 - \cos \theta)^2}{12\Delta G_v} \dots \dots \dots (4)$$

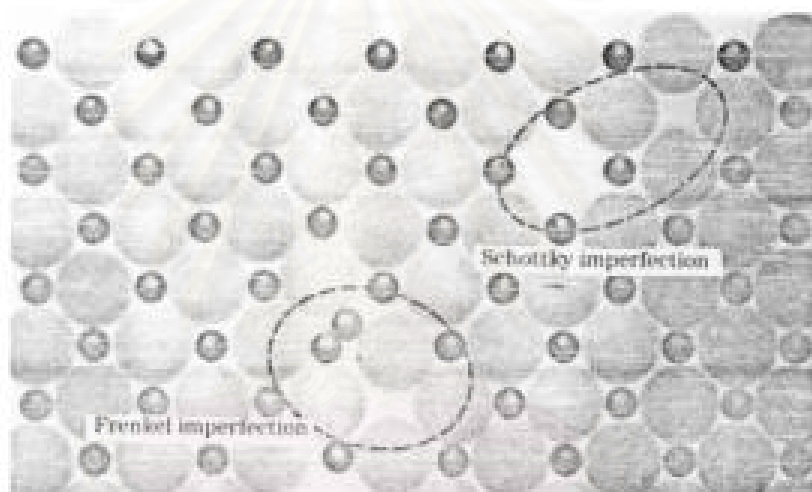
อย่างไรก็ตามการโตของผลึกเดียวนั้น การก่อตัวของสารจะต้องเกิดขึ้นรอบนิวเคลียสเพียงตัวเดียวแล้วขยายตัวอย่างต่อเนื่องจนเป็นระนาบผลึกเดี่ยว ซึ่งจะเกิดกรณีเช่นนี้ได้ก็ต่อเมื่ออุณหภูมิระหว่างของแข็งและของเหลวจะต้องต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อยและอุณหภูมิของของเหลวที่อยู่เหนือรอยต่อระหว่างของแข็งและของเหลวจะต้องสูงขึ้น ทั้งนี้ในการควบคุมให้อุณหภูมิระหว่างรอยต่อต่ำกว่าจุดหลอมเหลวเล็กน้อยจำเป็นต้องควบคุมให้การโตของผลึกเกิดขึ้นอย่างช้าๆ โดยอัตราการโตของผลึกสามารถคำนวณได้จากความสัมพันธ์ของอัตราการสูญเสียความร้อนระหว่างผิวสัมผัสของของเหลวและผลึก ตามสมการ [5]

$$k_s G_s - k_l G_l = \rho H_f R \dots \dots \dots (5)$$

เมื่อ	$k_{s,l}$	=	Thermal conductivity of the solid, liquid
	$G_{s,l}$	=	Thermal gradient in the solid, liquid
	ρ	=	Density of the solid
	H_f	=	Latent heat of fusion
	R	=	Crystal growth rate

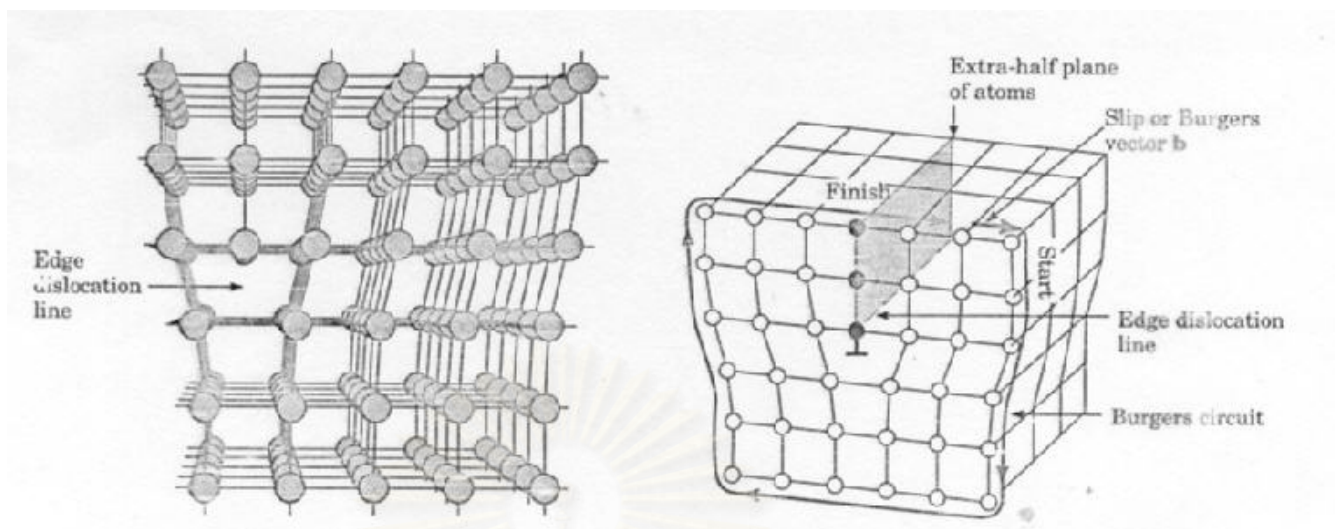
การก่อผลึกในโครงสร้างของสารสามารถเกิดความไม่ต่อเนื่องของแลตทิซและกลายเป็นความบกพร่อง (Defect) บางบริเวณของโครงสร้างทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก (Crystal imperfections) โดยกลไกของการเกิดสามารถแบ่งได้เป็น 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ ความบกพร่องที่ไม่มีมิติ (Zero-dimension point defect) ความบกพร่องมิติเดียว (One-dimensional or line defect) และความบกพร่องสองมิติ (Two-dimensional defect)

ก. ความบกพร่องที่ไม่มีมิติ หรือ point defect เกิดขึ้นได้ระหว่างการจัดเรียงอะตอมของสารขณะก่อผลึกและเกิดการรบกวนด้วยผลของแรงทางประจุ ทำให้เกิดหลุมว่างขึ้นท่ามกลางบริเวณก่อตัว เรียกว่า vacancy โดยเฉพาะกลุ่มผลึกไอออนิก ภาวะของแคทไอออน (Cation) และแอนไอออน (Anion) จะก่อให้เกิดกลไกของความบกพร่องนี้ได้ง่าย ความบกพร่องที่รู้จักกันดีในกลุ่มผลึกไอออนิก ได้แก่ Schottky imperfection และ Frenkel imperfection ดังรูปที่ 2.6



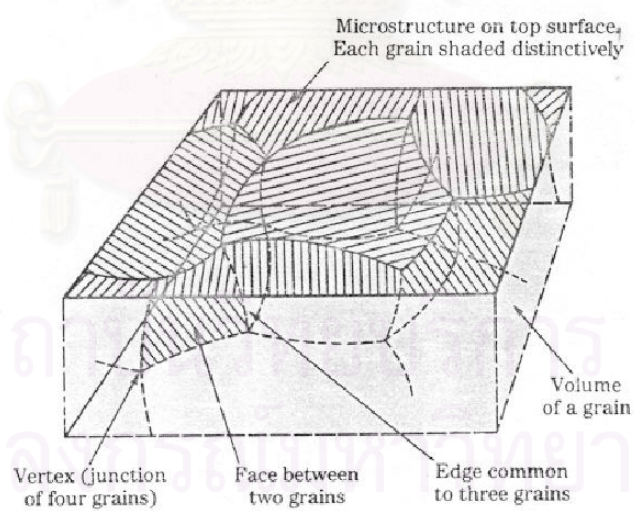
รูปที่ 2.6 การเกิดความบกพร่องของผลึกไอออนิกแบบ Schottky และ Frenkel imperfection

ข. ความบกพร่องมิติเดียว หรือ Line defect เกิดขึ้นระหว่างการก่อผลึกโดยเกิดความผิดเพี้ยนของการจัดระเบียบโครงสร้างผลึก เกิดการคราดตำแหน่งและแรงเฉือนตามแนว เรียกว่า Dislocation มีผลให้โครงสร้างผิดเพี้ยนถาวร ดังในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 การเกิดความบกพร่องแบบ Dislocation

ค. ความบกพร่องสองมิติ หรือ Planar defect เกิดขึ้นระหว่างการเย็นตัวของสารอย่างรวดเร็วและก่อผลึกในระนาบ (plane) ต่างกัน เกิดเป็น grain boundary ในสารที่เป็น polycrystal ดังในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 การเกิดความบกพร่องแบบ Planar defect

ผลของความไม่สมบูรณ์ของผลึก สามารถเกิดในบางบริเวณของการปลูกผลึกเดี่ยว โดยเฉพาะผลึกเดี่ยวที่ต้องการนำมาใช้เป็นผลึกวัดรังสีนั้น ความไม่สมบูรณ์ของผลึกจะมีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการเรืองรังสีของผลึก ในกรณีของ point defect จะมีผลต่อการลดปริมาณคู่เอกซิตอน (exciton) ที่เกิดจากคู่อิเล็กตรอน-โฮล หลังการถ่ายโอนพลังงาน เนื่องจากอิเล็กตรอนจะถูกจับบริเวณ vacancy จึงทำให้อิเล็กตรอน-โฮล ที่จะอยู่ในภาวะเอกซิตอนและเกิดการปล่อยแสงเรืองน้อยลง ส่วนในกรณีของ line defect และ planar defect จะมีผลต่อการหักเหของแสง (Refraction) และการดูดกลืนความเข้มแสง (Absorption) ทำให้แสงเรืองที่เกิดขึ้นไม่สามารถผ่านเนื้อผลึกมายังผิวหน้าได้ดี ดังนั้น กระบวนการปลูกผลึกจึงจำเป็นต้องควบคุมพารามิเตอร์ที่มีผลต่อการเริ่มก่อผลึกให้มีความเสถียรสูง เพื่อลดการเกิดความไม่สมบูรณ์ของโครงสร้างผลึก

สำหรับการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์นั้น ตัวแปรที่มีผลต่ออัตราการโตของผลึกคือ ลักษณะแรงแคตียนท์ของอนุหุมิและความเร็วในการเคลื่อนที่ภาชนะปลูกผลึก เนื่องจากตัวแปรดังกล่าวมีผลต่ออัตราการสูญเสียความร้อนระหว่างผิวสัมผัสระหว่างของเหลวและผลึก

2.2 ผลึกวัดรังสีชนิดซินทิลเลชันประเภทสารอินทรีย์

ผลึกเรืองรังสี (Scintillation crystal) โดยทั่วไปแบ่งเป็น 2 กลุ่มคือ ผลึกวัดรังสีประเภทสารอินทรีย์ (Organic scintillator) ได้แก่ แอนทราซีน โพลีเมอร์ต่างๆ และผลึกวัดรังสีประเภทสารอินทรีย์ (Inorganic scintillator) เช่น BGO, NaI(Tl), CsI(Tl) เป็นต้น คุณสมบัติของผลึกวัดรังสีประเภทสารอินทรีย์จะขึ้นอยู่กับลักษณะของโมเลกุล และสถานะของสารเป็นหลัก ส่วนปัจจัยหลักที่มีผลต่อประสิทธิภาพการเปล่งแสงของผลึกวัดรังสีประเภทสารอินทรีย์จะขึ้นกับ ปริมาณสารเจือ (Impurity – activated) และลักษณะของรูปผลึก (Crystalline) ในตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกวัดรังสีประเภทสารอินทรีย์ชนิดต่างๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติของผลึกอินทิลเลชันชนิดสารอนินทรีย์ [6]

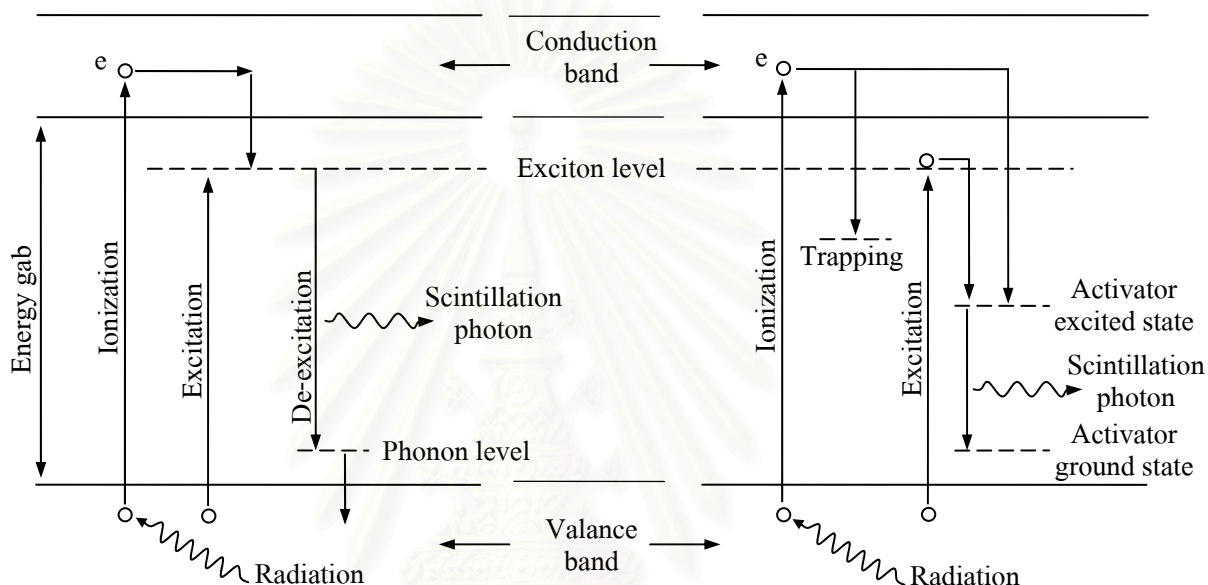
Material	Specific Gravity	Wavelength of Maximum Emission λ_{\max} (nm)	Index Of Refraction at λ_{\max}	Principal Decay Constant (μ S)	Pulse 10 – 90 % Rise Time (μ S)	Total Light Yield (Photons per MeV)	Absolute Scintillation Efficiency for Fast Electrons (%)
NaI(Tl)	3.67	415	1.85	0.23	0.5	38,000	11.3
CsI(Tl)	4.51	540	1.80	1.00	4	52,000	11.9
CsI(Na)	4.51	420	1.84	0.63	4	39,000	11.4
LiI(Eu)	4.08	470	1.96	1.40	-	11,000	2.8
BGO	7.13	505	2.15	0.30	0.8	8,200	2.1
BaF ₂ (slow)	4.89	310	1.49	0.62	3	10,000	4.5
BaF ₂ (Fast)	4.89	220	-	0.0006	-	-	-
ZnS(Ag)	4.09	450	2.36	0.2	-	-	-
CaF ₂ (Eu)	3.19	435	1.44	0.9	4	24000	6.7
CsF	4.11	390	1.48	0.004	-	-	-
Li glass ^a	2.50	395	1.55	0.075	-	-	1.5

^aProperties vary with exact formulation

2.2.1 การเปล่งประกายแสงของผลึกวัสดุอินทิลเลชัน

กลไกการทำงานของผลึกวัสดุอินทิลเลชันเริ่มจากรังสีตกกระทบผลึกวัสดุอินทิลเลชัน ก่อให้เกิดกระบวนการไอออไนเซชัน (Ionization) และ/หรือเอกไซเตชัน (Excitation) กระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (Valance band) เคลื่อนขึ้นไปอยู่ในบริเวณใกล้แถบนำกระแส (Conduction band) เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลที่เหนี่ยวกันและกัน (Exciton) ขึ้น ปริมาณของเอกไซตอนจะขึ้นกับระดับพลังงานที่ผลึกวัสดุอินทิลเลชันได้รับ เนื่องจากอิเล็กตรอนถูกยกระดับไปอยู่ในแถบนำกระแสจึงไม่เสถียร และต้องปลดปล่อยพลังงานออกเพื่อกลับสู่ระดับกราวนด์ (Ground state) พลังงานที่ปลดปล่อยออกมาจะอยู่ในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในย่านความยาวคลื่นแสง ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเรืองแสง (Fluorescence) การลดระดับพลังงานของกลุ่มอิเล็กตรอนที่ถูกยกระดับพลังงานจากการวัดรังสีของผลึกวัสดุอินทิลเลชันให้ความเข้มของแสงเรืองในระยะเวลาสั้นมาก ($\approx 10^{-9}$ S) จึงมีลักษณะของการเปล่งประกายแสง (Scintillation) และความเข้มแสงจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสีที่ผลึกวัสดุอินทิลเลชันได้รับ ความแตกต่างกันของความเข้มแสงทำให้สามารถแจกแจงพลังงานที่แตกต่างกันของรังสีได้

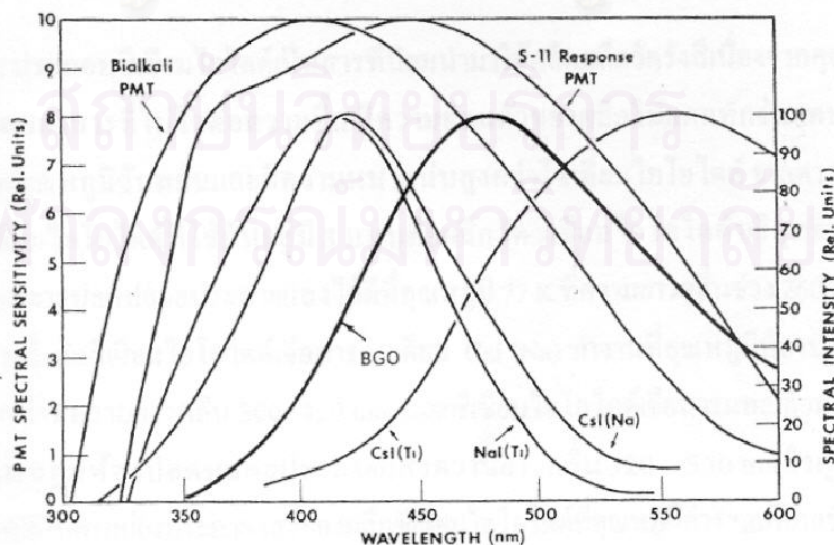
ตามปกติช่องว่างของระดับพลังงาน (Energy gap) ของผลึกบริสุทธิ์จะมีระดับสูงมาก ทำให้ความยาวคลื่นแสงที่ปลดปล่อยออกมาจากผลึกอยู่ในย่านความยาวคลื่นซึ่งอุปกรณ์ไวแสงตอบสนองได้ไม่ดี จึงมีการเติมสารเจือลงไปในเล็กน้อย เรียกว่า “Activator” เพื่อทำให้เกิดความไม่บริสุทธิ์ของผลึก และสร้างบริเวณ activator trapped ขึ้น ซึ่งมีระดับช่องว่างพลังงานต่ำกว่า การลดระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจึงให้แสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่าดังกลไกในรูปที่ 2.9 ข. ในช่วงที่เหมาะสมกับอุปกรณ์ไวแสง เช่น PMT หรือ โฟโตไดโอด เป็นต้น



ก. กลไกการเกิดประกายแสง

ข. กลไกการเกิดประกายแสงเมื่อเจือสาร

รูปที่ 2.9 แสดงกลไกการเรืองแสงของผลึกควัตรงสี [1]



รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นที่ปลดปล่อยออกมาของซินทิลเลเตอร์ชนิดสารอนินทรีย์ [6]

ประสิทธิภาพของการเกิดประกายแสง (S_y) [7] ของผลึกสารอินทรีย์ที่เจือสารสามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S_y = \frac{E_{py} (n_o) f_{xy} q_{oy}}{E_{wx} (n_e)} \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อ	S_y	=	Absolute scintillation efficiency
	E_{py}	=	Mean energy of fluorescence photon
	E_{wx}	=	Energy loss required to produce e-h pair
	(n_o)	=	Number of excitons
	(n_e)	=	Number of e-h produced
	f_{xy}	=	Quantum efficiency of energy transfer
	q_{oy}	=	Luminescence quantum efficiency

เนื่องจากประสิทธิภาพการเปล่งประกายแสงขึ้นกับปริมาณการเติมสารเจือลงในผลึก ดังนั้นจึงมีการศึกษาหาสมการความสัมพันธ์ของปริมาณการเติมสารเจือไว้ [6] ดังสมการ

$$L \propto \frac{c(1-c)^Z}{c + (\sigma_l / \sigma_a)(1-c)} \dots\dots\dots(7)$$

เมื่อ	L	=	Pulse height
	c	=	Mole fraction of activator
	σ_l	=	Cross-section for capture of the exciton by the activator
	σ_a	=	Cross-section for capture of the exciton by a lattice site
	Z	=	Effective number of lattice sites

จากสมการที่ (7) จะเห็นได้ว่า ประสิทธิภาพการเปล่งประกายแสงของผลึกจากผลของปริมาณสารเจือ สามารถตรวจสอบได้จากการวัดขนาดความสูงของสัญญาณพัลส์ (Pulse height) โดยวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานเดี่ยวของต้นกำเนิดรังสีมาตรฐานด้วยอุปกรณ์วิเคราะห์หลายช่อง (MCA) และหาค่าตำแหน่งพีคพลังงานของรังสีที่แปรเปลี่ยนไปเมื่ออัตราขยายสัญญาณคงที่

2.2.2 คุณสมบัติที่ดีของผลึกวัตรังสี

ผลึกวัตรังสีที่ดีจะต้องให้ประสิทธิภาพในการวัตรังสีสูง ซึ่งผลึกที่จะให้ประสิทธิภาพในการวัตรังสีสูง จำเป็นต้องมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้ [8]

1. มีประสิทธิภาพสูงในการเปลี่ยนพลังงานของรังสีเป็นพลังงานแสงที่สามารถวัดได้ (High scintillator efficiency)
2. ความเข้มของแสงที่ให้ออกมาควรเป็นสัดส่วนโดยตรงกับพลังงานของรังสี (Linearity)
3. ผลึกวัตรังสีจะต้องยอมให้แสงเรืองที่เกิดขึ้นผ่านออกจากผลึกได้ดี (Transparent)
4. เวลาในการสลายแสงที่เรื่อออกมาจากผลึกสั้น (Short decay time) ทำให้สามารถกำเนิดสัญญาณพัลส์ได้รวดเร็ว
5. ดัชนีหักเหของแสงควรมีค่าใกล้เคียงกับแก้ว $= 1.5$ (Good coupling with detector)

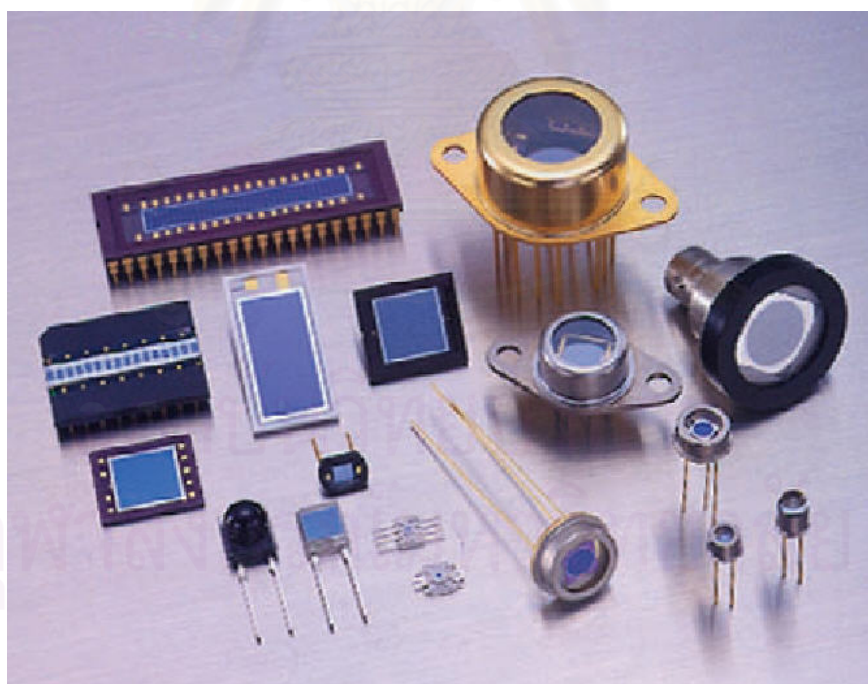
สารประกอบซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) เป็นสารประกอบชนิดหนึ่งที่มีคุณสมบัติเหมาะสมในการเป็นผลึกวัตรังสี เนื่องจากคุณสมบัติที่ไม่ไวต่อความชื้น มีความอ่อนตัวของผลึก ไม่แตกหักง่าย ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจับปล้น และมีความหนาแน่นสูง ผลึกวัตรังสีชนิดซีเซียมไอโอไดด์มีการนำมาใช้อย่างแพร่หลายในลักษณะของผลึกเดี่ยวบริสุทธิ์และผลึกเดี่ยวที่เจือสารได้แก่ undoped CsI, CsI(Na), CsI(Tl) ซึ่งมีคุณสมบัติดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงคุณสมบัติของผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (CsI) ชนิดต่างๆ [6]

Type of CsI	CsI(Tl)	CsI(Na)	CsI(undoped)
Density(g/cm ³)	4.51	4.51	4.51
Melting point (K)	894	894	894
Thermal expansion coefficient (K ⁻¹)	54×10^{-6}	49×10^{-6}	49×10^{-6}
Hygroscopic	Slightly	Yes	Slightly
Wavelength of emission maximum(nm)	550	420	315
Lower wavelength cutoff (nm)	320	300	260
Refractive index at emission maximum	1.79	1.84	1.95
Primary decay time (μ s)	1	0.63	0.016
Light yield (photon/keV)	52 – 56	38 – 44	2

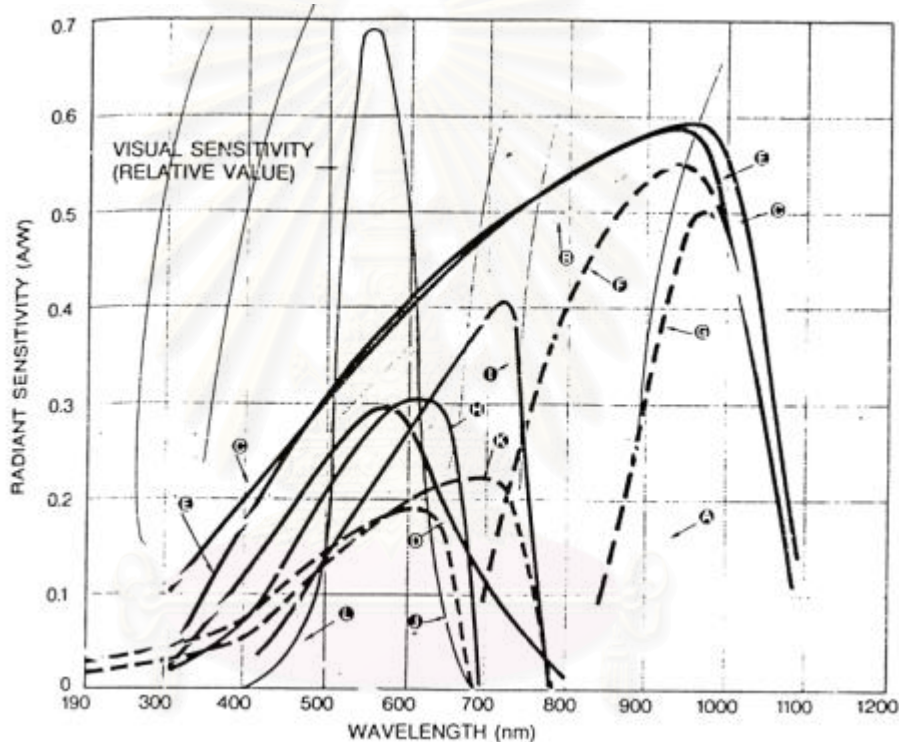
2.3 หัววัดเรืองรังสีและฟิโตนิกไดโอด

หัววัดซินทิลเลชันมีกระบวนการตรวจวัดรังสีโดยทางอ้อม เมื่อผลึกเรืองรังสี (Scintillator) ได้รับการถ่ายโอนพลังงานจะเกิดอันตรกิริยาเปล่งประกายแสง (Scintillation light) ก่อนส่งผ่านไปยังอุปกรณ์ไวแสงซึ่งจะเปลี่ยนความเข้มของแสงไปเป็นสัญญาณพัลส์ อุปกรณ์ไวแสงที่นิยมใช้กันมากที่สุดก็คือหลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กตรอน (Photomultiplier tube, PMT) ซึ่งภายในจะมีโฟโตแคโทด (Photocathode) ทำหน้าที่เป็นส่วนไวแสงและชุดทวีคูณอิเล็กตรอน (Electron multiplier) ทำหน้าที่ขยายสัญญาณด้วยการทวีคูณอิเล็กตรอน แต่หลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กตรอนมีข้อจำกัดบางประการที่ไม่เหมาะสมกับการวัดรังสีในสภาวะแวดล้อมบางลักษณะ เช่น บริเวณวัดรังสีมีสนามแม่เหล็กบริเวณสูง การสั่นสะเทือนสูง และในบางครั้งต้องการหัววัดที่มีขนาดเล็ก ปัจจุบันเทคโนโลยีด้านโฟโตนิกส์ (Photonics) ก้าวหน้าขึ้นมาก จึงมีการผลิตไดโอดไวแสงขึ้นมามากหลายชนิด แต่ละชนิดมีคุณลักษณะและประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อความยาวคลื่นต่างกัน โดยเฉพาะไดโอดไวแสงบางชนิดสามารถนำไปใช้งานร่วมกับผลึกวัดรังสีแทนหลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กตรอน และมีข้อดีคือ มีขนาดเล็กกว่า ไม่เกิดการรบกวนจากสนามแม่เหล็ก ต้องการไบอัสแรงดันต่ำ และราคาประหยัดกว่า



รูปที่ 2.11 ตัวอย่างภาพโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ [9]

โฟโตไดโอดมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ชนิดรอยต่อ PN เมื่อมีแสงตกกระทบบที่รอยต่อจะทำให้เกิดสัญญาณกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขึ้น โฟโตไดโอดเป็นผลิตภัณฑ์จากสารกึ่งตัวนำ เช่น Si, GaAs, GaAsP และ GaP มีโครงสร้างลักษณะต่างๆ เช่น โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ PN (PN photodiode) ฟินโฟโตไดโอด (PIN photodiode) อวาแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode) และโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky photodiode) แต่ละชนิดมีคุณสมบัติและความไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ ดังเส้นกราฟในรูปที่ 2.12 และตารางที่ 2.3



รูปที่ 2.12 สเปกตรัมย่านตอบสนองความยาวคลื่นของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ [10]

สงวนลิขสิทธิ์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 คุณสมบัติการตอบสนองความยาวคลื่นแสงของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ [10]

ชนิดของโฟโตไดโอด	ช่วงตอบสนอง (nm)	ยอดสเปกตรัม (nm)	สัญลักษณ์ในรูป
โฟโตไดโอดชนิด Si	190 – 1000	720	A
	190 – 1000	960	B
	320 – 1100	960	C
	320 – 730	560	D
พินโฟโตไดโอดชนิด Si	320 – 1100	960	E
	700 – 1100	960	F
	840 – 1100	980	G
โฟโตไดโอดชนิด GaAsP (ชนิดแพร่ซึม)	300 – 680	640	H
	400 – 760	710	I
โฟโตไดโอดชนิด GaAsP (ชนิดขอตัก)	190 – 760	610	J
	190 – 760	710	K
โฟโตไดโอดชนิด GaP	190 – 550	440	L

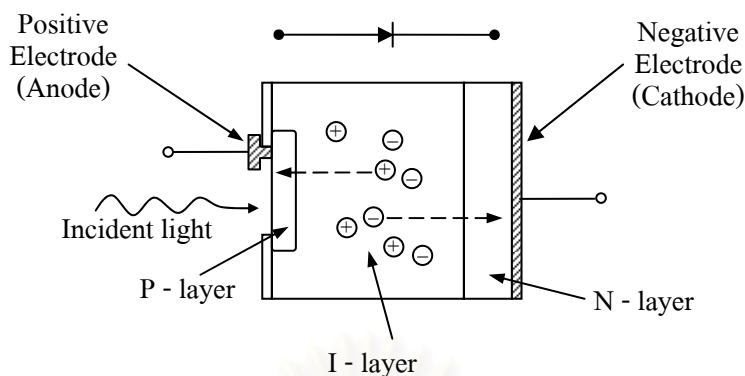
โดยทั่วไปแล้วโฟโตไดโอดเหล่านี้จะมีคุณสมบัติต่างๆ กันคือ [10]

1. คุณสมบัติการตอบสนองความเข้มแสงเป็นเชิงเส้นดี (Excellent linearity)
2. สัญญาณรบกวนต่ำ (Low noise)
3. ตอบสนองความยาวคลื่นแสงในช่วงกว้าง (Wide spectral response)
4. มีความคงทนทางกลไก (Mechanical ruggedness)
5. ขนาดกระทัดรัดและเบา (Compact and light weight)
6. อายุการใช้งานยาวนาน (Long life time)

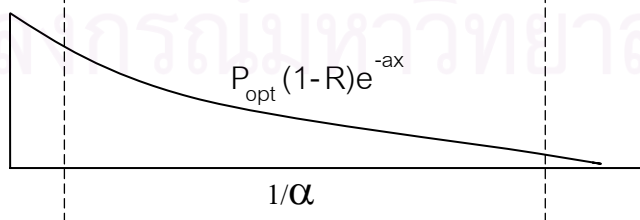
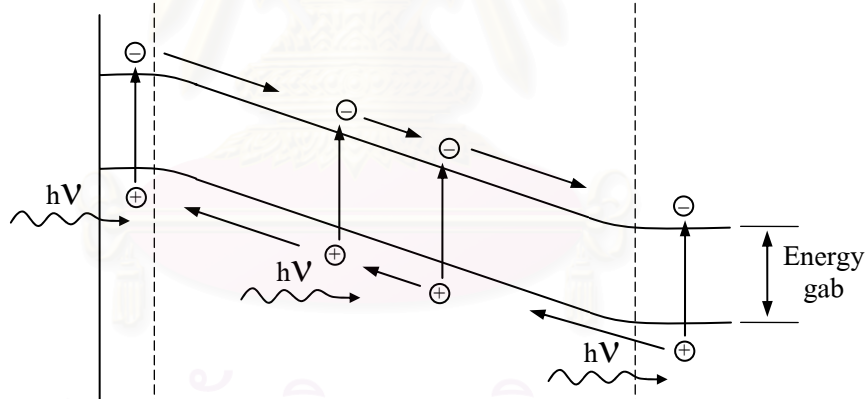
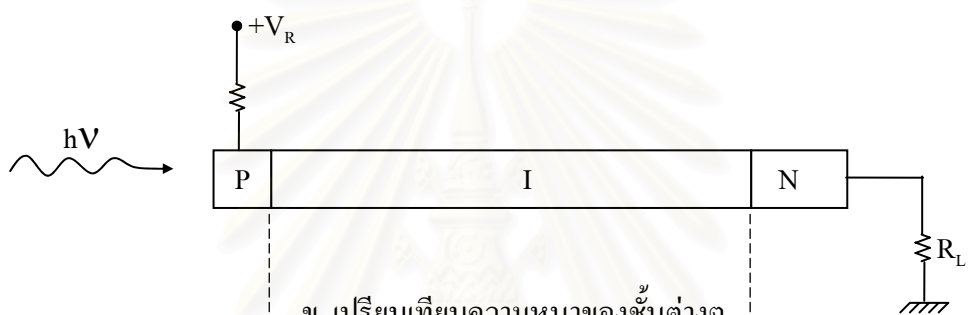
2.3.1 พินโฟโตไดโอด

พินโฟโตไดโอด (P-I-N photodiode) คือโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด P-I-N ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโตไดโอดธรรมดาตรงที่บริเวณรอยต่อของชั้น P และ N จะมีชั้น I คั่นอยู่ แสดงในรูปที่ 2.13 ก. ชั้น I นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (Intrinsic) ที่มีความบริสุทธิ์สูง จึงทำให้พินโฟโตไดโอดมีค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ (Junction capacitance) น้อยลง การตอบสนองด้านเวลาได้เร็วมาก (ultra – fast response speed) ถึงระดับพิโควินาที จึงมีการใช้งานพินโฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจจับสัญญาณอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว เช่น ในระบบการสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์ ในอุปกรณ์ควบคุมระยะไกลด้วยแสง (Remote control) รวมทั้งการวัดรังสี เป็นต้น

เนื่องจากพินโฟโตไดโอดมีชั้น I อยู่ระหว่างชั้น P และ N โดยชั้น I นี้เป็นชั้นปลอดพาหะ (Depletion layer) ที่สามารถควบคุมให้มีความหนาต่างๆ ได้ตามความต้องการในระหว่างกระบวนการผลิต อย่างไรก็ตามหลักการทำงานพื้นฐานของพินโฟโตไดโอดนั้นคล้ายกับกรณีของโฟโตไดโอดทั่วไป เมื่อมีแสงตกกระทบพินโฟโตไดโอด แสงจะทะลุผ่านชั้น P เข้าสู่ชั้น I และ N ตามลำดับ โดยแสงส่วนมากจะตกกระทบบริเวณชั้น I เนื่องจากพินโฟโตไดโอดจะออกแบบให้ชั้น I หนากว่าชั้น P และ N มาก ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน พลังงานโฟตอนของแสงจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนยกระดับจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน ส่วนแถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในชั้นต่างๆ ทั้ง P, I และ N พาหะที่เกิดขึ้นจากแสงกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้ด้วยกลไก 2 ชนิดดังนี้คือ

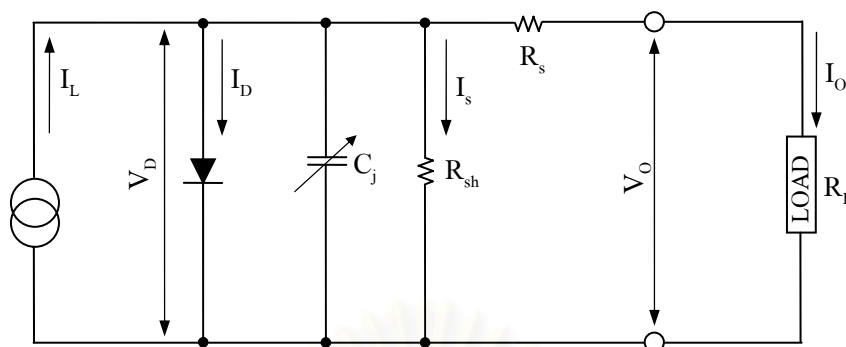


ก. โครงสร้างพื้นฐานของพินโฟโตไดโอด



ง. การลดทอนของแสงตามระยะความลึก

รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะของพินโฟโตไดโอด



- I_L : Current generated by the incident light
- I_D : Diode current
- C_j : Junction capacitance
- R_{sh} : Shunt resistance
- R_s : Series resistance
- I_s : Shunt resistance current
- V_D : Voltage across the diode
- I_O : Output current
- V_O : Output voltage

รูปที่ 2.14 แสดงวงจรเทียบเท่าของพินโฟโตไดโอด [11]

1. ถ้าพาหะอิสระเหล่านี้สามารถไหลออกสู่วงจรภายนอกได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าพาหะอิสระที่เกิดขึ้นในชั้น I จะมีบทบาทในการกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากที่สุด โดยเฉพาะพาหะจากชั้น I จะถูกพัดพาให้ไหลออกสู่วงจรภายนอกด้วยปรากฏการณ์พัดพาด้วยศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in potential) โดยอิเล็กตรอนจะไหลออกทางชั้น N และโฮลจะไหลออกทางชั้น P กระแสไฟฟ้าที่ได้ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า กระแสไฟฟ้าพัดพา (Drift current)

2. โฮลที่เกิดในชั้น N นั้น ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึม (Diffusion length) ที่ไกลเพียงพอที่จะแพร่ซึมจากชั้น N ผ่านเข้าสู่ชั้น I และไหลไปสู่ชั้น P ได้ และกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ซึม (Diffusion current) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดในชั้น P ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึมที่ไกลเพียงพอที่จะแพร่ซึมจากชั้น P เข้าสู่ชั้น I และชั้น N ได้ และจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ซึมด้วย

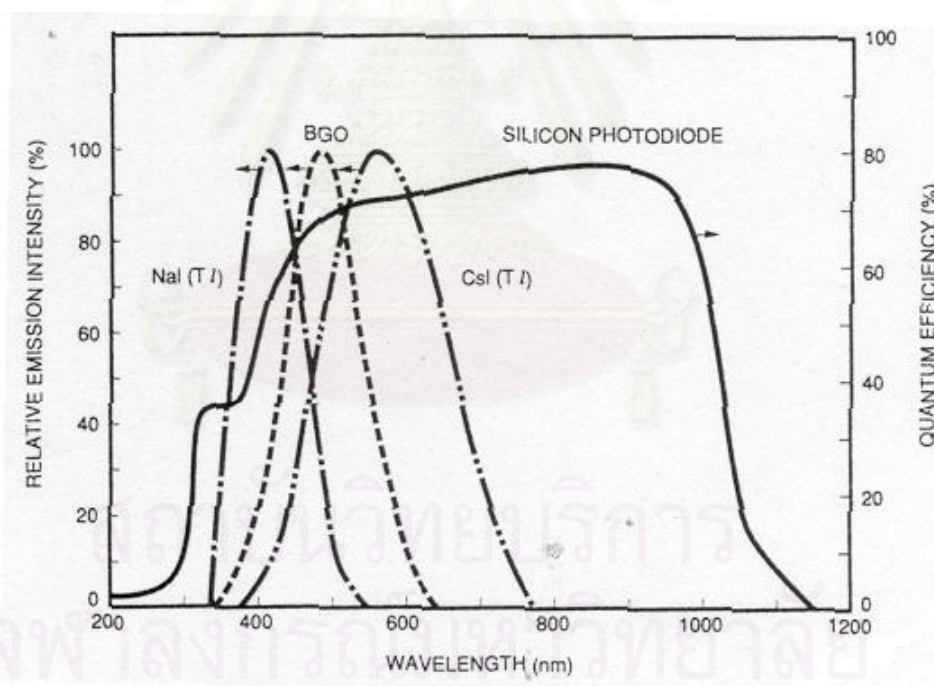
ดังนั้นกระแสไฟฟ้าทั้งหมดเป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าพัดพากับกระแสไฟฟ้าแพร่ซึม เมื่อพิจารณาจากวงจรเทียบเท่าของพินโฟโตไดโอดในรูปที่ 2.14 สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าทั้งหมดได้จากสมการต่อไปนี้ [9]

$$I_O = I_L - I_D - I_s = I_L - I_{PS} (e^{eV_D/kT} - 1) - I_s \dots\dots\dots(8)$$

- โดยที่ I_{PS} = Current generated by the incident light
- e = Electron charge
- k = Boltzmann's constant
- T = absolute temperature of the photodiode

2.3.2 หัววัดเรืองรังสีชนิด CsI(Tl) ฟินโฟโตไดโอด

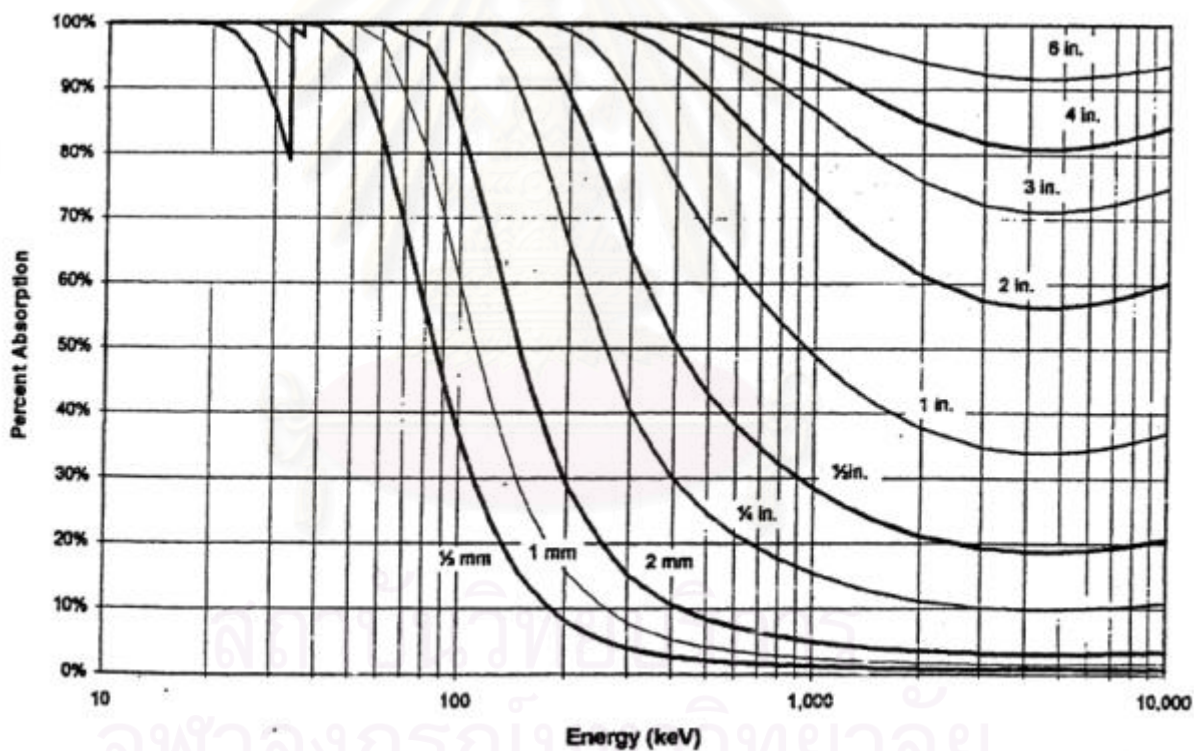
เนื่องจากฟินโฟโตไดโอดมีช่วงตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงกว้างมาก และมีฟินโฟโตไดโอดบางชนิดที่สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงในช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ (Visible light) ในขณะที่เดียวกันผลึกวัสดุรังสีชนิดซินทิเลชันบางชนิด เช่น CsI(Tl), BGO ให้ความยาวคลื่นแสงในช่วงที่เหมาะสมกับการตอบสนองของฟินโฟโตไดโอดดังรูปที่ 2.15 จึงทำให้สามารถใช้ฟินโฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ไวแสงของหัววัดเรืองรังสีได้



รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมความยาวคลื่นของผลึกวัสดุรังสีเทียบกับการตอบสนองของฟินโฟโตไดโอด

เพื่อให้ประสิทธิภาพของหัววัดเรืองรังสีใช้งานร่วมกับฟิโนโตไดโอดแล้วมีประสิทธิภาพสูงสุด นอกจากจะคำนึงถึงการตอบสนองต่อความยาวคลื่นแสงแล้ว องค์ประกอบที่มีผลต่อการวัดรังสีที่ต้องนำมาพิจารณา ได้แก่

1. การลดทอนความเข้มแสงเนื่องจากความหนาของผลึก (Light attenuation) การกำหนดความหนาของผลึกวัดรังสีขึ้นอยู่กับช่วงพลังงานสูงสุดที่ต้องการวัดซึ่งผลึกจะต้องดูดกลืนพลังงานได้ทั้งหมด ถ้าความหนาของผลึกมากเกินไปจนเป็นเนื้อผลึกส่วนเกินจะดูดกลืนความเข้มประกายแสง ทำให้ประสิทธิภาพการเปล่งประกายแสงลดลง แต่ในขณะเดียวกันหากความหนาของผลึกน้อยเกินไปก็จะทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานน้อย เนื่องจากพลังงานของรังสีจะทะลุผลึกวัดรังสี ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดกลืนพลังงานของรังสีที่พลังงานต่างๆ ของขนาดผลึกที่ต่างกันดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ของความสามารถในการดูดกลืนพลังงานของผลึก CsI ที่ความหนาและพลังงานต่างๆ [8]

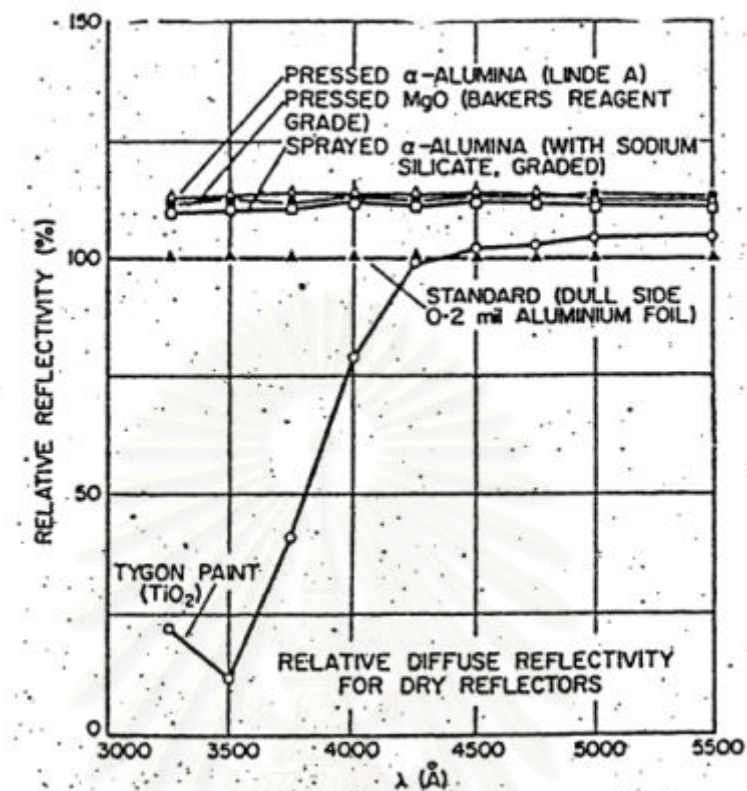
2. การหักเหแสงระหว่างตัวกลาง (Refraction) ปัจจัยอีกอย่างหนึ่งที่ทำให้เกิดการลดทอนความเข้มแสงก็คือดัชนีหักเหของแสง (Refractive index) ของผลึกซินทิลเลชัน อันเป็นผลให้เกิดการหักเหเปลี่ยนทิศทาง (Refraction) เมื่อแสงเดินทางจากภายในผลึกซินทิลเลชันมาถึงรอยต่อระหว่างผลึกซินทิลเลชันและอากาศจะเกิดการหักเหแสงขึ้น เนื่องจากมีค่าดัชนีหักเหที่แตกต่างกัน ทำให้แสงไม่สามารถส่งผ่านออกไปยังอุปกรณ์ไวแสงได้ทั้งหมด มุมที่ตกกระทบของแสงจะเป็นส่วนสำคัญในการเกิดการสะท้อนภายในตัวเอง เมื่อมุมตกกระทบของแสงเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้เกิดการสะท้อนแสงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย และจะเพิ่มขึ้นเป็น 100% ในตำแหน่งที่แสงสะท้อนกลับจนหมด ที่ตำแหน่งนี้เรียกว่ามุมวิกฤต (Critical angle, θ) มีความสัมพันธ์ดังสมการ [11]

$$\theta = \text{Sin}^{-1} (1/\mu) \quad \dots\dots\dots(9)$$

เมื่อ μ = ดัชนีหักเหแสงของสาร

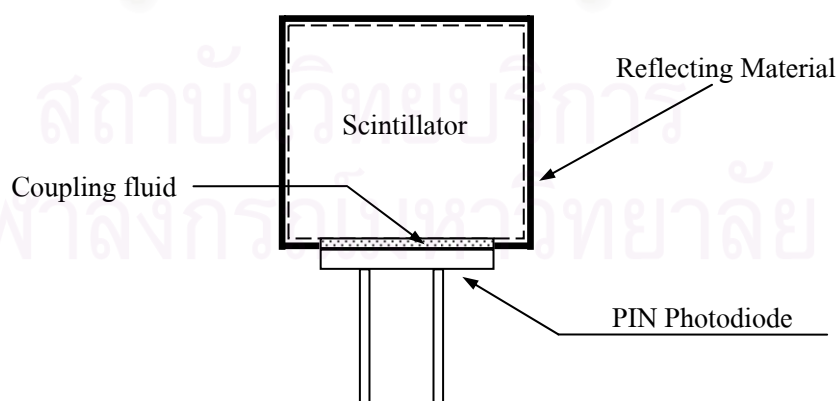
ดังนั้นในการนำผลึกซินทิลเลชันมาใช้งานกับอุปกรณ์ไวแสง จำเป็นต้องใช้วัสดุประสานรอยต่อนำแสง (Optical coupling) แทนที่ช่องว่างอากาศ โดยวัสดุประสานจะเป็นตัวช่วยลดดัชนีหักเหของแสงทำให้แสงตกกระทบผิวหน้าของอุปกรณ์ไวแสงมากขึ้น ตัวอย่างวัสดุประสานรอยต่อนำแสงได้แก่ กลีเซอริน (Glycerine) มิเนอร์รอลออยล์ (Mineral oil) ซิลิโคนออยล์ (Silicone oil) และ สาร DC2000 เป็นต้น ซึ่งวัสดุประสานรอยต่อนำแสงจะเป็นของเหลวใสที่มีดัชนีหักเหใกล้เคียงกับดัชนีหักเหของผลึก และมีความหนืด (Viscosity) อยู่ที่ 10^6 เซนติสโตคส์ (Centistokes) ในกรณีที่ใช้เชื่อมต่อแบบถาวร และมีความหนืดที่ 3×10^4 เซนติสโตคส์ สำหรับการเชื่อมต่อแบบชั่วคราว

3. การใช้วัสดุช่วยสะท้อนแสง (Reflector) เมื่อรังสีทำอันตรกิริยากับผลึกซินทิลเลชันจะทำให้เกิดประกายแสงกระจายออกจากผลึกในทุกทิศทาง แต่ในการใช้งานกับอุปกรณ์ไวแสงส่วนมากแล้วจะมีเฉพาะผิวด้านใดด้านหนึ่งของผลึกที่สัมผัสกับส่วนไวแสง ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องอย่างยิ่งที่จะต้องสะท้อนประกายแสงในด้านอื่นๆ ให้กลับมาบริเวณผิวหน้าของวัสดุไวแสง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการกำเนิดสัญญาณ สำหรับวัสดุพื้นฐานที่ใช้ในการสะท้อนประกายแสงย่านความยาวคลื่น 300 – 500 nm ได้แก่ อลูมิเนียมฟอยล์ (Aluminium foil) ส่วนประสิทธิภาพการสะท้อนแสงของวัสดุอื่นๆ แสดงในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 แสดงประสิทธิภาพของวัสดุสะท้อนแสงชนิดต่างๆ [11]

จากผลของการสูญเสียปริมาณแสงดังกล่าวข้างต้น การประกอบผลึกเรืองรังสีและฟิโนโฟโตไดโอดเพื่อใช้เป็นหัววัดรังสีชนิดซินทิลเลชันจะต้องประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 การประกอบผลึกวัดรังสีกับฟิโนโฟโตไดโอด [9]

บทที่ 3

การพัฒนากระบวนการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (ทลเลียม)

งานวิจัยนี้มีประสงค์เพื่อปลูกผลึกวัดรังสีซินทิลเลชันชนิด CsI(Tl) สำหรับประกอบกับฟิโนโตไดโอด ดังนั้นงานวิจัยจึงเริ่มจากการศึกษาและออกแบบระบบปลูกผลึกอย่างง่ายแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์ทเกอร์ พร้อมทั้งการเตรียมสารเริ่มต้นในการปลูกผลึก CsI(Tl) จากนั้นจึงนำผลึกวัดรังสีที่ปลูกขึ้นได้มาศึกษาคุณสมบัติก่อนประกอบกับฟิโนโตไดโอด เพื่อทดสอบความสามารถในการวัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

3.1 ข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาระบบปลูกผลึก

ซีเซียมไอโอไดด์เป็นสารประกอบในกลุ่มอัลคาไลน์-เฮไลด์ (Alkaline halide) มีจุดหลอมเหลว 621°C สามารถระเหยสู่บรรยากาศได้ง่าย ขณะที่ทลเลียมที่ใช้เป็นสารเจือจะอยู่ในรูปสารประกอบทลเลียมไอโอไดด์ ซึ่งมีจุดหลอมละลาย 440°C มีความเป็นพิษต่อร่างกาย (รายละเอียดในภาคผนวก ก.) จากข้อมูลดังกล่าวทำให้จำเป็นต้องออกแบบท่อปลูกผลึกเป็นระบบปิด โดยกระบวนการอย่างง่ายในการปลูกผลึกเลือกใช้เทคนิคการปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์ทเกอร์ จากสารหลอมเหลวภายใต้ความดันบรรยากาศของก๊าซอาร์กอน ซึ่งไม่เกิดปฏิกิริยาเคมีกับ CsI และ TlI ระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้นออกแบบให้ใช้อุปกรณ์พื้นฐาน และให้สมรรถนะเพียงพอในการปลูกผลึกของสารดังกล่าว มีส่วนประกอบที่สำคัญดังนี้

1. ชุดเตาหลอม 2 โซน และระบบควบคุมอุณหภูมิแบบ PID สามารถควบคุมอุณหภูมิของชุดเตาหลอมอุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำได้อิสระจากกัน ออกแบบให้สามารถทำอุณหภูมิสูงสุดได้ 1000°C ซึ่งเป็นอุณหภูมิเหนือจุดหลอมเหลวของ CsI (621°C) และ TlI (440°C) ตามข้อมูลในภาคผนวก ข.

2. ระบบบันทึกข้อมูลและสร้างเส้นกราฟอุณหภูมิด้วยไมโครคอมพิวเตอร์ พัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบอัตราการเพิ่มอุณหภูมิของเตาหลอม และการปรับแกวเดียนท์ของอุณหภูมิภายในท่อปลูกผลึก ขณะสารเริ่มต้น (Charge sample) เคลื่อนที่ในโซนปลูกผลึก

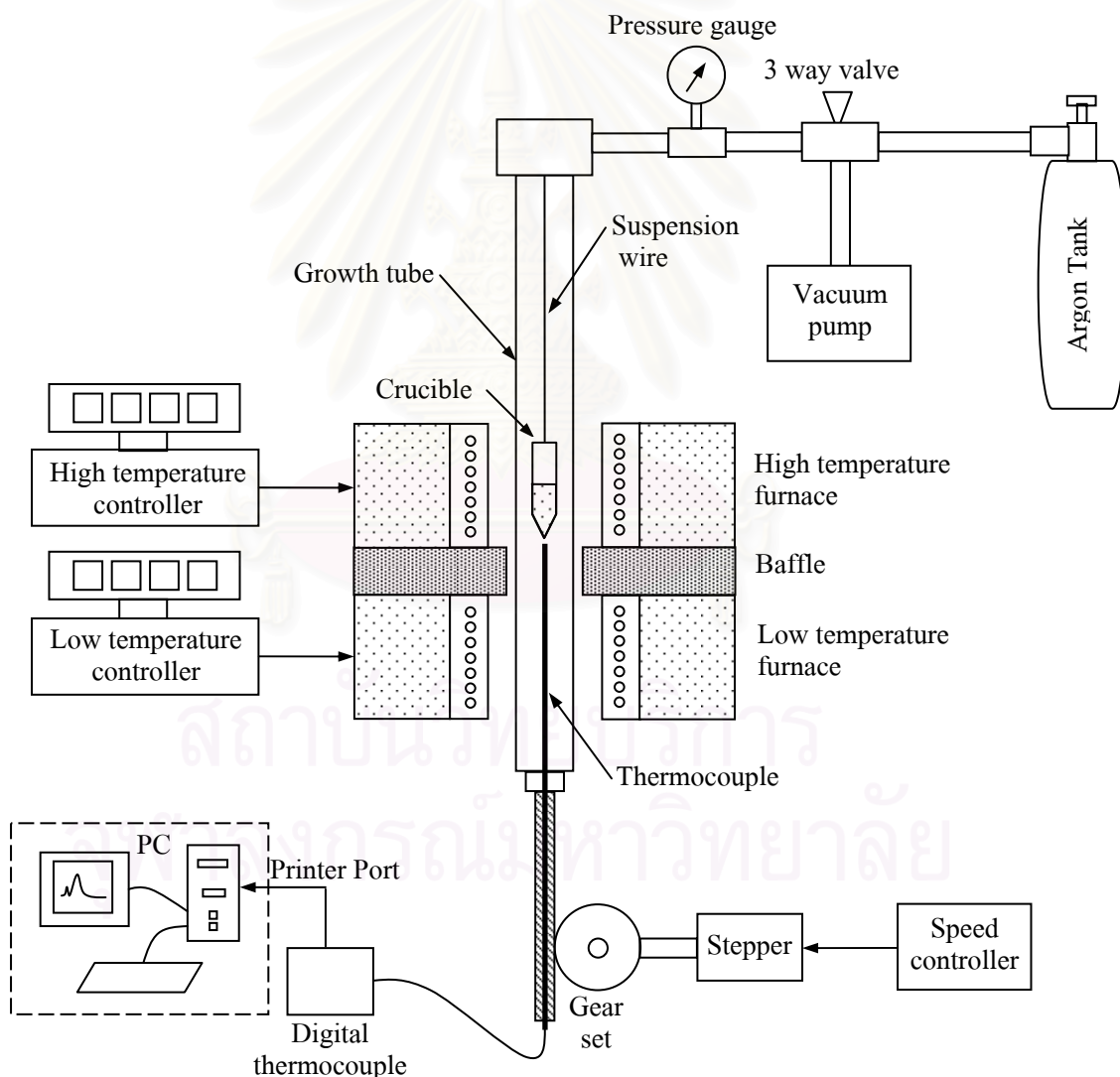
3. ท่อปลูกผลึก (Growth tube) รูปทรงกระบอกขนาดมาตรฐานขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 38 มิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร เป็นแบบปลายปิดด้านล่าง และฝาด้านบนออกแบบให้เปิดปิดสำหรับใส่สารเริ่มต้น และมีท่อสำหรับสูบลูญากาศพร้อมอัดก๊าซอาร์กอน

4. ระบบสุญญากาศและระบบควบคุมความดันก๊าซอาร์กอน สำหรับสูบลูกฟูกออก หลังบรรจุสารเริ่มต้นในภาชนะปลูกผลึกและอัดก๊าซอาร์กอน ก่อนหลอมผงสารเริ่มต้นตาม กระบวนการปลูกผลึก

5. ระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก เลือกใช้ระบบเฟืองทดรอบ ขับเคลื่อนด้วยสเต็ปเปอร์ (Stepper) สามารถปรับอัตราเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกได้จาก 0.1 – 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง

6. ภาชนะปลูกผลึก (Crucible) รูปทรงกระบอกปลายแหลม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร

ส่วนประกอบทั้งหมดประกอบกันเป็นระบบเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ แบบประหยัด ดังแผนภาพการสร้างในรูปที่ 3.1



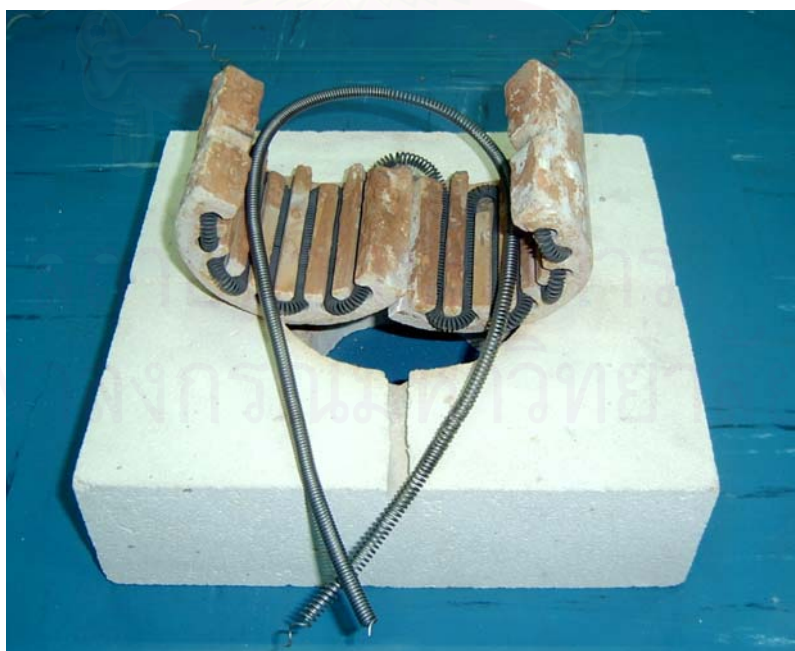
รูปที่ 3.1 แผนภาพโครงสร้างของเตาปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ที่พัฒนาขึ้น

3.2 การพัฒนาเตาปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์

จากรายละเอียดองค์ประกอบใน โครงสร้างเตาปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ สามารถออกแบบสร้างส่วนต่างๆ ได้ดังนี้

3.2.1 ชุดเตาหลอมแบบ 2 โซน

โครงสร้างเตาหลอมออกแบบ โซนความร้อนให้เป็นรูปทรงกระบอก เตาหลอมอุณหภูมิสูง มีโซนความร้อนยาว 15 มิลลิเมตร และเตาหลอมอุณหภูมิต่ำมีโซนความร้อนยาว 22 มิลลิเมตร เลือกใช้ขดลวดความร้อนชนิด Kanthal-AF ขนาด 1.3 มิลลิเมตร ซึ่งทนอุณหภูมิสูงสุดได้ถึง 1400°C (รายละเอียดเพิ่มเติมในภาคผนวก ก.) เนื่องจากการปลุกผลึกนั้นเตาจะต้องทำงานหนักได้อย่างต่อเนื่อง กำลังไฟฟ้าของเตาหลอมออกแบบไว้ที่ 1.2 kW ซึ่งสามารถคำนวณความยาวของขดลวดความร้อนแล้วพันเป็นรูปคอยล์ (Helix) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร เพื่อบรรจุขดลวดความร้อนในร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ดังในรูปที่ 3.2 การปรับระยะห่างของขดลวดความร้อนมีผลต่อการจัดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณ โซนปลุกผลึก ดังนั้น ขดลวดความร้อนชุดบน (Primary heater) ซึ่งเป็นชุดที่ต้องตั้งอุณหภูมิสูงกว่า จุดหลอมเหลวของสารปลุกผลึกอย่างน้อย 20°C [2] จะพันให้มีความถี่สูงกว่าขดลวดความร้อนชุดล่าง (Secondary heater) ซึ่งโดยทั่วไปจะตั้งอุณหภูมิต่ำกว่าจุดหลอมเหลวของสารตามความเหมาะสมของการจัดเกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่ต้องการ



รูปที่ 3.2 แสดงลักษณะของร่องบรรจุขดลวดความร้อนทรงกระบอกที่บรรจุขดลวดความร้อน

ชุดเตาหลอมจะต้องออกแบบให้มีความเสถียรของอุณหภูมิ ดังนั้นจึงต้องจัดฉนวนป้องกันการสูญเสียความร้อน และการรบกวนของอุณหภูมิแวดล้อมจากภายนอกต่อบริเวณ โชนปลุกผลึก ชุดฉนวนกันความร้อนเลือกใช้อิฐเบาทนไฟเนื้ออ่อน มีพื้นที่หน้าตัด 11.5×23 ตารางเซนติเมตรหนา 7.5 เซนติเมตร (รายละเอียดในภาคผนวก ง.) นำมาตัดแต่งรูปเป็นส่วนประกอบของระบบเตาปลุกผลึกซึ่งมี 3 ส่วน ได้แก่

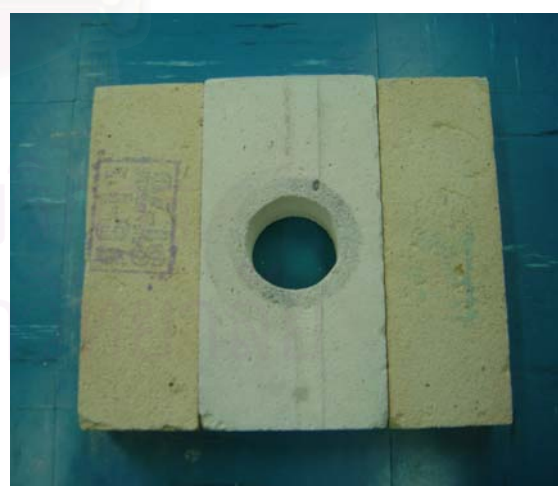
ก. ฉนวนที่ใช้ก่อเป็นตัวเตาหลอม จะหุ้มร่องบรรจุชุดลดความร้อนทรงกระบอก โดยเตาหลอมชุดบนหรือชุดอุณหภูมิสูงมีขนาดพื้นที่หน้าตัด 23×23 ตารางเซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตรเตาหลอมส่วนล่างมีขนาดพื้นที่หน้าตัดเท่ากันแต่สูง 22 เซนติเมตร

ข. ฉนวนที่ทำหน้าที่กันความร้อนโดยรอบชั้นนอกของเตาหลอมทั้งอุณหภูมิสูงและต่ำ ช่วยรักษาให้อุณหภูมิที่ผิวด้านนอกของเตาไม่สูงเกินไป และเกิดการสูญเสียความร้อนน้อย การสูญเสียความร้อนมากเกินไป นอกจากจะทำให้เกิดการไม่คงตัวของแกรเดียนท์ของอุณหภูมิแล้วยังทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการปลุกผลึกด้วย ในระบบเตาปลุกผลึกจะเพิ่มฉนวนโดยรอบของเตาปลุกผลึกด้านละ 5 เซนติเมตร ทำให้อุณหภูมิที่ผิวเตาขณะทำงานมีอุณหภูมิสูงสุดเพียง 95°C

ค. แบริล (Baffle) เป็นช่วงรอยต่อของโชนสำหรับปลุกผลึก เส้นผ่านศูนย์กลางของแบริลจะมีขนาดเล็กกว่าเส้นผ่านศูนย์กลางของเตาปลุกผลึกและใกล้เคียงกับเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อปลุกผลึก เนื่องจากต้องการให้เป็นส่วนป้องกันการรบกวนของอุณหภูมิของเตาทั้งสองโชนจากการเคลื่อนที่ผ่านของอากาศในบรรยากาศเกิดการพาความร้อนขึ้นระหว่างโชน



ก. อิฐทนไฟสำหรับเตาความร้อนและฉนวน



ข. แบริล



ค. ฉนวนกันความร้อน

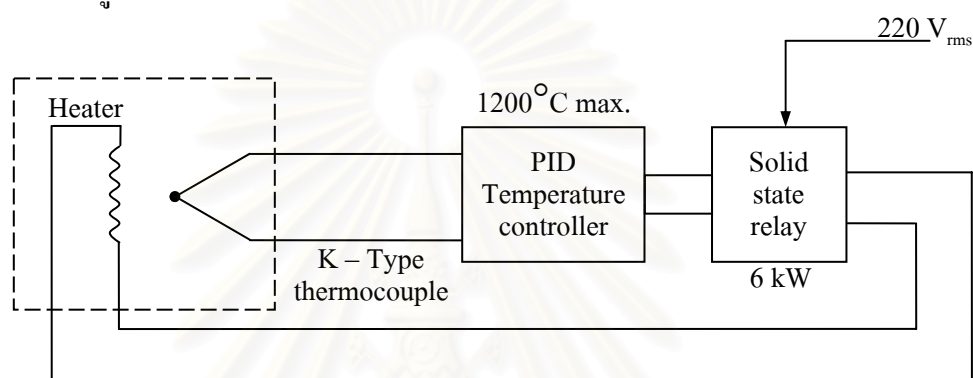
รูปที่ 3.3 แสดงส่วนประกอบของชุดเตาหลอม

3.2.2 ระบบควบคุมอุณหภูมิ

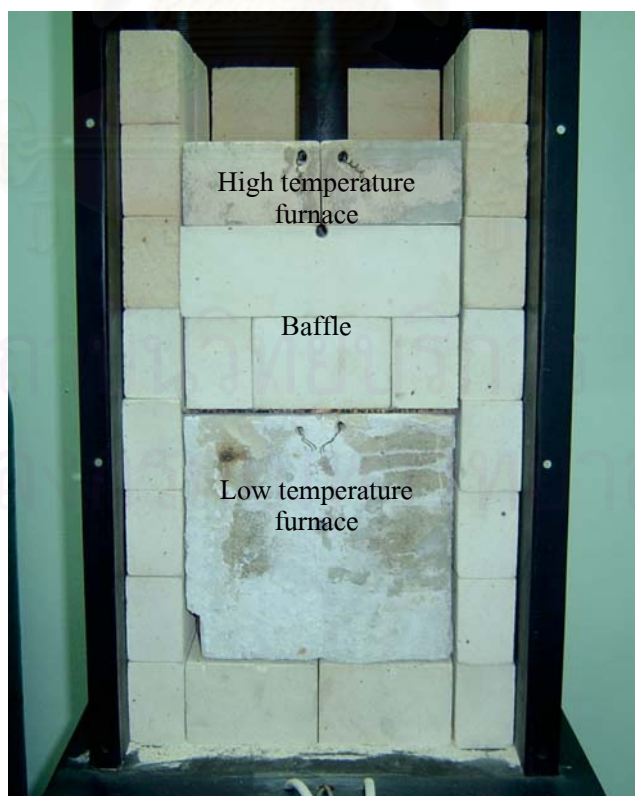
การควบคุมอุณหภูมิเตาหลอมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับระบบปลุกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ เพราะต้องควบคุมอุณหภูมิของระบบให้คงที่มากที่สุด ในระบบเตาปลุกผลึกมีสองโซนจะควบคุมอุณหภูมิอิสระจากกัน ดังนั้นจึงต้องมีระบบควบคุมอุณหภูมิสองชุดซึ่งมีส่วนประกอบที่เหมือนกันคือ ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ (Temperature sensors) ระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี (PID temperature controller) และ โซลิดสเตตรีเลย์ (Solid state relay) จัดวางจรดั่งแผนภาพรูปที่ 3.4

ก. เตาอุณหภูมิต่ำ จะเลือกตัวตรวจวัดอุณหภูมิของระบบปลุกผลึกด้วยเทอร์โมคัปเปิลชนิด K เนื่องจากสามารถวัดอุณหภูมิสูงสุดถึง 1200°C ติดตั้งไว้กึ่งกลางของเตาเพื่อวัดอุณหภูมิที่ผิวด้านใน แล้วส่งสัญญาณเอาท์พุทไปยังระบบควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีของบริษัท FENWAL รุ่น AR24L (ข้อมูลเทคนิคในภาคผนวก จ.) ซึ่งจะเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิกับค่าที่ต้องการ (Set point) แล้วส่งสัญญาณควบคุมการเปิดปิดวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้าผ่าน โซลิดสเตตรีเลย์ของบริษัท ECHOWELL รุ่น P2425DL ซึ่งสามารถจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ถึง 6 kW

ข. เตาอุณหภูมิสูงมีระบบควบคุมอุณหภูมิเช่นเดียวกับเตาอุณหภูมิต่ำ ต่างกันเพียงใช้ตัวควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดีของบริษัท SIGMA รุ่น SF49 (ข้อมูลเทคนิคในภาคผนวก จ.) ซึ่งมีฟังก์ชันสำหรับควบคุมอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิ (Ramp rate) ตั้งแต่ $0.1 - 200^{\circ}\text{C}$ ต่อนาที ทั้งนี้เพราะเตาอุณหภูมิสูงมีอุณหภูมิสูงมาก (ประมาณ $750 - 900^{\circ}\text{C}$) จึงต้องควบคุมให้เพิ่มอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องอย่างช้าๆ เพื่อป้องกันการเสียหายจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็ว (Temperature shock) และควบคุมให้สารที่ใช้ปลูกผลึกไม่เกิดการหลอมละลายเร็วเกินไป นอกจากนี้ยังใช้ควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิของผลึก (Cool down) ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการปลูกผลึก



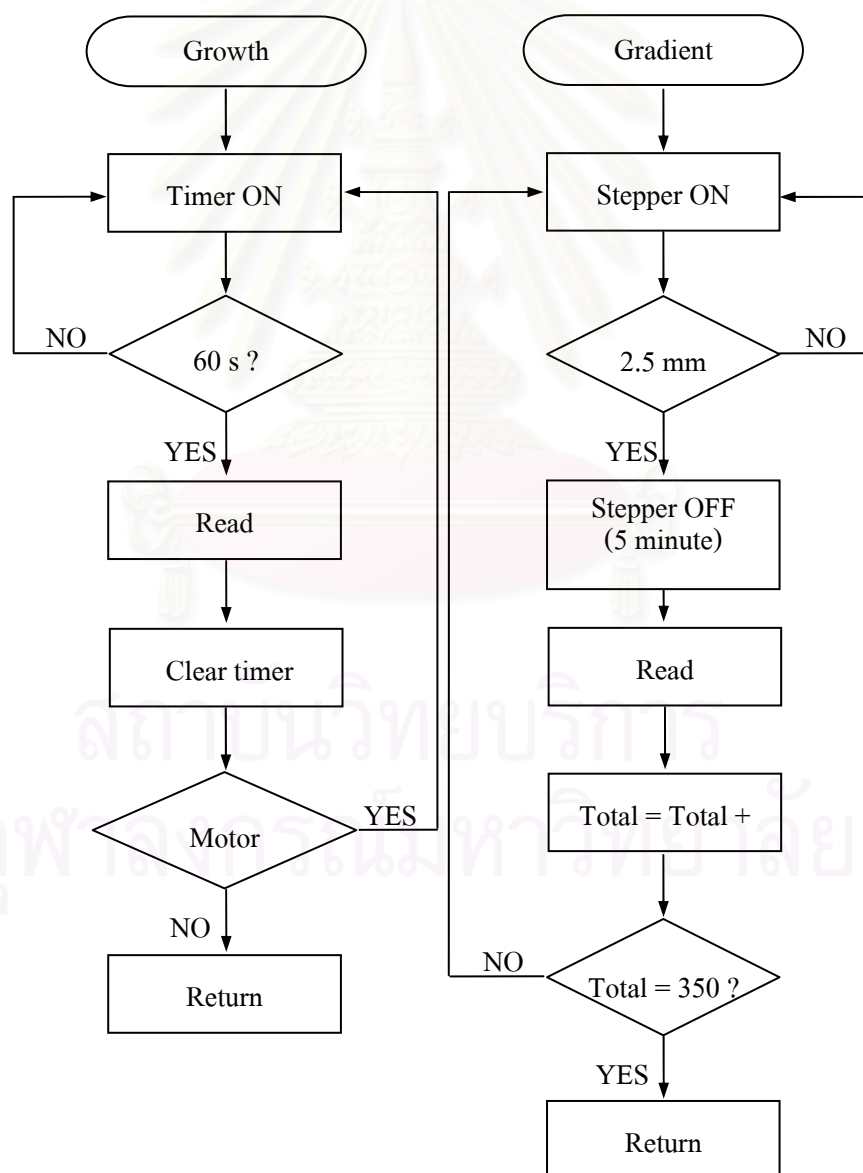
รูปที่ 3.4 แผนภาพวงจรควบคุมอุณหภูมิของเตาหลอม



รูปที่ 3.5 แสดงโครงสร้างของเตาปลูกผลึก

3.2.3 ระบบบันทึกข้อมูลและเส้นกราฟอุณหภูมิ

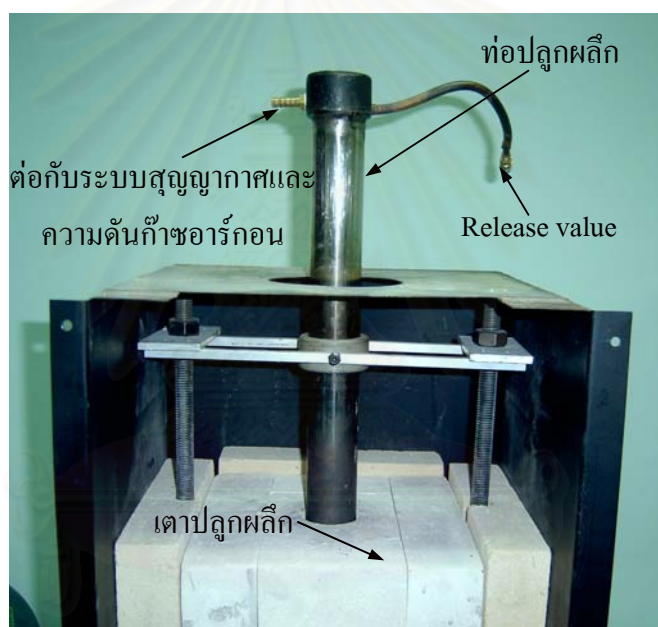
ในการทดลองเพื่อหาเงื่อนไขของการปลูกผัก จำเป็นต้องทดสอบอัตราการตอบสนอง อุณหภูมิขณะเพิ่มและลด หรือการจัดแตรเดียนท์ของอุณหภูมิให้เหมาะสมกับกระบวนการปลูกผัก จึงได้ออกแบบระบบบันทึกข้อมูลอุณหภูมิ โดยใช้เครื่องดิจิทัลเทอร์โมมิเตอร์อ่านค่าอุณหภูมิจาก บริเวณ โชนปลูกผักและส่งข้อมูลอุณหภูมิเชิงตัวเลขผ่านทางพอร์ตขนาน (Parallel port) ของ ไมโครคอมพิวเตอร์ ด้วยการพัฒนาโปรแกรมอ่านข้อมูลด้วยภาษา C โดยจะอ่านข้อมูลทุก 1 นาที ขณะทดลองปลูกผักแล้วบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลระหว่างเวลากับอุณหภูมิ และอ่านข้อมูลทุกระยะ การเคลื่อนที่ของท่อปลูกผัก 2.5 มิลลิเมตร (หลังจากหยุดรอ 5 นาที เพื่อให้อุณหภูมิลดลง) ขณะ ทดลองหาแตรเดียนท์ของอุณหภูมิแล้วบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลระหว่างระยะทางกับอุณหภูมิ โดยมี แผนผัง (Flow chart) การทำงานของโปรแกรมบันทึกข้อมูลดังรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 แผนผังการอ่านค่าอุณหภูมิ

3.2.4 ท่อปลุกผลึก

ท่อปลุกผลึกทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิม 304 (Stainless steel 304) ทรงกระบอกกลวง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 38 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ยาว 1200 มิลลิเมตร ส่วนล่างเชื่อมปิดสนิทแล้วเจาะรูสำหรับสอดเทอร์โมคัปเปิลเข้าไปด้านในเพื่อวัดอุณหภูมิภายในบริเวณโซนปลุกผลึก ส่วนด้านบนเชื่อมกับท่อทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร สำหรับท่อทรงกระบอกที่นำมาเชื่อมต่อส่วนบนนี้ ด้านหนึ่งจะกลึงให้มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 40 มิลลิเมตร เพื่อเชื่อมต่อกับท่อปลุกผลึก อีกด้านหนึ่งจะกลึงเป็นเกลียวภายในเพื่อใช้เปิดปิดนำภาชนะปลุกผลึกเข้าออกท่อปลุกผลึก ในขณะเดียวกันบริเวณด้านข้างเจาะรูขนาด 1/4 นิ้ว จำนวน 2 รู เพื่อเชื่อมต่อกับข้อต่อทองเหลืองสำหรับระบบสุญญากาศและควบคุมความดันก๊าซ ส่วนอีกทางหนึ่งใช้สำหรับติดตั้งวาล์วสำหรับปล่อยก๊าซส่วนเกินออก (Release valve) ดังโครงสร้างในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 แสดงลักษณะของท่อปลุกผลึก

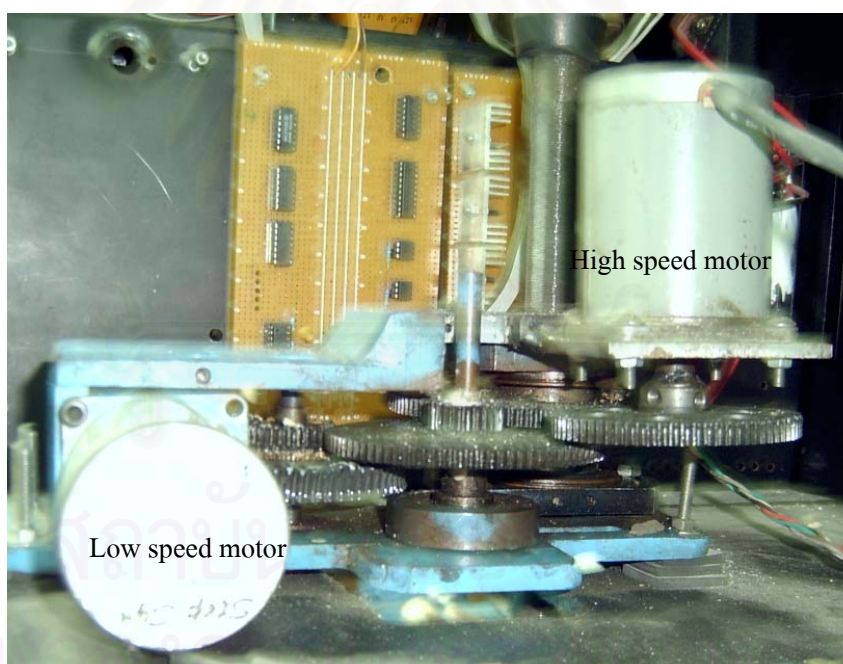
3.2.5 ระบบสุญญากาศและควบคุมความดันก๊าซในท่อ

การปลุกผลึกจำเป็นต้องกำจัดการอื่นๆ ที่อาจจะเกิดปฏิกิริยาใดๆ กับผลึกออกจากระบบ ดังนั้นต้องออกแบบระบบสุญญากาศเพื่อดูดอากาศออกจากท่อปลุกผลึก จากนั้นก็เติมก๊าซเฉื่อย (Inert gas) เข้าสู่ท่อปลุกผลึกซึ่งแขวนภาชนะปลุกผลึก ในระบบมีวาล์วทำหน้าที่เปิด-ปิดสลับเปลี่ยนการใช้งานระหว่างระบบสุญญากาศกับระบบควบคุมความดันก๊าซในท่อ ระบบสุญญากาศใช้เครื่องสูบแบบโรตารี (Rotary pump) เมื่อสูบอากาศภายในท่อปลุกผลึกจนถึงระดับที่ต้องการแล้วจะเปลี่ยนระบบวาล์วไปใช้งานเป็นระบบควบคุมความดันก๊าซ ซึ่งใช้ก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์

99.999% ควบคุมความดันผ่านอุปกรณ์ควบคุมความดันก๊าซ (Pressure regulator) แล้วอ่านมาตรวัดความดันภายในท่อปลุกผลึก

3.2.6 ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึก

ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึกเลือกใช้ระบบเฟืองทด ออกแบบให้ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึกที่ใช้ในการปลุกผลึก สามารถปรับระดับอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของท่อปลุกผลึกได้จาก 0.1 – 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง ประกอบด้วยสเต็ปเปอร์ (Stepper) และวงจรถับสเต็ปเปอร์ที่พัฒนาขึ้น ชุดเฟืองทดรอบซึ่งสามารถทดรอบได้ถึง 1/750 ประกอบอยู่กับเฟืองเกลิยวหอนที่มีระยะฟัน (Pitch) 1 มิลลิเมตร ทำหน้าที่รองรับการเคลื่อนที่ของท่อปลุกผลึก ในขณะที่ต้องการเคลื่อนท่อปลุกผลึกให้เข้าตำแหน่งของโซนเริ่มต้น ได้จัดระบบเฟืองทดให้มีอัตราการทดรอบเพียงแค่ 3/4 ใช้สเต็ปเปอร์เช่นเดียวกัน สามารถปรับอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลุกผลึกได้สูงสุดถึง 5 เซนติเมตร ต่อนาที ระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึกทั้งสองสัดส่วนแสดงในรูปที่ 3.8

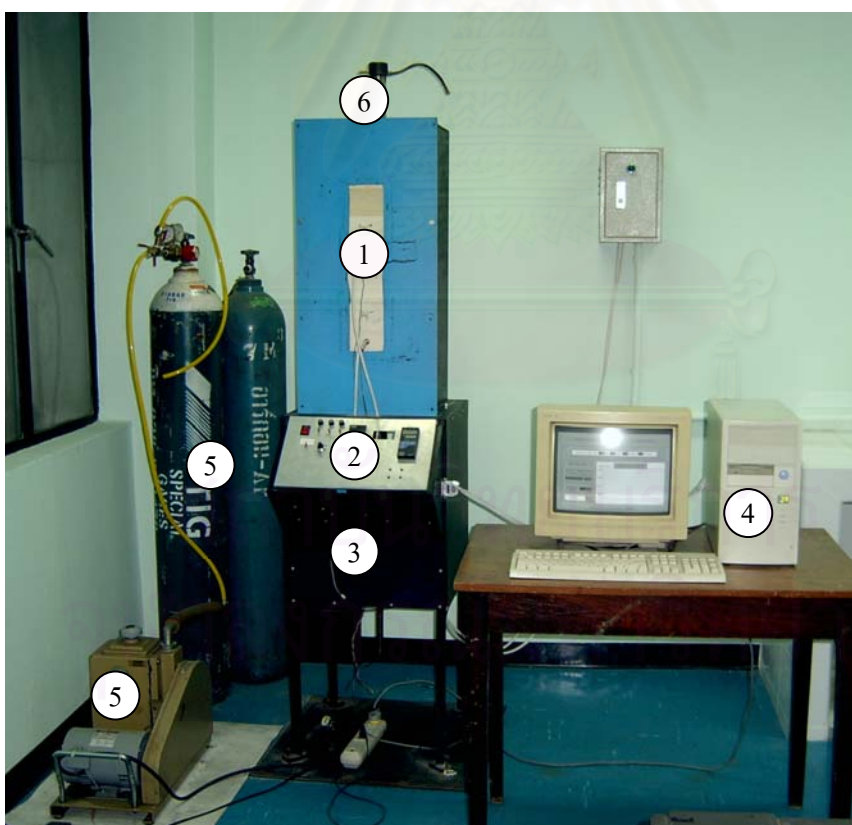


รูปที่ 3.8 แสดงระบบขับเคลื่อนท่อปลุกผลึก

3.2.7 ภาชนะปลูกผลึก

ภาชนะปลูกผลึกต้องทนความร้อนได้สูง ไม่เกิดปฏิกิริยาใดๆ กับสารที่ปลูกผลึก และมีสัมประสิทธิ์การขยายตัวทางความร้อนน้อยกว่าผลึก เนื่องจากขณะลดอุณหภูมิของผลึกจะทำให้เกิดการหดตัวของผลึกและภาชนะปลูกผลึก โดยผลึกควรจะหดตัวได้มากกว่าภาชนะปลูกผลึกเพื่อนำผลึกออกจากภาชนะปลูกผลึกได้ง่าย ทั้งนี้หากภาชนะปลูกผลึกสามารถหดตัวได้มากกว่าอาจทำให้ทั้งภาชนะปลูกผลึกหรือผลึกแตกออกจากกันในขณะที่ลดอุณหภูมิของผลึก ดังนั้นจึงใช้แก้วไวคอร์ทเป็นภาชนะปลูกผลึก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 มิลลิเมตร หนา 1 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร จากด้านบนลงมา 20 มิลลิเมตร ทำรอยบากสองจุดเพื่อใช้แขวนภาชนะปลูกผลึกไว้กับโช้ที่ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ออกแบบและสร้างขึ้นนำมาประกอบเป็นโครงยึด ซึ่งมีขนาด 34 ซม. x 34 ซม. x 200 ซม. ส่วนขาทั้งสี่ของโครงสร้างจะมีสกรูสำหรับปรับระดับเตาปลูกผลึกให้ตั้งตรงในแนวตั้ง ซึ่งจะวางอยู่บนแผ่นเหล็กที่วางอยู่บนแผ่นยางอีกชั้นหนึ่ง เพื่อทำหน้าที่ลดการสั่นสะเทือนที่เกิดจากพื้นที่ติดตั้ง ระบบปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้นแสดงในภาพถ่ายรูปที่ 3.9



1. เตาปลูกผลึก
2. ระบบควบคุมอุณหภูมิ
3. ระบบขับเคลื่อนท่อปลูกผลึก
4. ระบบบันทึกข้อมูลและ
เส้นกราฟอุณหภูมิ
5. ระบบสุญญากาศและควบคุม
ความดันก๊าซในท่อปลูกผลึก
6. ท่อปลูกผลึก

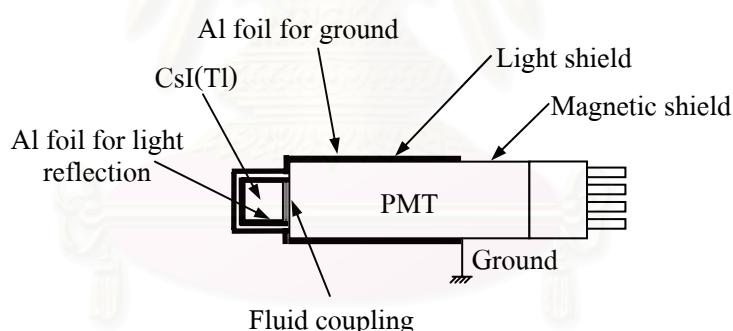
รูปที่ 3.9 เตาปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น

3.3 การออกแบบอุปกรณ์ทดสอบการตอบสนองการวัดรังสีของผลึก CsI(Tl)

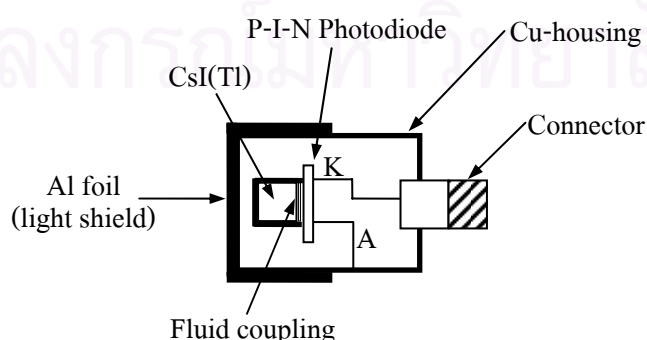
ผลึกวัดรังสีที่ปลูกได้จากงานวิจัยจะต้องนำมาทดสอบความสามารถในการวัดพลังงานรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา ดังนั้นจึงต้องออกแบบอุปกรณ์ทดลองและระบบวัดรังสีที่สามารถวิเคราะห์พลังงานของรังสีได้ โดยเลือกอุปกรณ์ขยายสัญญาณส่วนหน้าให้เหมาะกับอุปกรณ์ไวแสงที่ใช้ในการทดลอง

3.3.1 การประกอบอุปกรณ์ทดลองผลึกวัดรังสี

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกอุปกรณ์ไวแสง 2 ชนิด ในการทดสอบความสามารถในการวัดรังสีของผลึก CsI(Tl) ได้แก่ หลอดไวแสงชนิดทวีคูณอิเล็กตรอน (PMT) ของ RCA รุ่น 5819 ซึ่งรับแสงด้านหน้า มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 นิ้ว และฟิโนโฟโตไดโอดของ Hamamatsu เบอร์ S3590-8 (รายละเอียดเทคนิคในภาคผนวก จ.) มีพื้นที่รับแสง 100 ตารางมิลลิเมตร การประกอบอุปกรณ์ไวแสงเข้ากับผลึกวัดรังสีจะต้องระมัดระวังเรื่องแสงรบกวนจากภายนอก สิ่งรบกวนทางอิเล็กทรอนิกส์ และการประสานผลึกกับผิวรับแสงของอุปกรณ์ไวแสง ดังนั้นโครงสร้างของอุปกรณ์ทดลองทั้ง 2 แบบ จึงมีโครงสร้างดังในรูปที่ 3.10 และ 3.11



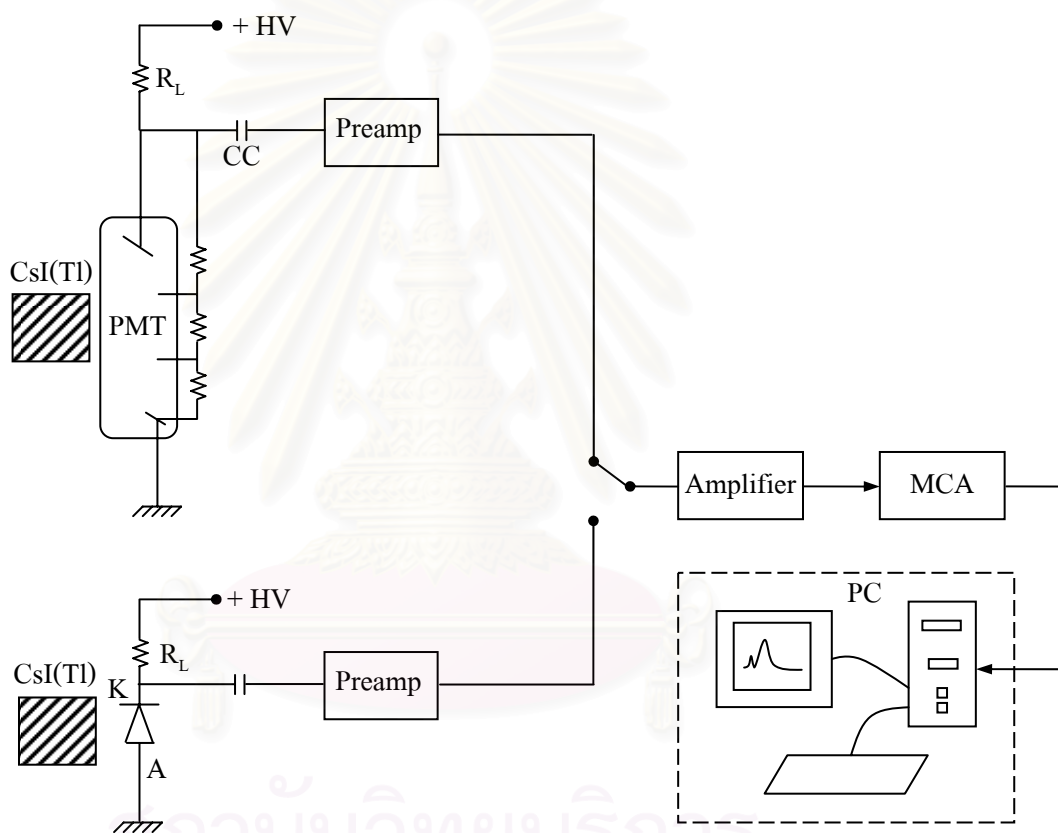
รูปที่ 3.10 แสดงการประกอบ PMT กับผลึก CsI(Tl)



รูปที่ 3.11 แสดงการประกอบ P-I-N Photodiode กับผลึก CsI(Tl)

3.3.2 ระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสี

การจัดระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสีแสดงในรูปที่ 3.12 ประกอบด้วย อุปกรณ์ขยายสัญญาณพัลส์ที่สามารถเลือกค่า shaping time ได้ อุปกรณ์วิเคราะห์แบบหลายช่อง (MCA) แหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูง สำหรับไบอัสหัววัดรังสี สำหรับอุปกรณ์ขยายส่วนหน้าของการทดลอง ใช้ PMT กับผลึกวัดรังสี เลือกใช้อุปกรณ์ขยายไวต่อแรงดันไฟฟ้า (Voltage sensitive) จัดวงจรแบบ pulse type ส่วนอุปกรณ์ขยายส่วนหน้าของการทดลองใช้ P-I-N photodiode กับผลึกวัดรังสี เลือกใช้อุปกรณ์ขยายไวต่อประจุ (Charge sensitive) จัดวงจรแบบ pulse type เช่นกัน



รูปที่ 3.12 การจัดระบบวิเคราะห์พลังงานของรังสี

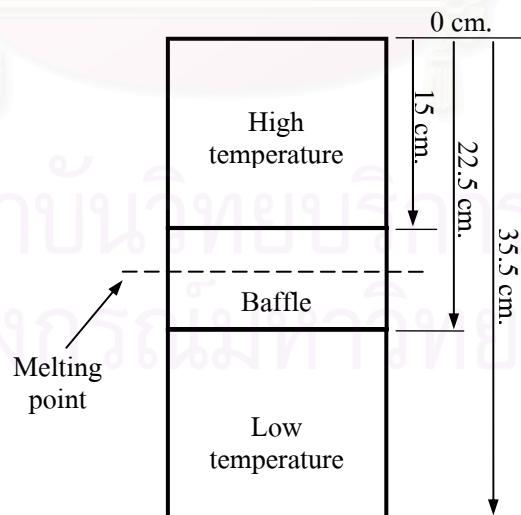
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ขั้นตอนการพัฒนากระบวนการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) อย่างง่าย ประกอบด้วย การพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ที่ใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่าย และการทดลองปลูกผลึกของซีเซียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) จากสารเริ่มต้นของผง CsI ความบริสุทธิ์ 99.9% และสารเจือทัลเลียมในรูปผง TII ความบริสุทธิ์ 99.999% ด้วยเงื่อนไขของการปลูกผลึกและอัตราส่วนของสารเจือต่างๆ เพื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติของผลึกใน 2 กรณี ได้แก่ การทดสอบคุณสมบัติความเป็นผลึกเดี่ยวและปริมาณสารเจือทัลเลียมในผลึก รวมทั้งการนำผลึกไปประกอบกับพินโพโตไดโอด เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นหัววัดซินทิลเลชันและทดสอบคุณสมบัติในการแจกแจงพลังงานในการวัดรังสีเอกซ์และรังสีแกมมา

4.1 การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึก

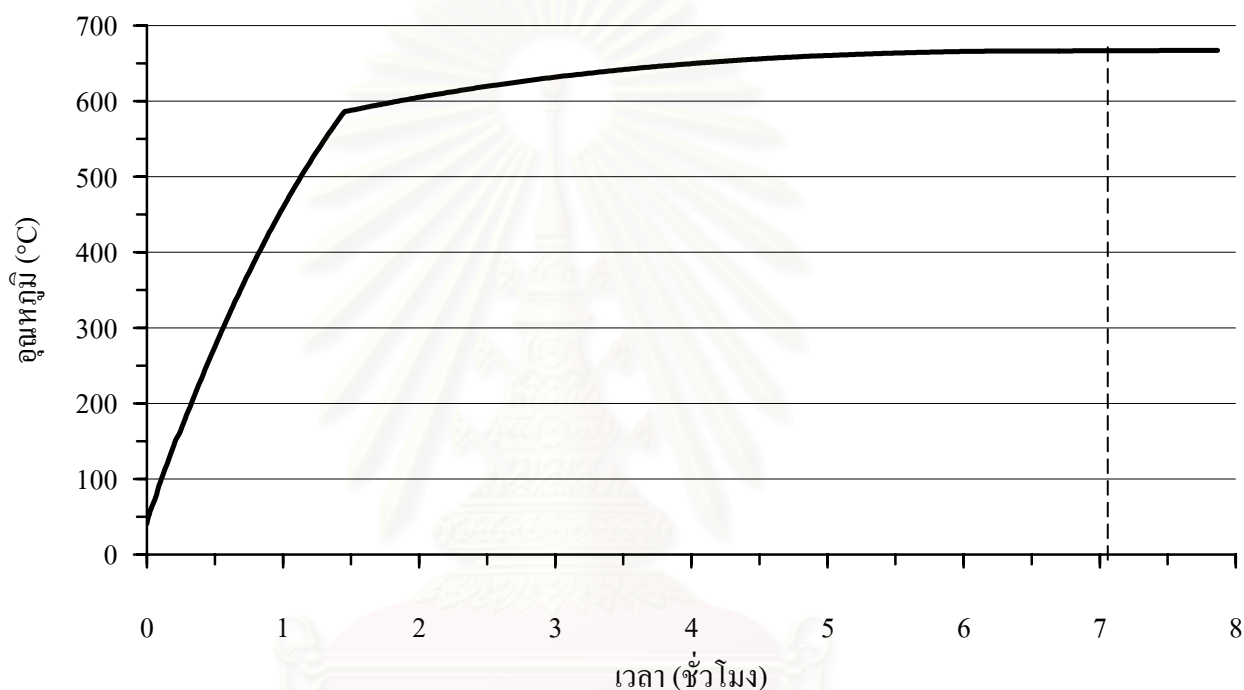
การทดสอบคุณลักษณะของเตาปลูกผลึกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การทดสอบผลตอบสนองการเพิ่มอุณหภูมิก่อนเข้าสู่สถานะเสถียร (Temperature response) และเกรเดียนท์ของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก เมื่อตั้งอุณหภูมิของเตาหลอมชุดอุณหภูมิสูงและชุดอุณหภูมิต่ำที่ระดับอุณหภูมิต่างๆ โดยแบ่งตำแหน่งการตรวจวัดอุณหภูมิ ณ บริเวณโซนปลูกผลึก ดังในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงตำแหน่งของการอ่านอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก

4.1.1 การทดสอบผลตอบแทนการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิ

เริ่มด้วยการติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลภายในท่อปลุกผลึก และสูบอากาศออกจากท่อปลุกผลึก จากนั้นอัดก๊าซอาร์กอนสู่ท่อปลุกผลึกที่ความดัน 2 บรรยากาศ จัดตำแหน่งของท่อปลุกผลึกให้ตำแหน่งของปลายเทอร์โมคัปเปิลอยู่บริเวณเริ่มต้นของการปลุกผลึกและเริ่มให้ความร้อนกับระบบพร้อมบันทึกค่าอุณหภูมิทุกๆ 1 นาที ผลการทดลองเป็นไปตามเส้นกราฟรูปที่ 4.2 โดยอัตราการเพิ่มของอุณหภูมิขึ้นกับการควบคุมของอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิเตาโซนบน จากผลการทดลองพบว่า อัตราการเพิ่มของอุณหภูมิที่เข้าสู่สภาวะเสถียรเร็วที่สุดในเวลา 7 ชั่วโมง

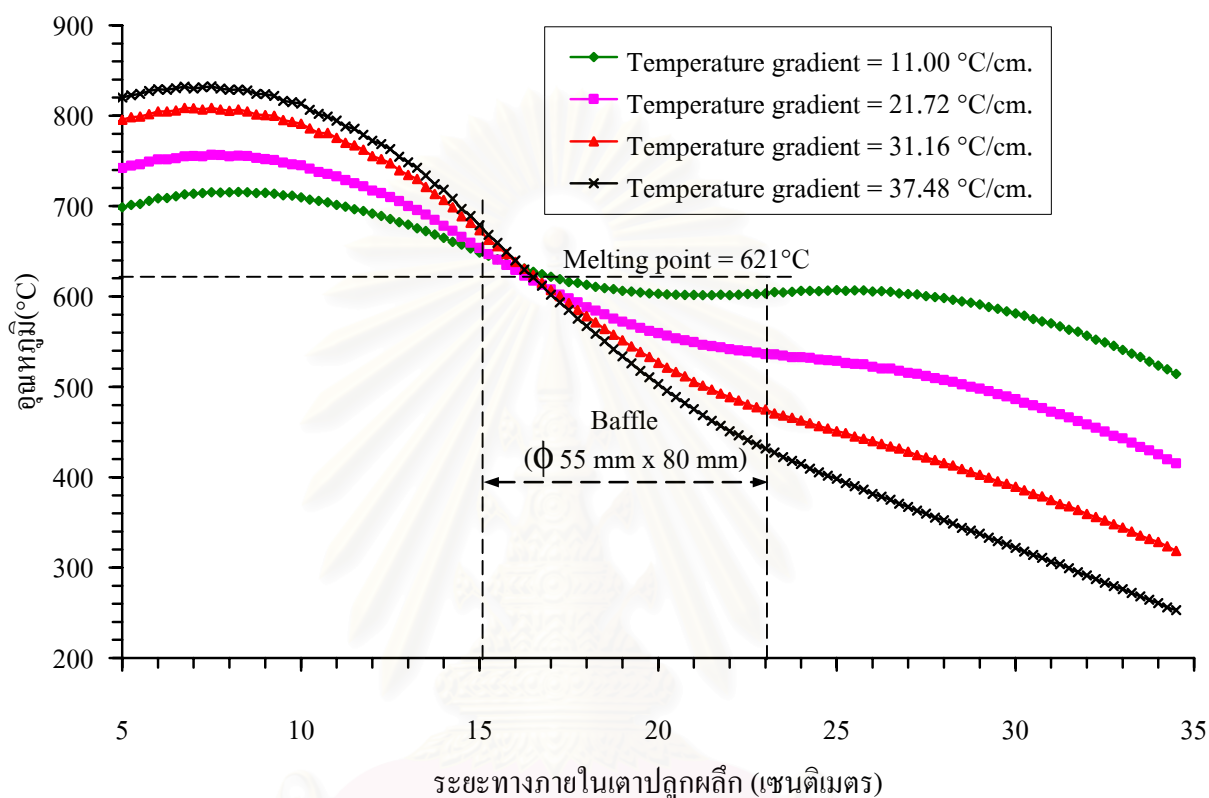


รูปที่ 4.2 เส้นกราฟแสดงผลตอบแทนการเข้าสู่สภาวะเสถียรของอุณหภูมิเตาปลุกผลึก

4.1.2 การทดสอบเกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (Temperature gradient)

การปรับเกรเดียนท์ของอุณหภูมิให้เหมาะสมกับกระบวนการปลุกผลึก เป็นการปรับโปรไฟล์ของอุณหภูมิ (Temperature profile) บริเวณโซนปลุกผลึกของเตาปลุกผลึกที่พัฒนาขึ้น เกรเดียนท์ของอุณหภูมิเกิดจากการตั้งค่าความแตกต่างของอุณหภูมิของเตาหลอมชุดอุณหภูมิสูงและเตาหลอมชุดอุณหภูมิต่ำ และเคลื่อนท่อปลุกผลึกให้เทอร์โมคัปเปิลวัดค่าอุณหภูมิตลอดโซนปลุกผลึกดังในรูปที่ 4.1 จากด้านบน (อุณหภูมิสูง) สู่ด้านล่าง (อุณหภูมิต่ำ) เพื่อหาตำแหน่งของจุดหลอมเหลวของสารปลุกผลึกบริเวณกึ่งกลางของแบบเฟิล ในการทดลองนี้จัดให้ระบบอ่านค่าอุณหภูมิด้วยไมโครคอมพิวเตอร์โดยควบคุมการเคลื่อนที่ของท่อปลุกผลึกพร้อมอ่านค่าอุณหภูมิหลังจากหยุดการเคลื่อนที่ของท่อปลุกผลึกเป็นเวลา 5 นาที ทุกระยะทาง 2.5 มิลลิเมตร ผลทดลอง

ปรับค่าความแตกต่างของอุณหภูมิและขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบฟเฟิล 55 และ 70 มิลลิเมตร หน้า 80 มิลลิเมตร พบว่าแบฟเฟิลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร จะให้ความเสถียรของอุณหภูมิดีกว่าและให้เส้นกราฟแกรเดียนท์ของอุณหภูมิดังรูปที่ 4.3 พร้อมตารางที่ 4.1 สรุปเงื่อนไขแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ



รูปที่ 4.3 เส้นกราฟคุณลักษณะแกรเดียนท์อุณหภูมิของเตาปลุกผลึกที่พัฒนาขึ้น
เมื่อใช้แบฟเฟิลขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มิลลิเมตร

ตารางที่ 4.1 แสดงแกรเดียนท์ของอุณหภูมิจากการทดลองใช้แบฟเฟิลเส้นผ่านศูนย์กลาง 55 มม.

แกรเดียนท์ของอุณหภูมิ (°C/cm)	อุณหภูมิของเตาอุณหภูมิสูง (°C)	อุณหภูมิของเตาอุณหภูมิต่ำ (°C)
11.00	725	550
21.72	767	455
31.16	820	355
37.48	845	285

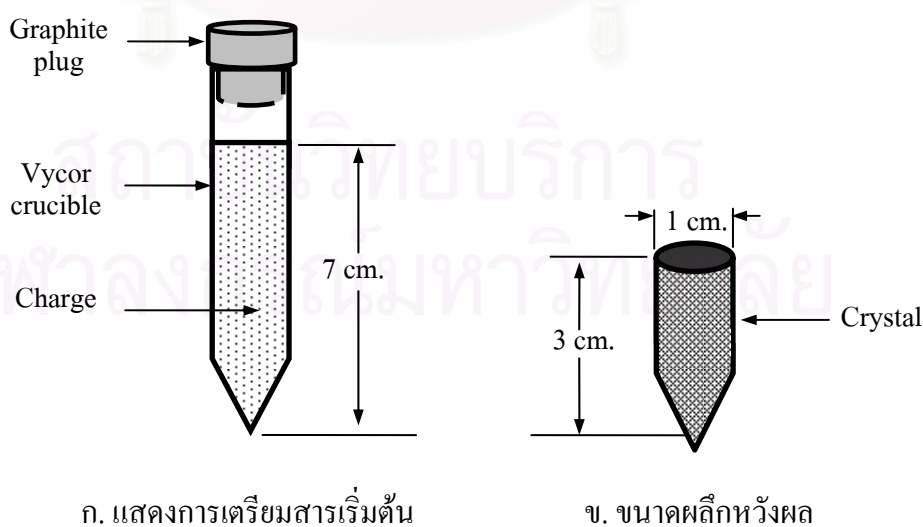
4.2 การทดลองปลูกผลึก

4.2.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

1. สารเคมี ได้แก่ CsI ชนิดผงความบริสุทธิ์ 99.9% และ TII ชนิดผงความบริสุทธิ์ 99.999%
2. ภาชนะปลูกผลึกทำด้วยแก้วไวคอร์ (Vycor) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ยาว 100 มิลลิเมตร มีขนาดมุมก้นแก้วประมาณ 60°
3. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด 0.0001 กรัม
4. ก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999%
5. เตาปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้น
6. เครื่องทำความสะอาดชนิดอัลตราโซนิค (Ultrasonic cleaner)

4.2.2 การเตรียมสารปลูกผลึก

ได้ทดลองเตรียมสารปลูกผลึกเพื่อทดลองปลูกผลึก CsI และ CsI(Tl) โดยคำนวณหาปริมาณสารต่อปริมาตรหลังการหลอมและก่อผลึกในภาชนะบรรจุ พร้อมทั้งปริมาณของสารเจือปนที่เติมในเงื่อนไขต่างๆ ในการทดลองนี้ได้ทดลองเตรียมสัดส่วนของสารเพื่อบรรจุในภาชนะปลูกผลึกไวคอร์เส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร และสูง 100 มิลลิเมตร หรือปริมาตรที่หวังผลประมาณ 2.4 ลูกบาศก์เซนติเมตร เพื่อให้ได้ผลึกที่ปลูกขึ้นมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนา 30 มิลลิเมตร ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แสดงลักษณะของภาชนะบรรจุสารและรูปร่างผลึก

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของส่วนผสมของสารที่ใช้ในการปลูกผลึก

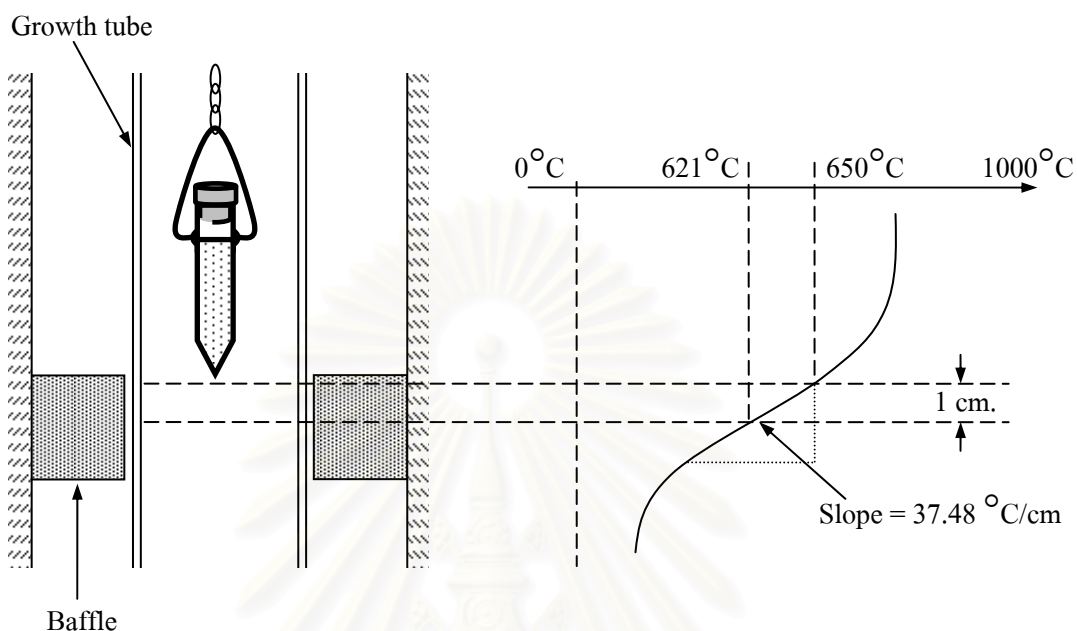
รหัสผลึก	ปริมาณสารเจือ TI (% โดยโมล)	น้ำหนักของผง CsI (กรัม)	น้ำหนักของผง TII (มิลลิกรัม)
C002	0.3619	9.87542	45.74
C003	0.1079	9.47416	13.05
C004	0.0599	11.24742	8.05
C005	0.1772	8.92457	20.20

การบรรจุสารเริ่มต้นจะต้องทำความสะอาดภาชนะบรรจุด้วย Ultrasonic cleaner และผสมสารเริ่มต้นให้เข้ากัน บรรจุลงในภาชนะปลูกผลึกด้วยการสั่นให้เนื้อแน่นและปิดฝาด้วยแกรไฟท์ เพื่อป้องกันการฟุ้งกระจายของสารที่ลเลียมภายในท่อปลูกผลึก เนื่องจากมีจุดหลอมเหลวต่ำกว่าซีเซียมไอโอไดด์

4.2.3 การปลูกผลึกด้วยกระบวนการแบบบริดจ์แมนชนิดแนวตั้ง

สารที่เตรียมได้ในภาชนะบรรจุจะนำมาแขวนในท่อปลูกผลึกด้วยโซ่เหล็กกล้าไร้สนิมเพื่อลดการสั่นสะเทือนจากการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก และทำการสูบอากาศออกจากท่อปลูกผลึกประมาณ 1 ชั่วโมง ก่อนอัดก๊าซอาร์กอนความบริสุทธิ์ 99.999% ความดัน 2 เท่าบรรยากาศ การปลูกผลึกเริ่มจากการปรับอุณหภูมิของเตาหลอมทั้ง 2 โซนให้ได้แกรเดียนต์ตามเงื่อนไขที่ต้องการ ในการทดลองนี้เลือกใช้แกรเดียนต์ของอุณหภูมิที่ $37.48^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ พร้อมทั้งจัดตำแหน่งปลายภาชนะปลูกผลึกให้อยู่เหนือระดับตำแหน่งอุณหภูมิหลอมเหลวของสารซีเซียมไอโอไดด์ประมาณ 1 เซนติเมตร ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีอุณหภูมิสูงกว่าจุดหลอมเหลวประมาณ 30°C ดังแสดงในรูปที่ 4.5 เริ่มเดินระบบควบคุมอุณหภูมิภายในโซนปลูกผลึกและรอให้ระบบเข้าสู่สภาวะเสถียรเป็นเวลา 7 ชั่วโมง ก่อนเคลื่อนท่อปลูกผลึกด้วยอัตราเร็วต่างๆ ที่เลือกใช้ในการทดลองแต่ละครั้ง หลังจากส่วนบนสุดของผลึกเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งจุดหลอมเหลวของซีเซียมไอโอไดด์ (621°C) เป็นระยะทางประมาณ 1 เซนติเมตร หรืออุณหภูมิบริเวณส่วนบนสุดของผลึกต่ำกว่าจุดหลอมเหลวประมาณ 30°C แล้ว จะปรับเปลี่ยนอัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของภาชนะปลูกผลึกเป็น 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง สำหรับกรณีของการปลูกผลึกด้วยอัตราเร็ว 1 และ 2 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เพื่อลดระยะเวลาในการปลูกผลึก รอจนกระทั่งส่วนบนสุดของผลึกเคลื่อนที่ผ่านตำแหน่งจุดหลอมเหลวของทลเลียมไอโอไดด์ (440°C) ประมาณ 1 เซนติเมตร จึงลดอุณหภูมิของเตาส่วนบนจาก 845°C เป็น 450°C โดยควบคุมอัตราการลดอุณหภูมิเป็น 1 องศาต่อนาที (ควบคุมโดยฟังก์ชันของตัวควบคุมอุณหภูมิของเตาส่วนบน) ซึ่งจะใช้เวลาประมาณ 6 ชั่วโมง 30 นาที แล้วปิดระบบพลังงาน

ของเตาปลูกผลึกเพื่อให้เกิดการลดอุณหภูมิของระบบปลูกผลึกโดยธรรมชาติ รอจนกระทั่งเตาปลูกผลึกมีอุณหภูมิใกล้เคียงอุณหภูมิห้องแล้วจึงนำผลึกออกจากท่อปลูกผลึก



รูปที่ 4.5 การจัดตำแหน่งของภาชนะบรรจุสารในการปลูกผลึก

4.2.4 ผลการปลูกผลึก

จากการทดลองปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ เพื่อทดสอบผลของผลึกเบื้องต้น โดยเลือกแกรเดียนต์ของอุณหภูมิ $37.48^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ ซึ่งค่อนข้างจะให้ความเป็นเชิงเส้นของเส้นกราฟสูง และเปลี่ยนอัตราเร็วของท่อปลูกผลึกที่ 1, 2 และ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง พบว่าหากทำความสะอาดภาชนะปลูกผลึกไม่สะอาดพอ ผลึกจะเกิดความขุ่นและมีเนื้อไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากสิ่งสกปรกจะปะปนกับการจัดเรียงตัวขณะก่อผลึกทำให้สูญเสียระเบียบโครงสร้าง หลังจากทำความสะอาดภาชนะปลูกผลึกด้วยเครื่องอัลตราโซนิก ผลึกที่ปลูกได้จะมีลักษณะใส ขณะเดียวกันอัตราเร็วในการเคลื่อนท่อปลูกผลึกที่ทดลองยังอยู่ในช่วงที่สามารถก่อผลึกได้ดี จึงไม่แสดงผลความแตกต่างของผลึก สิ่งที่พบในการทดลองเบื้องต้น คือ ขณะปลูกผลึกโดยปิดฝาภาชนะปลูกผลึกและเปิดฝานั้น จะแสดงผลความแตกต่างที่ผิวหน้าส่วนบนของผลึก โดยขณะเปิดฝามักจะมีการยุบตัวเป็นหลุมของผิวหน้าผลึกและผิวไม่เรียบ

ดังนั้นในการปลูกผลึก CsI(Tl) จึงเลือกใช้อุณหภูมิเกรเดียนท์ 37.48°C และอัตราเร็วในช่วง 1, 2 และ 5 มิลลิเมตรต่อชั่วโมง เพื่อศึกษาเงื่อนไขในการก่อผลึกและศึกษาปริมาณของสารเจือทลเลียม ผลการทดลองปลูกผลึก CsI(Tl) จากการเตรียมสารเริ่มต้นตามตารางที่ 4.2 ให้ผลของรูปลักษณะในการปลูกผลึกดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.6 ในแง่ของผลึกวัดรังสีความใสของผลึก จะช่วยให้การส่งประกายแสงทำได้ดี และไม่เกิดการดูดกลืนความเข้มของประกายแสง

ตารางที่ 4.3 ผลของการปลูกผลึก CsI(Tl)

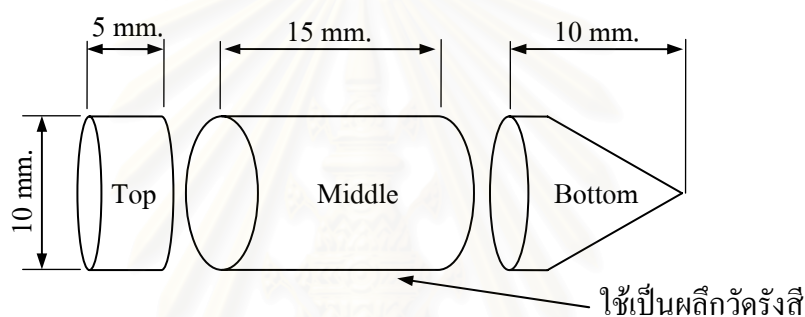
รหัสผลึก	อัตราเร็วของท่อปลูกผลึก (mm/h)	ปริมาณของสารเจือ Tl (% โดยโมล)	ลักษณะผลึก	สีของผลึก
C002	5	0.3619	ใส	เหลืองอ่อน
C003	1	0.1079	ใส	ใส
C004	2	0.0599	ใส	ใส
C005	1	0.1772	ใส	เหลืองอ่อน



รูปที่ 4.6 ตัวอย่างผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ที่ปลูกขึ้น

4.3 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติของผลึก

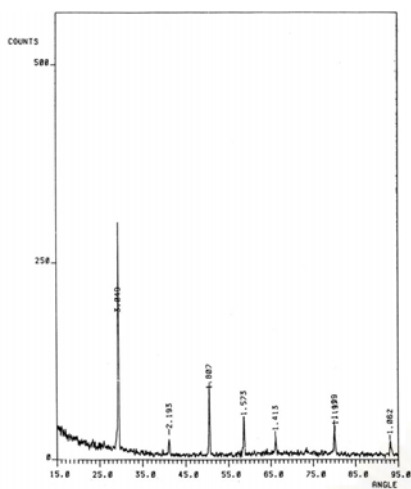
ผลึก CsI(Tl) ที่ได้จากกระบวนการปลูกผลึก ได้นำไปทดสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) เพื่อตรวจสอบความเป็นผลึกเดี่ยวและการวิเคราะห์หาปริมาณทลเลียมที่เจือในผลึกซีเซียมไอโอไดด์ ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์แบบแจกแจงพลังงาน (EDXRF) โดยตัดแบ่งผลึกออกเป็น 3 ส่วน ดังรูปที่ 4.7 เนื่องจากผลึกซีเซียมไอโอไดด์เป็นผลึกที่อ่อนเปราะ (Soft and brittle) การเตรียมผลึกจึงใช้เลื่อยฉลุซึ่งมีขนาดเล็กตัดชิ้นงานได้ จากนั้นนำไปขัดผิวผลึกให้เรียบและได้ระนาบ โดยใช้กระดาษทรายเบอร์ 1000 ขัดร่วมกับแอลกอฮอล์ และทำการขัดอย่างละเอียดอีกครั้งด้วยกระดาษทรายเบอร์ 4000 ร่วมกับแอลกอฮอล์ ตามด้วยการขัดกับผ้ากำมะหยี่



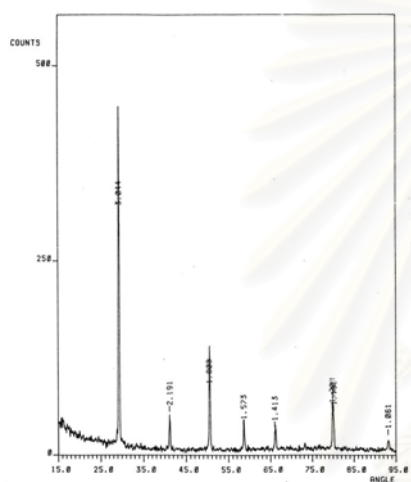
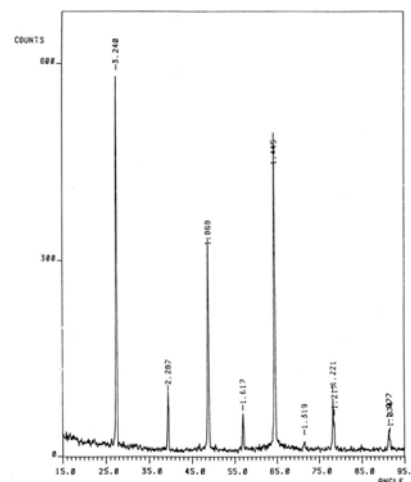
รูปที่ 4.7 แสดงการตัดผลึกเพื่อนำไปตรวจวิเคราะห์

4.3.1 ผลการวิเคราะห์ความเป็นผลึกเดี่ยว

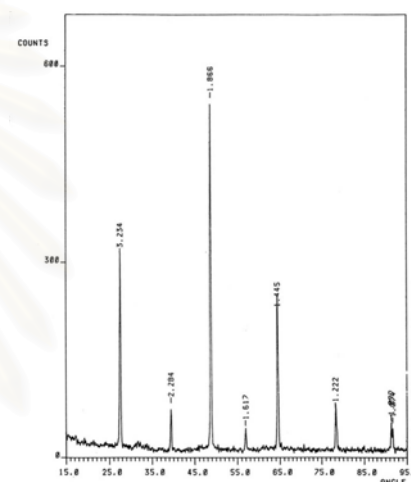
จากการนำผลึก CsI(Tl) รหัส C002, C003, C004 และ C005 ซึ่งปลูกผลึกด้วยแกรเดียนท์ของอุณหภูมิ แต่แตกต่างกันที่การผสมปริมาณสารทลเลียมก่อนปลูกผลึกและอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึก แบ่งออกเป็น 3 ส่วนดังรูปที่ 4.7 และนำผลึกส่วนกลางไปวิเคราะห์โครงสร้างผลึกด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (XRD) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์รุ่น JDX-8030 ของบริษัท JEOL ผลการตรวจวิเคราะห์ผลึกส่วนกลางด้านบนและด้านล่าง พบว่าผลึกมีความเป็นระนาบผลึกชัดเจนและมีระนาบเดียวกันทั้งด้านบนและด้านล่าง ดังผลวิเคราะห์ในรูปที่ 4.8



ผลึกส่วนบน



ผลึกส่วนล่าง



ก. ผลวิเคราะห์ XRD ของผลึก CsI(Tl) รหัส C002

ข. ผลวิเคราะห์ XRD ของผลึก CsI(Tl) รหัส C004



ค. ผลวิเคราะห์ XRD ของผง CsI

รูปที่ 4.8 ผลการตรวจวิเคราะห์ผลึก CsI(Tl) ที่ปลูกขึ้นด้วยเทคนิค XRD

4.3.2 ผลวิเคราะห์ปริมาณสารเจือปนในผลึก

ได้นำผลึกที่เตรียมได้หลังการวิเคราะห์โครงสร้างผลึกแล้ว มาวิเคราะห์หาปริมาณเจือปนด้วยเครื่องวิเคราะห์ EDXRF รุ่น ED2000 ของบริษัท Oxford โดยเลือกใช้โปรแกรมวิเคราะห์ชนิด Semi fundamental เนื่องจากตัวอย่างไม่มีปัญหาเรื่องผลของแมทริกซ์ (Matrix effect) ใช้เงื่อนไขวิเคราะห์ตามภาคผนวก ข. ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างแสดงในตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ผลวิเคราะห์ปริมาณสารเจือปนในผลึก CsI(Tl)

รหัสผลึก	Tl mol% ในผงสารเริ่มต้น	Tl mol% ในส่วนต่างๆ ของผลึก		
		Top	Middle	Bottom
C002	0.3619	0	0.0430	0.0548
C003	0.1079	0	0.0489	0.0490
C004	0.0599	0	0.0256	0.0255
C005	0.1772	0	0.0806	0.0103

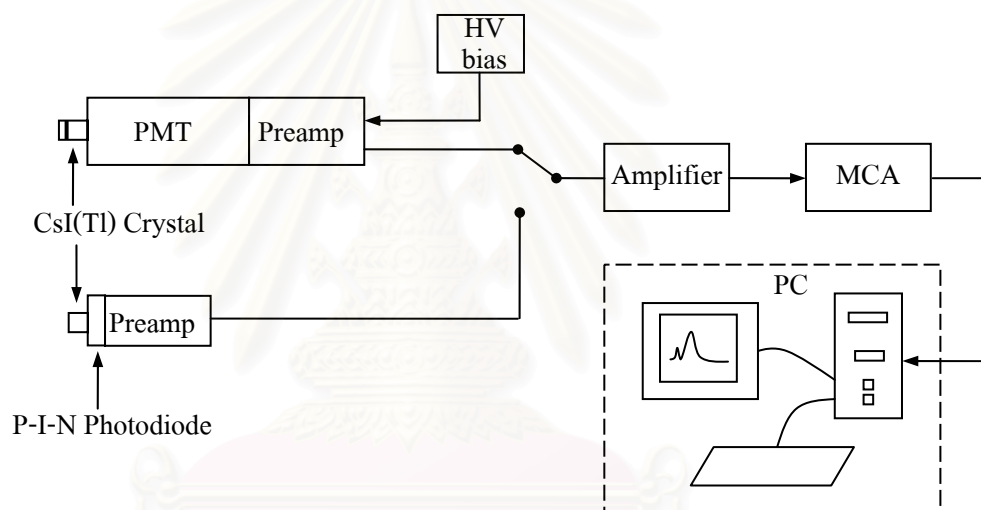
ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารเจือปนพบว่าการกระจายตัวของเจือปนในแนวเกรเดียนท์ที่ไม่สม่ำเสมอและไม่เป็นรูปแบบที่แน่นอน

4.4 การวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงาน

ได้นำผลึกส่วนกลาง (Middle) มาทดสอบคุณภาพในการวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมา โดยประกอบเข้ากับอุปกรณ์ไวแสง 2 ชนิด ได้แก่ หลอดไวแสงชนิดทวีปริมาณอิเล็กตรอน (PMT) และฟิโนโตไดโอด (P-I-N Photodiode) เนื่องจากผลึก CsI(Tl) มีความไวต่อความชื้นเล็กน้อย ดังนั้นเมื่อทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติผิวจะเริ่มขุ่น ก่อนประกอบเข้ากับอุปกรณ์ไวแสงจะต้องขัดผิวหน้าออกให้ถึงส่วนของผลึกที่ใส แล้วใช้สารเชื่อมประสานผิวหน้า (Fluid coupling) เพื่อให้หน้าสัมผัสผิวหน้าสนิทกับผิวหน้าของอุปกรณ์ไวแสง ลดการสูญเสียความเข้มประกายแสงที่จะหักเหจากทิศทาง และจำเป็นต้องเคลือบฟอสฟอโรลูมิเนียมที่ผิวส่วนที่เหลือเพื่อช่วยสะท้อนประกายแสงเข้าสู่ผิวหน้าของอุปกรณ์ไวแสง

4.4.1 วัสดุและอุปกรณ์ในการทดลอง

1. PMT (Photomultiplier Tube) ของ RCA model 5819
2. P-I-N Photodiode ของ Hamamatsu เบอร์ S3590-8
3. High voltage power supply ของ ORTEC model 478
4. Preamplifier with tube base ของ ORTEC model 276
5. Preamplifier ของ CANBERRA model 2006
6. Amplifier ของ CANBERRA model 2022
7. Multichannel analyzer ของ Tracor Northern model TN-1760
8. NIM bin with power supply ของ ORTEC model 4001C/4002A
9. ต้นกำเนิดรังสีแกมมา Cs-137 และ Am-241

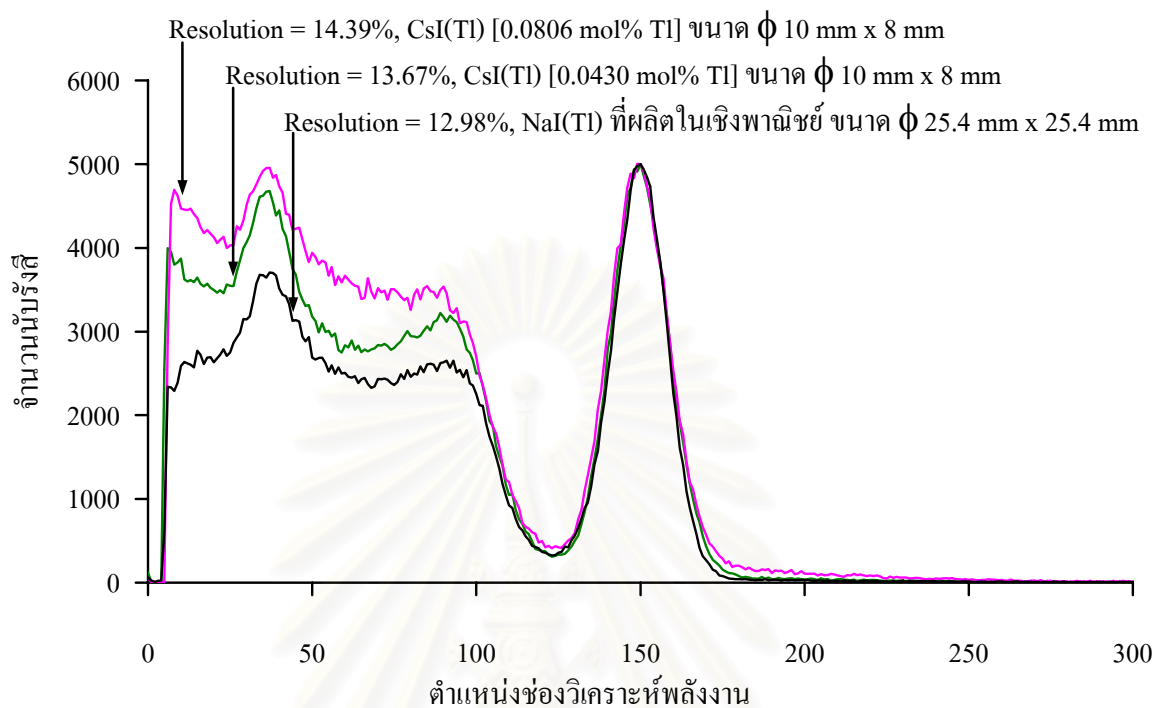


รูปที่ 4.9 แผนภาพการจัดระบบวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมา

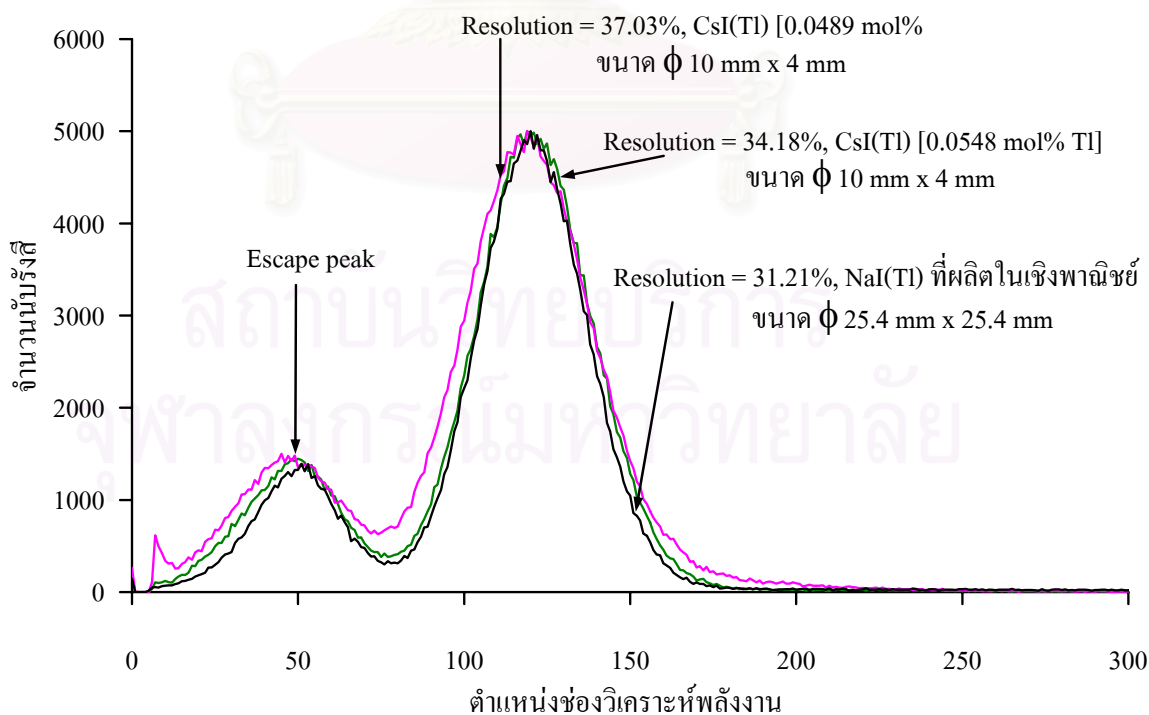
4.4.2 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานด้วยผลึก CsI(Tl) ประกอบกับ PMT

ตามปกติอุปกรณ์ไวแสง PMT จะเหมาะกับผลึกเรืองรังสี CsI(Na) [4] เนื่องจากย่านการปล่อยประจายแสงจะเหมาะกับบริเวณความไวสูงของการตอบสนองความไวแสงของ PMT ในการทดลองนี้ได้อาศัยบริเวณของย่านตอบสนองความไวแสงที่ต่ำกว่ามาศึกษาผลการปล่อยประจายแสงของ CsI(Tl) ซึ่งอยู่ในย่าน 320 – 750 nm ก่อนนำไปใช้กับโฟโตไดโอด ผลการทดลองใช้ผลึกวัดรังสีที่พัฒนาขึ้นที่ความแตกต่างของปริมาณที่เล็กลงและมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หน้า 8 มิลลิเมตร วัดพลังงานของรังสีแกมมา 662 keV ของ Cs-137 และผลึกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หน้า 4 มิลลิเมตร วัดพลังงาน 59.6 keV ของ Am-241 เปรียบเทียบกับผลึก NaI(Tl) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร หน้า 25.4 มิลลิเมตร ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ โดยวัด

ให้พีคพลังงานของรังสีสูงเท่ากันและอยู่ที่ตำแหน่งช่องวิเคราะห์พลังงานเดียวกัน ให้ผลการวิเคราะห์พลังงานดังสเปกตรัมใน รูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ



รูปที่ 4.10 สเปกตรัมพลังงานของ Cs-137 จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้น

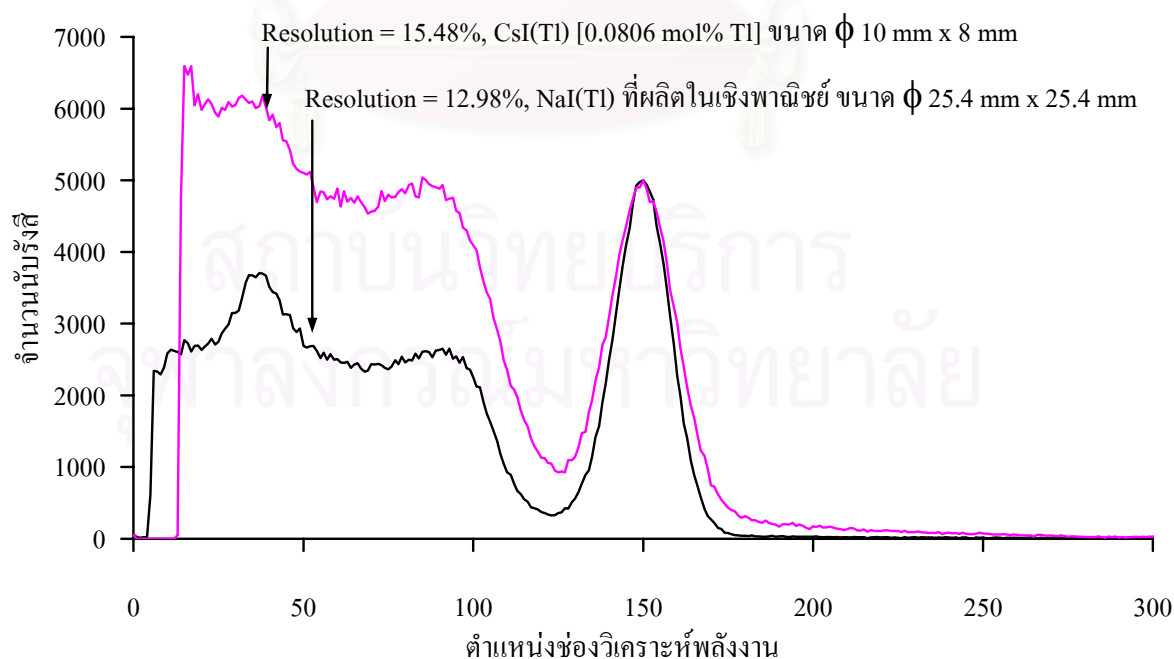


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมพลังงานของ Am-241 จากผลึกวัดรังสี CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้น

ผลของสเปกตรัมจากผลึกที่มีปริมาณทลเลียม 0.0256 – 0.0806 mol% ในการวัดพลังงานรังสีแกมมาของ Cs-137 โดยจัดระบบวัดดังรูปที่ 4.9 ด้วยการปรับตำแหน่งฟิคของพลังงานอยู่ที่ตำแหน่งเดียวกันและใช้ shaping time ที่ 2 μ s พบว่า ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน (Resolution) ระหว่าง 13.67 – 14.39% ซึ่งใกล้เคียงกับผลึกที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ซึ่งมีความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 12.98% และผลของสเปกตรัมของผลึกที่มีปริมาณทลเลียม 0.0548 และ 0.0489 mol% ในการวัดพลังงานของ Am-241 พบว่า ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 34.18% และ 37.03% ตามลำดับ ทั้งนี้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึกที่พัฒนาขึ้นจะสูงกว่าผลึกที่ผลิตในเชิงพาณิชย์เล็กน้อย โดยผลึกในเชิงพาณิชย์ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 31.21% ผลึก CsI(Tl) ที่พัฒนาขึ้นซึ่งมีสารเจือทลเลียมระหว่าง 0.0256 – 0.0806 mol% ให้ขนาดพัลส์ใกล้เคียงกัน เนื่องจากความสว่างประกายแสงใกล้เคียงกัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยของ Harshaw [4] ซึ่งได้กล่าวว่า ผลึก CsI ที่เจือสารทลเลียมระหว่าง 0.04 – 0.1 mol% จะให้ประสิทธิภาพของการเกิดประกายแสงมากกว่า 90%

4.4.3 ผลการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานด้วยผลึก CsI(Tl) ประกอบกับฟิโนโตไดโอด

จากการนำผลึกชุดเดียวกับการทดลองในข้อ 4.4.2 มาประกอบกับฟิโนโตไดโอด เพื่อวัดพลังงานของรังสีแกมมา 662 keV ของ Cs-137 ใช้ภาคขยายส่วนหน้าของบริษัท CANBERRA model 2006 วัดให้ฟิคของรังสีสูงเท่ากันและอยู่ที่ตำแหน่งช่องวิเคราะห์พลังงานเดียวกัน ให้ผลของสเปกตรัมพลังงานดังในรูปที่ 4.12

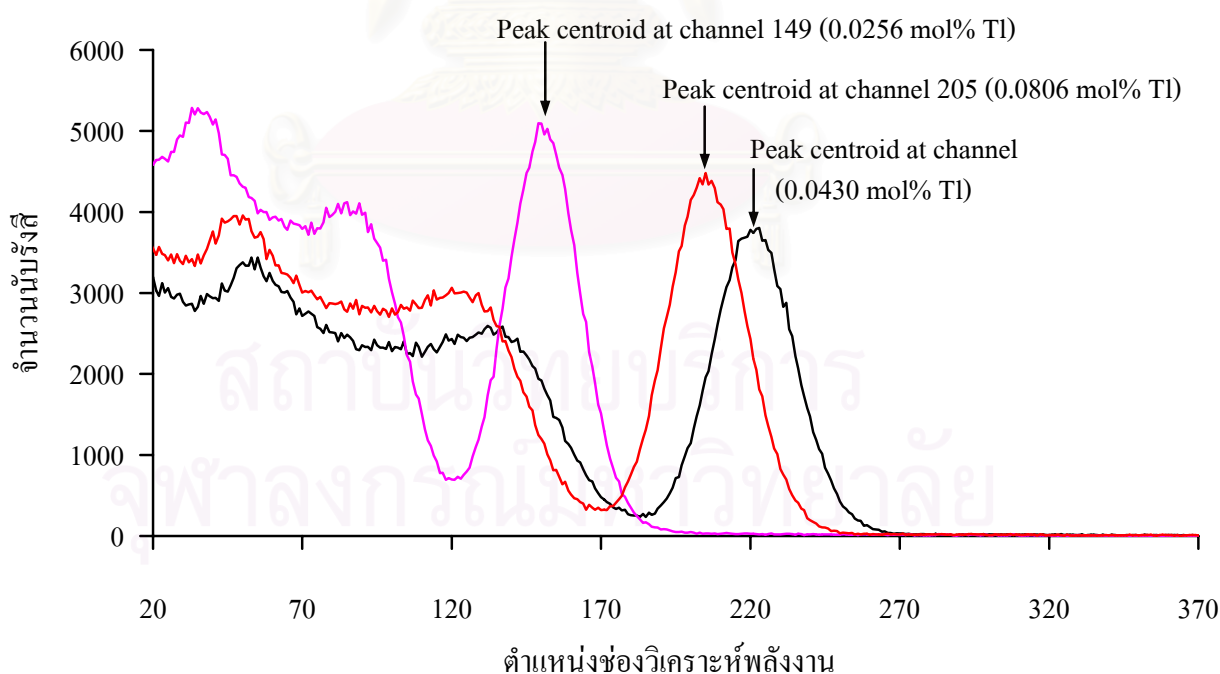


รูปที่ 4.12 สเปกตรัมพลังงานของ Cs-137 จากผลึก CsI(Tl) กับฟิโนโตไดโอด

ผลของสเปกตรัมพลังงาน 662 keV ของ Cs-137 ที่วิเคราะห์ได้จากระบบวัดในรูปที่ 4.9 พบว่าความสามารถในการแจกแจงพลังงานของผลึก CsI(Tl) ที่ใช้งานร่วมกับฟิโนโตไดโอดให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ดีกว่าผลึก NaI(Tl) ที่ใช้ในเชิงพาณิชย์ที่ใช้งานร่วมกับ PMT โดยให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 15.48% ที่ปริมาณทลเลียม 0.0806 mol% ในขณะที่ผลึกที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงานที่ 12.98%

4.4.4 ประสิทธิภาพการแปลงประกายแสงของผลึก

ผลการนำผลึก CsI(Tl) ที่มีปริมาณทลเลียมระหว่าง 0.0256 – 0.0806 mol% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร หนา 8 มิลลิเมตร ประกอบกับหลอดไวแสงชนิดทิวทูนอเล็กตรอน (PMT) และวิเคราะห์พลังงานของรังสีแกมมาจาก Cs-137 ที่อัตราขยายสัญญาณคงที่ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงประกายแสงจากผลของขนาดสัญญาณพัลส์ ที่ตำแหน่งกึ่งกลางของพีค (Peak centroid) พบว่าผลึกที่มีปริมาณสารเจือทลเลียมสูงขึ้นมีแนวโน้มจะทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงประกายแสงมากขึ้น แต่หากปริมาณสารเจือทลเลียมมีมากเกินไปก็จะทำให้ประสิทธิภาพในการแปลงประกายแสงลดลง อย่างไรก็ตาม ยังมีพารามิเตอร์อื่นๆ ที่อาจมีส่วนเกี่ยวข้องได้ เช่น ระยะเวลาของผลึก ความใส และความบกพร่องของผลึก



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบตำแหน่งพีคพลังงานของ Cs-137 จากการวิเคราะห์พลังงานด้วยผลึก CsI(Tl) ที่มีสารเจือทลเลียมต่างกัน

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการพัฒนากระบวนการปลูกผลึกซีเซียมไอโอไดด์ (ทัลเลียม) อย่างง่าย ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การพัฒนาระบบปลูกผลึกแบบบริดจ์แมน-สต็อกบาร์เกอร์ ซึ่งใช้วัสดุและอุปกรณ์ที่หาได้ง่ายพร้อมกระบวนการปลูกผลึก อีกส่วนหนึ่งคือการศึกษาผลของผลึกที่ปลูกได้ ทั้งคุณสมบัติพื้นฐานและผลการตอบสนองการวัดรังสีแกมมา ซึ่งผลการวิจัยพอสรุปได้ดังนี้

5.1.1 เตาปลูกผลึกที่พัฒนาขึ้นสามารถปรับแกระเดียนท์ของอุณหภูมิได้ด้วยการปรับความแตกต่างอุณหภูมิของเตาหลอมชุดอุณหภูมิสูงและต่ำ ประกอบกับการจัดขนาดความหนาของแบฟเฟิล รวมทั้งการจัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแบฟเฟิลให้พอดีกับขนาดของท่อปลูกผลึก จะช่วยลดผลการรบกวนของการพาความร้อน (Convection flow) บริเวณช่องว่างระหว่างท่อปลูกผลึกกับแบฟเฟิล ทำให้บริเวณโซนปลูกผลึกมีความเสถียรของอุณหภูมิสูง โดยการเข้าสู่ภาวะอุณหภูมิเสถียรของเตาใช้เวลา 7 ชั่วโมง นอกจากนี้ยังออกแบบให้ปรับอัตราการเคลื่อนที่ของท่อปลูกผลึกได้จาก 0.1 – 5 mm/hr

5.1.2 ผลการปลูกผลึก CsI(Tl) โดยใช้สารเริ่มต้นเป็นผง CsI ความบริสุทธิ์ 99.9% ผสมกับผง TlI ความบริสุทธิ์ 99.999% บรรจุในภาชนะปลูกผลึกที่ทำด้วยไวคอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 10 mm แขนงในท่อปลูกผลึกที่ทำด้วยเหล็กกล้าไร้สนิมแบบปิด อัดก๊าซอาร์กอนบริสุทธิ์ 99.999% ความดัน 2 บรรยากาศ ที่แกระเดียนท์ของอุณหภูมิ 38.47°C/cm และอัตราการเคลื่อนที่ของผลึก 1, 2 และ 5 mm/hr พบว่าผลึกที่ได้เป็นผลึกเดี่ยวมีความใส สามารถควบคุมปริมาณสารเจือทัลเลียมในผลึก CsI ได้ในช่วง 0.0256 – 0.0806 mol%

5.1.3 ผลการใช้ผลึก CsI(Tl) เป็นผลึกวัดรังสีประกอบด้วยฟินโฟโตไดโอดของบริษัท Hamamatsu รุ่น S3590-8 ในการวิเคราะห์สเปกตรัมพลังงานรังสีแกมมา พบว่าผลึก CsI(Tl) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 มิลลิเมตร ความหนา 8 มิลลิเมตร ให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน 15.48% ที่พลังงาน 662 keV นอกจากนี้ยังทดลองใช้ผลึกที่ความหนา 8 และ 4 มิลลิเมตร ประกอบกับหลอดไวแสงชนิดทิวทูนอเล็กตรอนของบริษัท RCA รุ่น 5819 วัดสเปกตรัมพลังงานของรังสีแกมมา พบว่าให้ความสามารถในการแจกแจงพลังงาน 13.67% ที่พลังงาน 662 keV และ 34.18% ที่พลังงาน 59.6 keV ตามลำดับ ซึ่งให้ประสิทธิภาพใกล้เคียงกับผลึก NaI(Tl) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 25.4 มิลลิเมตร หนา 25.4 มิลลิเมตร ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์

5.2 วิจารณ์ผลการวิจัย

5.2.1 สำหรับการปลูกผลึกอย่างง่ายการควบคุมแกรเดียนท์ของอุณหภูมิที่มีอัตราเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิต่อระยะทางต่ำให้มีความเป็นเชิงเส้นสูง จะต้องออกแบบให้มีการเกิดช่องอากาศ (Air channel) ระหว่างแบบเฟลด์กับท่อปลูกผลึกให้น้อย เพื่อรักษาความเสถียรของอุณหภูมิบริเวณโซนปลูกผลึก อาจจะใช้ระบบแบริง (Bearing) ที่ทนอุณหภูมิสูง ประกอบกับท่อปลูกผลึกเพื่อลดช่องว่างระหว่างท่อปลูกผลึกกับแบบเฟลด์ ในกรณีของระบบท่อปลูกผลึกแบบปิด

5.2.2 จากข้อมูลในการปลูกผลึกในสภาพของภาชนะปลูกผลึกแบบเปิดในท่อปลูกผลึกระบบปิด พบว่า TII มีจุดหลอมตัวที่อุณหภูมิ 440°C ซึ่งต่ำกว่า CsI ถึง 181°C ทำให้เกิดปัญหาการระเหยออกจากผิวหน้าของ CsI ในกระบวนการปลูกผลึก มีผลให้ยิลด์ (Yield) ของสารเจือทลเลียมอยู่ในเนื้อผลึกประมาณ 17% แม้ว่าความดันบรรยากาศภายในท่อปลูกผลึกจะสูงถึง 2 บรรยากาศ และใช้กราฟไฟต์เป็นจุกปิดภาชนะปลูกผลึกไว้ ปัญหาของการระเหยของสารเจืออาจมีความจำเป็นต้องออกแบบภาชนะปลูกผลึกเป็นแบบปิดสนิท โดยคำนวณปริมาตรของภาชนะปลูกผลึกให้เพียงพอต่อการรวมตัวของสาร เมื่อเกิดการหลอมเหลวหลังจากบรรจุสารเริ่มต้น อุณหภูมิอากาศออกแล้วใช้กระบวนการเป่าแก้วปิดผลึกภาชนะปลูกผลึก ซึ่งนอกจากจะช่วยไม่ให้เกิดการฟุ้งกระจายสูญเสียสารที่ต้องการเจือในผลึกแล้ว อาจจะช่วยให้เกิดกระบวนการแพร่ของสารเจือในสภาพไอของสารคู่ผลึกได้เพิ่มขึ้น และมีการกระจายตัวสม่ำเสมอมากขึ้น

5.2.3 การนำภาชนะปลูกผลึกกลับมาใช้ใหม่มีปัจจัยที่ต้องพิจารณา 2 ประการ คือ การปล่อยให้ผลึกเย็นตัว (Cooling down) อย่างช้าๆ จะทำให้ผลึกไม่ติดกับผนังภาชนะปลูกผลึก ทำให้นำผลึกออกจากภาชนะได้ง่าย และการนำภาชนะกลับไปปลูกผลึกใหม่จะต้องทำความสะอาดด้วยเครื่องทำความสะอาดอุตราโซนิก เนื่องจากมีสิ่งสกปรกติดอยู่ที่ผนังของภาชนะปลูกผลึก จะทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ในโครงสร้างผลึก

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 ในงานวิจัยขั้นต่อไปมีปัจจัยที่น่าสนใจศึกษาเพื่อควบคุมกระบวนการปลูกผลึกอย่างง่ายให้ได้ผลึก CsI(Tl) ที่มีคุณภาพสูง ได้แก่ ความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของสารเจือทลเลียมในผลึก ความบกพร่องที่เกิดขึ้นในผลึก การเพิ่มยิลด์ (Yield) ของสารเจือทลเลียมในกระบวนการปลูกผลึก เป็นต้น

5.3.2 เนื่องจากราคาของสารเริ่มต้นหลัก CsI ระหว่างความบริสุทธิ์ 99.9% และ 99.999% ต่างกันมาก จึงน่าจะมีการศึกษาการใช้สารเริ่มต้นหลักในการพัฒนาผลึกว่าให้ผลแตกต่างกันมากน้อยเพียงใดในแง่มุมของความประหยัดและคุณภาพของผลึก เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

1. DR Vij. Thermoluminescent Materials. Department of Physics. Kurukshetra University. India: PTR Prentice Hall, 1993.
2. J.J Gilman. The Art and Science of Growing Crystal. Division of Engineering Brown University, 1963.
3. วิญญู สกฤตจริยาพร. การพัฒนาหัววัดรังสีซีเอ็มไอโอไดค์ร่วมกับไดโอด p-i-n สำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
4. William F.Smith. PRINCIPLES OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING. Professor of Engineering University of Central Florida. USA: McGraw-Hill, Inc., 1996.
5. Christine A. Wang. CRYSTAL GROWTH AND SEGREGATION IN VERTICAL BRIDGMAN CONFIGURATION. Doctor of Philosophy Thesis. Department of Material Science and Engineering. MIT, 1984.
6. J.B BRIKS. The Theory and Practice of Scintillation Counting. Reader in Physics. The University of Manchester. New York: Pergamon Press, 1964.
7. William J.Price. Nuclear Radiation Detection. Executive Director Air Force Office of Scientific Research Office of Aerospace Research: USAF, 1962.
8. Nicholas Tsoufanidis. Measurement and Detection of Radiation. University of Missouri-Rolla. New York: Hemisphere Publishing Corporation, 1983.
9. Harmamatsu. Photodiode. Harmamatsu Phonics K.K., Solid state division. Japan, 1996.
10. คณิต เครื่องงาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งาน. ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
11. Glenn F.Knoll. Radiation Detection and Measurement. Professor of Nuclear Engineering the University of Michigan: Ann Arbor. Michigan, 1989.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

แสดงความปลอดภัยในการใช้สารเคมี

Material Safety Data Sheet
acc. to OSHA and ANSI

Printing date 07/15/2002

Reviewed on 04/30/1999

1 Identification of substance:**Product details:****Trade name:** Cesium iodide**Stock number:** 10992**Manufacturer/Supplier:**Alfa Aesar, A Johnson Matthey company
Johnson Matthey Catalog Company, Inc.
30 Bond Street
Ward Hill, MA 01835-8099
Emergency Phone: (978) 521-6300
CHEMTREC: (800) 424-9300
Web Site: www.alfa.com**Information department:** Health, Safety and Environmental Department**Emergency information:**During normal hours the Health, Safety and Environmental Department.
After normal hours call Chemtrec at (800) 424-9300.**2 Composition/Data on components:****Chemical characterization:****Description: (CAS#)**

cesium iodide (CAS# 7789-17-5); 100%

Identification number(s):**EINECS Number:** 232-145-2**3 Hazards identification****Hazard description:** Not applicable**Information pertaining to particular dangers for man and environment**

Not applicable

4 First aid measures**After inhalation**

Supply fresh air. If required, provide artificial respiration. Keep patient warm.

Seek immediate medical advice.

After skin contact

Immediately wash with water and soap and rinse thoroughly.

Seek immediate medical advice.

After eye contact

Rinse opened eye for several minutes under running water. Then consult a doctor.

After swallowing Seek medical treatment.**5 Fire fighting measures****Suitable extinguishing agents**

Product is not flammable. Use fire fighting measures that suit the surrounding fire.

Protective equipment:

Wear self-contained respirator.

(Contd. on page 2)

Material Safety Data Sheet
acc. to OSHA and ANSI

Printing date 07/15/2002

Reviewed on 04/30/1999

Trade name: Cesium iodide

(Contd. of page 1)

Wear fully protective impervious suit.

6 Accidental release measures

Person-related safety precautions:

Wear protective equipment. Keep unprotected persons away.
Ensure adequate ventilation

Measures for environmental protection:

Do not allow material to be released to the environment without proper governmental permits.

Measures for cleaning/collecting: Pick up mechanically.

Additional information:

See Section 7 for information on safe handling
See Section 8 for information on personal protection equipment.
See Section 13 for disposal information.

7 Handling and storage

Handling

Information for safe handling:

Keep container tightly sealed.
Store in cool, dry place in tightly closed containers.
No special precautions are necessary if used correctly.

Information about protection against explosions and fires:

No special measures required.

Storage

Requirements to be met by storerooms and receptacles:

No special requirements.

Information about storage in one common storage facility:

Not required.

Further information about storage conditions:

Keep container tightly sealed.
Store in cool, dry conditions in well sealed containers.

8 Exposure controls and personal protection

Additional information about design of technical systems:

Properly operating chemical fume hood designed for hazardous chemicals and having an average face velocity of at least 100 feet per minute.

Components with limit values that require monitoring at the workplace:

Not required.

Additional information: No data

Personal protective equipment

General protective and hygienic measures

The usual precautionary measures for handling chemicals should be followed.

Keep away from foodstuffs, beverages and feed.

Remove all soiled and contaminated clothing immediately.

Wash hands before breaks and at the end of work.

(Contd. on page 3)

Material Safety Data Sheet
acc. to OSHA and ANSI

Printing date 07/15/2002

Reviewed on 06/07/1999

1 Identification of substance:**Product details:****Trade name:** Thallium (I) iodide**Stock number:** 11825**Manufacturer/Supplier:**

Alfa Aesar, A Johnson Matthey company
Johnson Matthey Catalog Company, Inc.
30 Bond Street
Ward Hill, MA 01835-8099
Emergency Phone: (978) 521-6300
CHEMTREC: (800) 424-9300
Web Site: www.alfa.com

Information department: Health, Safety and Environmental Department**Emergency information:**

During normal hours the Health, Safety and Environmental Department.
After normal hours call Chemtrec at (800) 424-9300.

2 Composition/Data on components:**Chemical characterization:****Description: (CAS#)**

Thallium (I) iodide (CAS# 7790-30-9), 100%

Identification number(s):**EINECS Number:** 232-199-7**EU Number:** 081-002-00-9**3 Hazards identification****Hazard description:**

T+ Very toxic

Information pertaining to particular dangers for man and environment

R 26/28 Very toxic by inhalation and if swallowed.

R 33 Danger of cumulative effects.

4 First aid measures**General information**

Immediately remove any clothing soiled by the product.

Remove breathing apparatus only after contaminated clothing has been completely removed.

In case of irregular breathing or respiratory arrest provide artificial respiration.

After inhalation

Supply fresh air. If required, provide artificial respiration. Keep patient warm.

Seek immediate medical advice.

After skin contact

Immediately wash with water and soap and rinse thoroughly.

Seek immediate medical advice.

(Contd. on page 2)

Material Safety Data Sheet
acc. to OSHA and ANSI

Printing date 07/15/2002

Reviewed on 06/07/1999

Trade name: Thallium (I) iodide

(Contd. of page 1)

After eye contact

Rinse opened eye for several minutes under running water. Then consult a doctor.

After swallowing

Do not induce vomiting; immediately call for medical help. Seek immediate medical advice.

5 Fire fighting measures

Suitable extinguishing agents

Product is not flammable. Use fire fighting measures that suit the surrounding fire.

Special hazards caused by the material, its products of combustion or resulting gases:

In case of fire, the following can be released:

Toxic metal oxide fume

Hydrogen iodide (HI)

Protective equipment:

Wear self-contained respirator.

Wear fully protective impervious suit.

6 Accidental release measures

Person-related safety precautions:

Wear protective equipment. Keep unprotected persons away.

Ensure adequate ventilation

Measures for environmental protection:

Do not allow material to be released to the environment without proper governmental permits.

Measures for cleaning/collecting:

Dispose contaminated material as waste according to item 13.

Ensure adequate ventilation.

Additional information:

See Section 7 for information on safe handling

See Section 8 for information on personal protection equipment.

See Section 13 for disposal information.

7 Handling and storage

Handling

Information for safe handling:

Keep container tightly sealed.

Store in cool, dry place in tightly closed containers.

Ensure good ventilation at the workplace.

Open and handle container with care.

Information about protection against explosions and fires:

The product is not flammable

Storage

Requirements to be met by storerooms and receptacles:

No special requirements.

Information about storage in one common storage facility:

Store in the dark.

(Contd. on page 3)

11A

Material Safety Data Sheet
acc. to OSHA and ANSI

Printing date 07/15/2002

Reviewed on 06/07/1999

Trade name: Thallium (I) iodide

(Contd. of page 2)

Further information about storage conditions:

Keep container tightly sealed.
Store in cool, dry conditions in well sealed containers.
Protect from exposure to light.
Store under lock and key and with access restricted to technical experts or their assistants only.

8 Exposure controls and personal protection**Additional information about design of technical systems:**

Properly operating chemical fume hood designed for hazardous chemicals and having an average face velocity of at least 100 feet per minute.

Components with limit values that require monitoring at the workplace:

Thallium and soluble thallium compounds (as Tl)

	mg/m ³
ACGIH TLV	0.1 (skin)
Austria MAK	0.1
Belgium TWA	0.1 (skin)
Denmark TWA	0.1 (skin)
Finland TWA	0.1 (skin)
France VME	0.1
Germany MAK	0.1
Ireland TWA	0.1 (skin)
Korea TLV	0.1 (skin)
Netherlands MAC-TGG	0.1 (skin)
Norway TWA	0.1
Poland TWA	0.1; 0.3-STEL
Switzerland MAK-W	0.1 (skin)
United Kingdom LTEL	0.1 (skin)
USA PEL	0.1 (skin)

Additional information: No data**Personal protective equipment****General protective and hygienic measures**

The usual precautionary measures for handling chemicals should be followed.

Keep away from foodstuffs, beverages and feed.
Remove all soiled and contaminated clothing immediately.
Wash hands before breaks and at the end of work.
Store protective clothing separately.

Breathing equipment:

Use suitable respirator when high concentrations are present.

Protection of hands: Impervious gloves**Eye protection:** Safety glasses**Body protection:** Protective work clothing.

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

คุณสมบัติของซีเซียมไอโอไดด์

CsI	
Caesium Iodide	
<u>Description</u>	
<p>The material with the deepest known IR transmission, CsI is sometimes used for components in the widest range spectrophotometers. An extremely soft material it is extremely difficult to polish and so performance is compromised for range. Doped with thallium, CsI(Tl) is a useful scintillator which emits at a wavelength which is a good match for silicon photodiodes. Arrays of this material are used in security imaging systems.</p>	
<u>Properties</u>	
Apparent Elastic Limit (MPa)	5.6 (810psi)
Bulk Modulus (K) (GPa)	12.67
Cleavage Planes	None
Decay Constant (μ s)	0.03 & 0.1
Density (g/cm^3)	4.51
Dielectric Constant	5.65 at 1MHz
Elastic Coefficient C11	24.6
Elastic Coefficient C12	6.7
Elastic Coefficient C44	6.24
Emission Spectral Range (nm)	250 to 500
Hardness (knoop) (100) direction	20.0
Melting Point ($^{\circ}\text{C}$)	621
Molecular Weight	259.83
Peak Scintillation Wavelength (nm)	310
Photons/MeV	16,800

Poisson Ratio	0.214
Radiation Length (cm)	1.86
Reflection Loss (%)	13.6 at 11 μ (2 surfaces)
Refractive Index	1.78 at 10 $^{\circ}$ C
Shear Modulus (G) (GPa)	6.24
Solubility (g/100g H ₂ O)	44.0 at 273K
Specific Heat Capacity (J.kg.m ⁻¹ .K ⁻¹)	201
Stability	Deliquescent
Structure	Cubic
Temperature Coefficient of Light Output (%.K ⁻¹)	-0.53
Thermal Conductivity (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	1.1 at 298K
Thermal Expansion (K ⁻¹)	48.3 X 10 ⁻⁶ at 293K
Transmission Range (μ)	0.25 to 55.0
Youngs Modulus (E) (GPa)	5.3

CsI(Tl)	
Thallium doped Caesium Iodide	
<u>Properties</u>	
After Glow	Approx 2.0% after 2ms
After Glow	Approx 2.8% after 1ms
Cleavage Planes	None
Decay Constant (μ s)	1.0
Density (g.cm ⁻³)	4.51
Dielectric Constant	5.65 at 1MHz (298K)
Emission Spectral Range (nm)	375 to 725
Gamma and X-ray absorption coefficients (cm ⁻¹)	0.48 at 660keV
Gamma and X-ray absorption coefficients (cm ⁻¹)	10.00 at 100keV

Light Escape Cone to Air ($^{\circ}$)	34.1
Light Escape Cone to Glass ($^{\circ}$)	57.2
Light Escape from one face to Air (%)	8.6%
Light Escape from one face to Glass (%)	22.9%
Melting Point ($^{\circ}$ C)	621
Optical Transmission Range	240nm to 70 $^{\circ}$ C
Peak Scintillation Wavelength (nm)	565
Photons/MeV	52,000
Radiation Length (cm)	1.86
Refractive Index at peak emission	1.78
Soluble in Alcohol	Yes
Specific Heat (J.kg $^{-1}$.K $^{-1}$)	0.048
Stability	Slightly Hygroscopic
Structure	BCC
Temperature Coefficient of Light Output (%. $^{\circ}$ C $^{-1}$)	+0.32
Thermal Conductivity (W.m $^{-1}$.K $^{-1}$)	1.13 at 298K
Water Solubility (g/100ml H $_2$ O)	44 at 273K
Youngs Modulus (GPa)	5.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

แสดงคุณสมบัติของขดลวดความร้อน

Physical and Mechanical Properties KANTHAL Alloys

Heating Alloys	APM	A-1	A	AF	AE
Max continuous operating temperature (element temperature in air), °C °F	1425...2595	1400...2550	1350...2460	1300...2370	1300...2370
Nominal composition, % Cr Al Fe	5.8		22 Balance	5.3	
Density, g/cm ³ lb/in ³	7.10...0.256		7.15...0.258		
Electrical resistivity at 20 °C, Ω mm ² m ⁻¹ at 68 °F, Ω/cm ²	1.45...872		1.39...836		
Temperature factor of the resistivity, C _t 250 °C 480 °F 500 °C 930 °F 800 °C 1470 °F 1000 °C 1830 °F 1200 °C 2190 °F	1.00 1.01 1.03 1.04 1.04		1.01 1.03 1.05 1.06 1.06		
Coefficient of thermal expansion, K ⁻¹ 20-100 °C 68-210 °F 20-250 °C 68-480 °F 20-500 °C 68-930 °F 20-750 °C 68-1380 °F 20-1000 °C 68-1830 °F			— 11·10 ⁻⁶ 12·10 ⁻⁶ 14·10 ⁻⁶ 15·10 ⁻⁶		
Thermal conductivity at 50 °C, W m ⁻¹ K ⁻¹ 122 °F, Btu in ft ² h ⁻¹ °F ⁻¹			11...76		
Specific heat capacity, kJ kg ⁻¹ K ⁻¹ , 20 °C Btu lb ⁻¹ °F ⁻¹ , 68 °F			0.46 0.110		
Melting point (approx.), °C °F	1500...2730				
Mechanical properties *(approx.)					
Tensile strength, N mm ⁻² psi	680...98600**	760...110200	725...105200	700...101500	720...104400
Yield point, N mm ⁻² psi	470...68200**	545...79000	550...798000	500...72500	520...75400
Hardness, Hv	230	240		230	
Elongation at rupture, %	20**	20	22	23	20
Tensile strength at 900 °C, N mm ⁻² at 1650 °F, psi. Deformation rate 6.2 x 10 ⁻² min ⁻¹	40 5800	34 4900		37 5400	34 4900
Creep strength*** at 800 °C, N mm ⁻² at 1470 °F, psi at 1000 °C, N mm ⁻² at 1830 °F, psi at 1100 °C, N mm ⁻² at 2010 °F, psi at 1200 °C, N mm ⁻² at 2190 °F, psi	8.2...1190 — — —	1.2...170 0.5...70 — —		— — 0.7...100 0.3...40	1.2...170 — — —
Magnetic properties	Magnetic (Curie point approx. 600 °C 1100 °F)				
Emissivity, fully oxidized condition	0.70				

* The values given apply for sizes of approx. 1.0 mm diameter 0.04 in.

**4.0 mm 0.16 in. Finer gauges have higher strength and hardness values while the corresponding values are lower for heavier gauges.

***Calculated from observed elongation in a Kanthal standard furnace test. 1 % elongation after 1000 hours.

KANTHAL A, AF, AE

Wire inch SWG

A: 0.325 – 0.002 in
 AE: 0.039 – 0.008 in
 AF: 0.325 – 0.004 in
 Resistivity $\Omega/\text{cir.mil ft}$ 837
 Density, lb/cu.in 0.258

$$\text{in}^2/\Omega = \frac{I^2 C_t}{p}$$

I = Current
 C_t = Temperature factor
 p = Surface load W/in²

To obtain resistance at working temperature multiply by the factor C_t in the following table:

*F	68	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372
C_t	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06

Diameter SWG	inch	Resistance at 68°F Ω/ft	in^2/Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in^2/ft	Cross sectional area $\text{in}^2 \times 1000$
0	0.324	0.00796	1530	255	12.2	82.4
1	0.300	0.00929	1220	219	11.3	70.7
2	0.276	0.0110	948	185	10.4	59.8
3	0.252	0.0132	722	154	9.50	49.9
4	0.232	0.0155	563	131	8.75	42.3
5	0.212	0.0186	430	109	7.99	35.3
6	0.192	0.0227	319	89.6	7.24	29.0
7	0.176	0.0270	246	75.3	6.64	24.3
8	0.160	0.0327	185	62.2	6.03	20.1
9	0.144	0.0403	135	50.4	5.43	16.3
10	0.128	0.0510	94.6	39.8	4.83	12.9
11	0.116	0.0621	70.4	32.7	4.37	10.6
12	0.104	0.0773	50.7	26.3	3.92	8.49
13	0.0920	0.0988	35.1	20.6	3.47	6.65
14	0.0800	0.131	23.1	15.6	3.02	5.03
15	0.0720	0.161	16.8	12.6	2.71	4.07
16	0.0640	0.204	11.8	10.0	2.41	3.22
17	0.0560	0.267	7.92	7.63	2.11	2.46
18	0.0480	0.363	4.99	5.60	1.81	1.81
19	0.0400	0.523	2.89	3.89	1.51	1.26
20	0.0360	0.645	2.10	3.15	1.36	1.02
21	0.0320	0.816	1.48	2.49	1.21	0.804
22	0.0280	1.07	0.990	1.91	1.06	0.616
23	0.0240	1.45	0.623	1.40	0.905	0.452
24	0.0220	1.73	0.480	1.18	0.829	0.380
25	0.0200	2.09	0.361	0.973	0.754	0.314
26	0.0180	2.58	0.263	0.788	0.679	0.254
27	0.0164	3.11	0.199	0.654	0.618	0.211
28	0.0148	3.82	0.146	0.533	0.558	0.172
29	0.0136	4.52	0.113	0.450	0.513	0.145
30	0.0124	5.44	0.0860	0.374	0.467	0.121
31	0.0116	6.21	0.0704	0.327	0.437	0.106
32	0.0108	7.17	0.0568	0.284	0.407	0.0916
33	0.0100	8.36	0.0451	0.243	0.377	0.0785
34	0.00920	9.88	0.0351	0.206	0.347	0.0665
35	0.00840	11.8	0.0267	0.172	0.317	0.0554
36	0.00760	14.5	0.0198	0.140	0.287	0.0454
37	0.00680	18.1	0.0142	0.112	0.256	0.0363
38	0.00600	23.2	0.00974	0.0875	0.226	0.0283
39	0.00520	30.9	0.00634	0.0658	0.196	0.0212
40	0.00480	36.3	0.00499	0.0560	0.181	0.0181
41	0.00440	43.2	0.00384	0.0471	0.166	0.0152
42	0.00400	52.3	0.00289	0.0389	0.151	0.0126
43	0.00360	64.5	0.00210	0.0315	0.136	0.0102
44	0.00320	81.6	0.00148	0.0249	0.121	0.00804
45	0.00280	107	0.000990	0.0191	0.106	0.00616
46	0.00240	145	0.000623	0.0140	0.0905	0.00452
47	0.00200	209	0.000361	0.00973	0.0754	0.00314
48	0.00160	327	0.000185	0.00622	0.0603	0.00201

KANTHAL A, AF, AE

Ribbon inch

Resistivity Ω /sq.mil ft 657
Density, lb/cu.in 0.258

$$in^2/\Omega = \frac{I C_t}{p}$$

I = Current
C_t = Temperature factor
p = Surface load W/in²

To obtain resistance at working temperature multiply by the factor C_t in the following table:

°F	68	212	392	572	752	932	1112	1292	1472	1652	1832	2012	2192	2372
C _t	1.00	1.00	1.01	1.01	1.02	1.03	1.04	1.04	1.05	1.05	1.06	1.06	1.06	1.06

Width in	Thickness in	Resistance at 68°F Ω/ft	in ² /Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in ² /ft	Cross sectional area in ² x 1000
1/8	0.057	0.100	43.6	20.3	4.37	6.56
	0.051	0.112	37.7	18.2	4.22	5.87
	0.045	0.127	32.2	16.0	4.08	5.18
	0.040	0.143	27.7	14.2	3.96	4.60
	0.036	0.159	24.4	12.8	3.86	4.14
	0.032	0.178	21.1	11.4	3.77	3.68
	0.029	0.197	18.8	10.3	3.70	3.34
	0.025	0.228	15.8	8.90	3.60	2.88
	0.023	0.248	14.3	8.19	3.55	2.65
	0.020	0.286	12.2	7.12	3.48	2.30
	0.018	0.317	10.8	6.41	3.43	2.07
	0.016	0.357	9.48	5.70	3.38	1.84
	0.014	0.408	8.18	4.98	3.34	1.61
	0.013	0.439	7.54	4.63	3.31	1.50
	0.011	0.519	6.29	3.92	3.26	1.27
	0.010	0.571	5.67	3.56	3.24	1.15
	0.0089	0.642	5.01	3.17	3.21	1.02
	0.0080	0.714	4.47	2.85	3.19	0.920
	0.0071	0.804	3.94	2.53	3.17	0.817
	0.0063	0.906	3.48	2.24	3.15	0.725
3/32	0.057	0.134	27.1	15.2	3.62	4.92
	0.051	0.149	23.3	13.6	3.47	4.40
	0.045	0.169	19.7	12.0	3.33	3.88
	0.040	0.190	16.9	10.7	3.21	3.45
	0.036	0.211	14.7	9.61	3.11	3.11
	0.032	0.238	12.7	8.54	3.02	2.76
	0.029	0.263	11.2	7.74	2.95	2.50
	0.025	0.305	9.36	6.68	2.85	2.16
	0.023	0.331	8.46	6.14	2.80	1.98
	0.020	0.381	7.17	5.34	2.73	1.73
	0.018	0.423	6.34	4.81	2.68	1.55
	0.016	0.476	5.54	4.27	2.63	1.38
	0.014	0.544	4.76	3.74	2.59	1.21
	0.013	0.586	4.37	3.47	2.56	1.12
	0.011	0.692	3.63	2.94	2.51	0.949
	0.010	0.761	3.27	2.67	2.49	0.863
	0.0089	0.855	2.88	2.38	2.46	0.768
	0.0080	0.952	2.57	2.14	2.44	0.690
	0.0071	1.07	2.26	1.90	2.42	0.612
	0.0063	1.21	1.99	1.68	2.40	0.543
0.0056	1.36	1.75	1.50	2.38	0.483	
0.0050	1.52	1.56	1.34	2.37	0.431	
1/16	0.032	0.357	6.35	5.70	2.27	1.84
	0.029	0.394	5.58	5.16	2.20	1.67
	0.025	0.457	4.60	4.45	2.10	1.44
	0.023	0.497	4.13	4.09	2.05	1.32
	0.020	0.571	3.47	3.56	1.98	1.15
	0.018	0.634	3.04	3.20	1.93	1.04
	0.016	0.714	2.64	2.85	1.88	0.920
	0.014	0.816	2.25	2.49	1.84	0.805
	0.013	0.879	2.06	2.31	1.81	0.748
	0.011	1.04	1.70	1.96	1.76	0.633
	0.010	1.14	1.52	1.78	1.74	0.575
	0.0089	1.28	1.34	1.58	1.71	0.512
	0.0080	1.43	1.19	1.42	1.69	0.460
	0.0071	1.61	1.04	1.26	1.67	0.408
	0.0063	1.81	0.911	1.12	1.65	0.362
	0.0056	2.04	0.801	0.997	1.63	0.322
	0.0050	2.28	0.709	0.890	1.62	0.288
	0.0045	2.54	0.634	0.801	1.61	0.259
	0.0040	2.86	0.559	0.712	1.60	0.230

Width in	Thickness in	Resistance at 68°F Ω/ft	in ² /Ω at 68°F	Weight lb/1000 ft	Surface area in ² /ft	Cross sectional area in ² x 1000
3/64	0.029	0.525	3.47	3.87	1.82	1.25
	0.025	0.609	2.83	3.34	1.73	1.08
	0.023	0.662	2.53	3.07	1.68	0.992
	0.020	0.761	2.11	2.67	1.61	0.863
	0.018	0.846	1.84	2.40	1.56	0.776
	0.016	0.952	1.59	2.14	1.51	0.690
	0.014	1.09	1.34	1.87	1.46	0.604
	0.013	1.17	1.23	1.74	1.44	0.561
	0.011	1.38	1.00	1.47	1.39	0.474
	0.010	1.52	0.896	1.34	1.37	0.431
	0.0089	1.71	0.782	1.19	1.34	0.384
	0.0080	1.90	0.692	1.07	1.32	0.345
	0.0071	2.14	0.604	0.948	1.30	0.306
	0.0063	2.42	0.528	0.841	1.28	0.272
	0.0056	2.72	0.463	0.748	1.26	0.242
1/32	0.029	0.525	3.47	3.87	1.82	1.25
	0.025	0.609	2.83	3.34	1.73	1.08
	0.023	0.662	2.53	3.07	1.68	0.992
	0.020	0.761	2.11	2.67	1.61	0.863
	0.018	0.846	1.84	2.40	1.56	0.776
	0.016	0.952	1.59	2.14	1.51	0.690
	0.014	1.09	1.34	1.87	1.46	0.604
	0.013	1.17	1.23	1.74	1.44	0.561
	0.011	1.38	1.00	1.47	1.39	0.474
	0.010	1.52	0.896	1.34	1.37	0.431
	0.0089	1.71	0.782	1.19	1.34	0.384
	0.0080	1.90	0.692	1.07	1.32	0.345
	0.0071	2.14	0.604	0.948	1.30	0.306
	0.0063	2.42	0.528	0.841	1.28	0.272
	0.0056	2.72	0.463	0.748	1.26	0.242
0.0050	3.05	0.409	0.668	1.25	0.216	
0.0045	3.38	0.364	0.601	1.23	0.194	
0.0040	3.81	0.321	0.534	1.22	0.173	
0.0035	4.35	0.278	0.467	1.21	0.151	
0.0031	4.91	0.244	0.414	1.20	0.134	
1/64	0.016	1.43	0.794	1.42	1.13	0.460
	0.014	1.63	0.666	1.25	1.09	0.403
	0.013	1.76	0.604	1.16	1.06	0.374
	0.011	2.08	0.488	0.979	1.01	0.316
	0.010	2.28	0.433	0.890	0.990	0.288
	0.0089	2.57	0.375	0.792	0.964	0.256
	0.0080	2.86	0.330	0.712	0.942	0.230
	0.0071	3.22	0.286	0.632	0.920	0.204
	0.0063	3.63	0.249	0.561	0.901	0.181
	0.0056	4.08	0.217	0.498	0.884	0.161
	0.0050	4.57	0.190	0.445	0.870	0.144
	0.0045	5.08	0.169	0.401	0.858	0.129
	0.0040	5.71	0.148	0.356	0.846	0.115
	0.0035	6.53	0.128	0.312	0.834	0.101
	0.0031	7.37	0.112	0.276	0.824	0.0891
0.0028	8.16	0.100	0.249	0.817	0.0805	
0.0025	9.14	0.0887	0.223	0.810	0.0719	
0.0022	10.4	0.0773	0.196	0.803	0.0633	
1/64	0.0089	5.13	0.115	0.396	0.589	0.128
	0.0080	5.71	0.0993	0.356	0.567	0.115
	0.0071	6.43	0.0848	0.316	0.545	0.102
	0.0063	7.25	0.0726	0.280	0.526	0.0906
	0.0056	8.16	0.0624	0.249	0.509	0.0805
	0.0050	9.14	0.0542	0.223	0.495	0.0719
	0.0045	10.2	0.0476	0.200	0.483	0.0647
	0.0040	11.4	0.0412	0.178	0.471	0.0575
	0.0035	13.1	0.0352	0.156	0.459	0.0503
	0.0031	14.7	0.0305	0.138	0.449	0.0446
	0.0028	16.3	0.0271	0.125	0.442	0.0403
	0.0025	18.3	0.0238	0.111	0.435	0.0359
	0.0022	20.8	0.0206	0.0979	0.428	0.0316

ภาคผนวก ง.

แสดงคุณสมบัติของอิฐทนไฟ

Properties Type	INSULATING FIREBRICK	
	C. 1	C. 2
Maximum Service Temperature (0°C)	1300	1400
Bulk Density G/Cm ³	1.06	1.14
Thermal Conductivity K Cal/mh C at 300°C (Mean)	0.28	0.32
Rehead shrinkage % at () C x 8 hrs	0.57 (1300)	0.59 (1400)
Cold Srushing Strength Kg/Cm ²	63	78
Modulus of Rupture (Kg/cm.)	25	32
Thermal Expansion % at () °C	0.51 (1000)	0.49 (1000)
Chemical Composition %		
AL ₂ O ₃	30	35
Si O ₂	65	61
Fe ₂ O ₃	1.8	1.6
Raw material	Fire clay	

ภาคผนวก จ.

แสดงข้อมูลอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิแบบพีไอดี

Fenwal

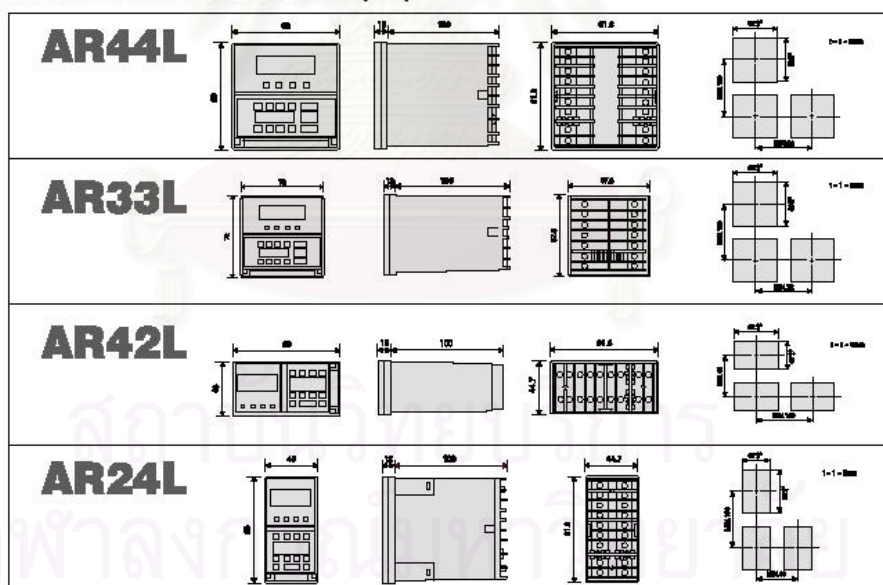
เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบ PID

PID TEMPERATURE CONTROLLER

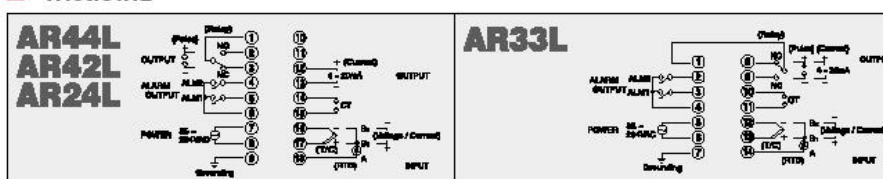
คุณสมบัติ

ความแม่นยำ	เทอร์มอคัปเปิล : ($\pm 0.3\%$ ของค่าที่วัดได้ หรือ $\pm 2^{\circ}\text{C}$ ขึ้นอยู่กับค่าใดมีค่ามากกว่า) ± 1 digit (ที่ $25 \pm 5^{\circ}\text{C}$) RTD : ($\pm 0.2\%$ ของค่าที่วัดได้ หรือ $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$, ขึ้นอยู่กับค่าใดมีค่ามากกว่า) ± 1 digit	
อินพุต (โปรแกรมได้)	เทอร์มอคัปเปิล : K, J, T, R (JIS/DIN) RTD : Pt1000 (JIS/DIN)	
เอาต์พุต	รีเลย์ : 5A/250VAC, 5A/30VDC, $\text{COS } \phi = 1$ SPDT ฟิลลิ่งซันโซลิดสเตตรีเลย์ 12 VDC กระแส 4-20mA โหลดไม่เกิน 400 Ω	
รูปแบบการควบคุม (โปรแกรมได้)	PID AUTOTUNING, PD, PI, PD, P, ON/OFF Proportional Band (PB) = 0-2600 $^{\circ}\text{C}$ ของช่วงอุณหภูมิ Integral Time (I) = 0-3999 วินาที Derivative Time (D) = 0-3999 วินาที Proportioning Time (PT) = 0.5-64 วินาที Anti-reset Windup (ARW) = D-100% 194 PB ON/OFF Differential (DIF) = 0.0-99.9 $^{\circ}\text{C}/^{\circ}\text{F}$	
ช่วงวัดอุณหภูมิ (โปรแกรมได้)	ขึ้นอยู่กับอินพุต	
ไฟเลี้ยง	85-254VAC, 50/60 Hz	
สภาวะแวดล้อม	อุณหภูมิ : -10 - 55°C ความชื้น : ไม่เกิน 85% RH	
น้ำหนัก	ไม่เกิน 350 กรัม	
กินไฟ	ไม่เกิน 5 VA	

ขนาดของตัวเครื่อง และช่องเจาะ (มม.)



การต่อสาย



เครื่องวัดและควบคุมอุณหภูมิระบบ FUZZY + PID

FUZZY + PID TEMPERATURE CONTROLLER

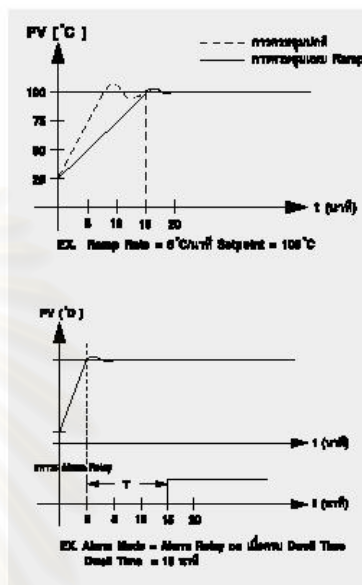


■ ฟังก์ชันพิเศษ

■ สามารถตั้งการควบคุมแบบความชัน (Ramp) ได้เป็นองศา/นาที เพื่อป้องกันการเพิ่มหรือลดอุณหภูมิที่รวดเร็วเกินไป ซึ่งอาจเกิดผลเสียต่อชิ้นงานบางประเภทได้ (Soft Start)

■ สามารถเลือกการทำงานของ Alarm ให้เป็น Timer ได้ (Dwell Time) และตั้งค่า Dwell Time ในหน่วยนาที โดย Timer จะเริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิถึงค่า Setpoint และ Alarm Relay จะเปลี่ยนสถานะเป็น ON หรือ OFF ตามที่กำหนดไว้เมื่อครบเวลา Dwell Time ฟังก์ชันนี้ประยุกต์ใช้ได้ในงานต่าง ๆ เช่น ให้ Alarm Relay สั่งงานกระบวนการต่อไปหลังจากควบคุมอุณหภูมิครบเวลาที่กำหนด หรือต่อให้รอดังเพื่อนำชิ้นงานออก เมื่ออบจนได้ที่ รวมทั้งสามารถใช้ร่วมกับฟังก์ชัน Ramp ได้ด้วย

■ สามารถเลือกให้ Parameter บางตัวอยู่ในระดับ User ได้ (ดูหรือแก้ไขค่าได้โดยกดปุ่มเดียว) เพื่อความสะดวกแก่ผู้ใช้ไม่จำเป็นต้องเข้าไปในโปรแกรมทุกครั้ง



■ คุณสมบัติทางเทคนิค

อินพุต	เทอร์มอคัปเปิลอาร์ทีดี Linear	Type J, K, T, E, B, R, S, N Pt100 Ohm RTD (DIN/JIS) 4-20mA, 0-1V, 0-5V, 1-5V, 0-10V, 1-10V	Accuracy $\pm 2^{\circ}\text{C}$ Accuracy $\pm 0.4^{\circ}\text{C}$ Accuracy $\pm 0.05\%$
เอาต์พุต	รีเลย์ ฟิลส์สำหรับ SSR กระแสมาตรฐาน Alarm รีเลย์	5A/240VAC Resistive 20mA/24VDC 4-20mA, max. load 500 โอห์ม 2A/240VAC Resistive	
การควบคุม	Proportional Band Integral Time Derivative Time Ramp Rate (ความชัน) Dwell Time (หน่วยเวลา) Hysteresis (ON-OFF) Cycle Time Control Action รูปแบบการควบคุม	0-200°C (0-360°F) 0-3600 วินาที 0-1000 วินาที 0-200.0°C/นาที (0-360.0°F/นาที) 0-3600 นาที 0-20% ของช่วงอุณหภูมิใช้งาน 0-120 วินาที Direct (Cooling) /Reverse (Heating) ON-OFF, P, PI, PD, Fuzzy + PID	
Power	ไฟเลี้ยง Consumption	90-264VAC, 50/60Hz น้อยกว่า 5 VA	
ทั่วไป	อุณหภูมิใช้งาน ความชื้นใช้งาน	-10 ถึง 50°C 0 - 90% RH	

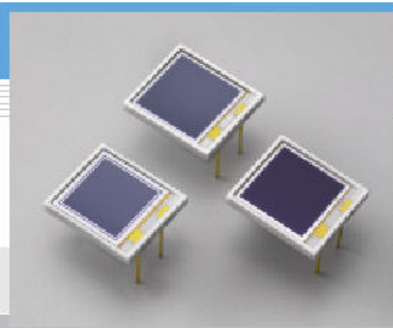
ภาคผนวก จ.

แสดงข้อมูลทางเทคนิคของฟิโนไฟโตไดโอด

PHOTODIODE

Si PIN photodiode
S3590 series

Large area sensors for scintillation detection



Features

- Higher sensitivity and low dark current than conventional type
- Sensitivity matching with BGO and CsI (TI) scintillators
- High quantum efficiency: QE=85 % ($\lambda=540$ nm)
- Low capacitance
- High-speed response
- High stability
- Good energy resolution

Applications

- Scintillation detectors
- Calorimeters
- Hodoscopes
- TOF counters
- Air shower counters
- Particle detectors, etc.

■ General ratings / Absolute maximum ratings

Type No.	Window material	Active area (mm)	Absolute maximum ratings			
			Reverse voltage V_R Max.	Power dissipation P (mW)	Operating temperature T_{opr} (°C)	Storage temperature T_{stg} (°C)
S3590-01	Epoxy resin	10 × 10	50	100	-20 to +60	-20 to +80
S3590-02	Window-less					
S3590-05	Epoxy resin	9 × 9	150	100	-20 to +60	-20 to +80
S3590-06	Window-less					
S3590-08	Epoxy resin	10 × 10	100	100	-20 to +60	-20 to +80
S3590-09	Window-less					

■ Electrical and optical characteristics (Typ. $T_a=25$ °C, unless otherwise noted)

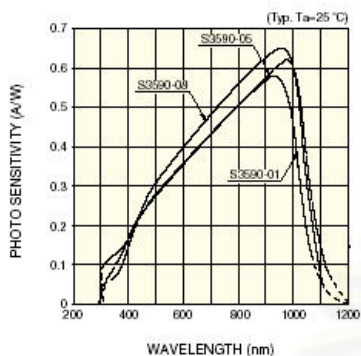
Type No.	Spectral response range λ (nm)	Peak sensitivity wavelength λ_p (nm)	Photo sensitivity S				Short circuit current I_{sc} 100 μ A	Dark current I_D		Temp. coefficient of I_D T_{CID}	Cut-off Frequency f_c (MHz)	Terminal capacitance C_t f=1MHz (pF)	NEP $V_R=70$ V (W/Hz ^{1/2})
			$\lambda=\lambda_p$ (A/W)	LSO 420 nm (A/W)	BGO 480 nm (A/W)	CsI(Tl) 540 nm (A/W)		Typ.	Max.				
S3590-01	320 to 1060	920	0.58	0.19	0.26	0.31	80	1.5 ^{*1}	5 ^{*1}	1.12	35 ^{*1}	75 ^{*1}	3.9 × 10 ⁻¹⁴
S3590-02			0.62	0.23	0.32	0.39							
S3590-05	320 to 1120	980	0.62	0.19	0.25	0.30	77	8 ^{*2}	30 ^{*2}	1.12	20 ^{*2}	25 ^{*2}	8.4 × 10 ⁻¹⁴
S3590-06			0.64	0.23	0.32	0.39							
S3590-08	320 to 1100	960	0.66	0.20	0.30	0.36	100	2 ^{*3}	6 ^{*3}	1.12	40 ^{*3}	40 ^{*3}	3.8 × 10 ⁻¹⁴
S3590-09			0.66	0.22	0.33	0.41							

*1: $V_R=30$ V*2: $V_R=100$ V*3: $V_R=70$ VSOLID
STATE DIVISION

HAMAMATSU

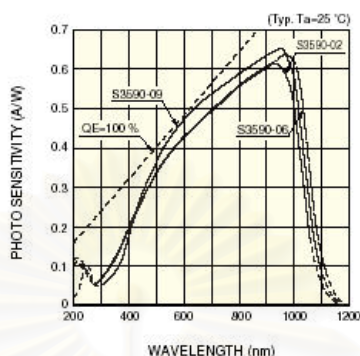
Si PIN photodiode S3590 series

■ Spectral response



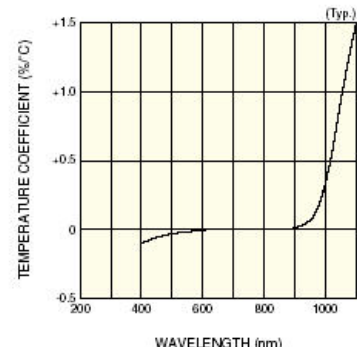
KPNA0231EA

■ Spectral response (without window)



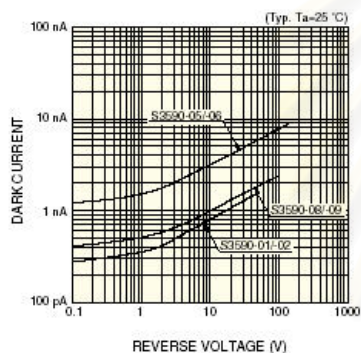
KPNA0232EA

■ Photo sensitivity temperature characteristic



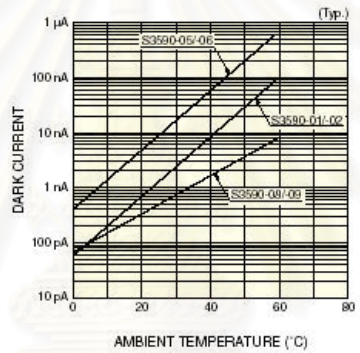
KPNA0233EA

■ Dark current vs. reverse voltage



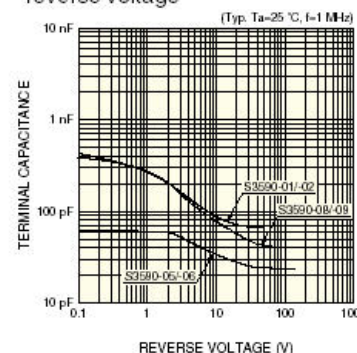
KPNA0232EB

■ Dark current vs. ambient temperature



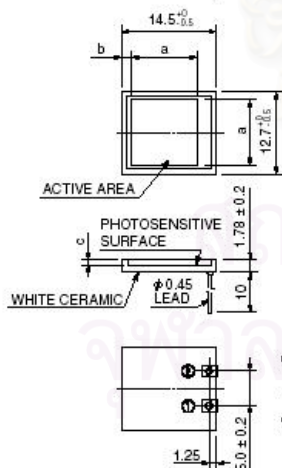
KPNA0233EB

■ Terminal capacitance vs. reverse voltage



KPNA0234EB

■ Dimensional outline (unit: mm)



The coating resin may extend a maximum of 0.1 mm beyond the upper surface of the package.

	-01	-05	-08
a	10.0	9.0	10.0
b	1.4	1.9	1.4
c	0.8	0.5	0.7

KPNA0014EE

ภาคผนวก ข.

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุโดยใช้เครื่องเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์
(X-ray Fluorescence)

ชื่อเครื่อง: X-ray Fluorescence Spectrometer

ยี่ห้อ: Oxford

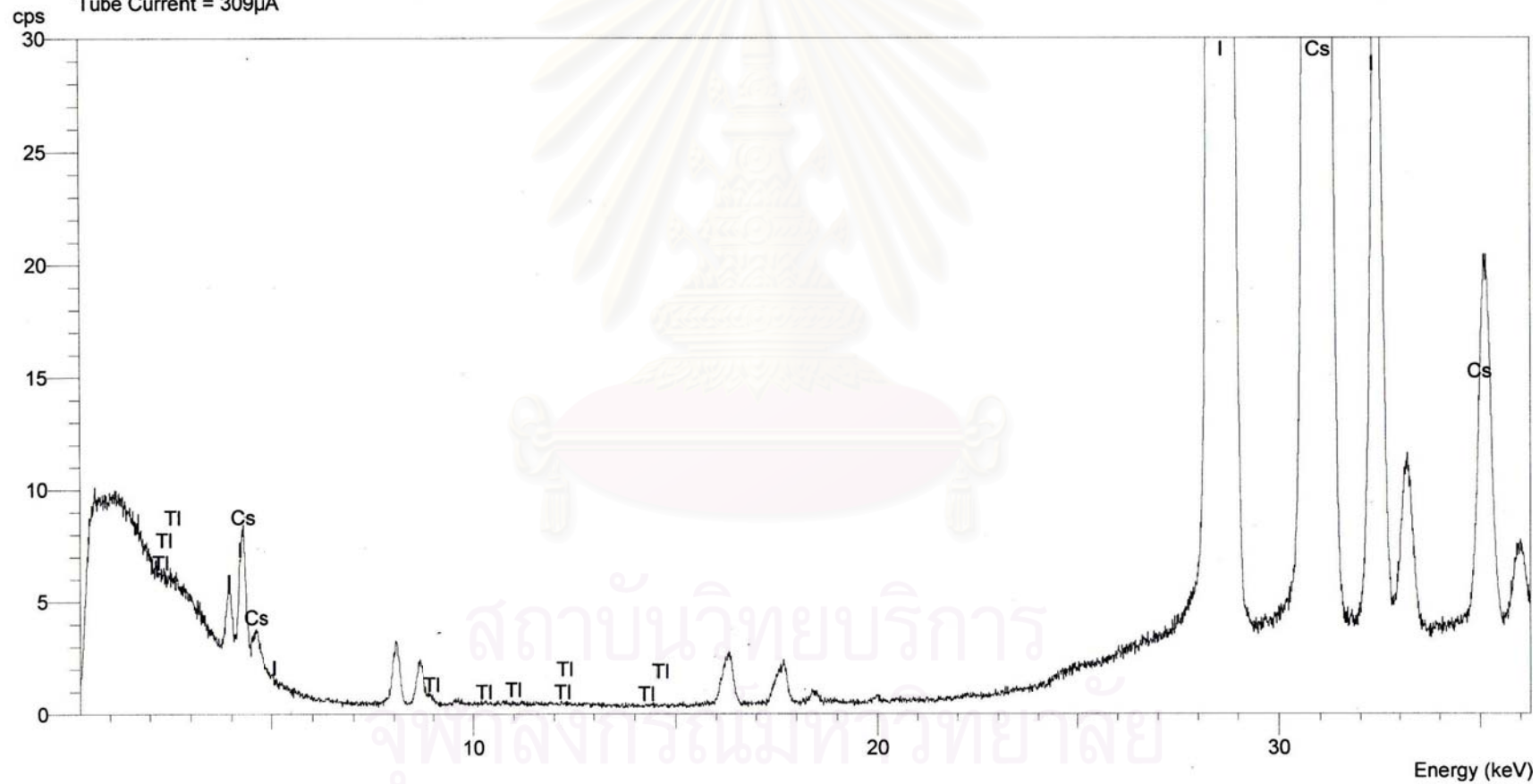
รุ่น: ED2000

ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์:

1. MODE	Vacuum Mode
2. Tube Voltage	50 kV
3. Filter	Thick Cu
4. Pulse Rate	16 kcps
5. Warmup Time	10 sec.
6. Upper Energy Limit	52 keV
7. Energy Rang	40 keV
8. Resolution	175 eV

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CsI_TIUnk_m (26 March 2004 12:17)
Fixed Conditions : Very heavy elements
Acquisition livetime = 120.0 s, realtime = 218.9 s
Tube Current = 309µA



ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นาย มานิตย์ จิตรภักดี เกิดวันที่ 2 พฤษภาคม พ.ศ. 2520 ที่จังหวัดพัทลุง สำเร็จการศึกษาปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ในปีการศึกษา 2541 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขานิวเคลียร์เทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2543



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย