

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

โพโตมิเนสเซนซ์ของไอออน Si^{4+} และ Ge^{4+} ในสารประกอบ $InBO_3$



นางสาวณัฐชา แก้วเรืองฤทธิ์
นางสาวสุภาพร สอาดพงษ์

ร/พ.
๓๖ ๓๒๑พ
๒๖๔๙

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**76633**
วัน,เดือน,ปี.....**3 S.A. 2550**

b. **11850511**
i.

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Photoluminescence of Si^{4+} and Ge^{4+} in InBO_3 Compound



Miss. Nutchaya Kaewraungrit

Miss. Supapord Saardpong

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the Requirement for the Degree of Bachelor
of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science






King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

Academic Year 2006

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง โฟโตลูมินเนสเซนซ์ของไอออน Si^{4+} และ Ge^{4+} ในสารประกอบ InBO_3
นักศึกษา นางสาว ณัฐชยา แก้วเรืองฤทธิ์
 นางสาว สุภาพร สอาดพงษ์
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม อ. ณัฐพร พรหมรส

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อนุมัติให้โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ		ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ	
กรรมการ	ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ	
กรรมการ	อ. กิรยุทธ ศรีนวลจันทร์	
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง	
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	อ. ณัฐพร พรหมรส	



.....
 (รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)
 หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	โฟโตลูมิเนสเซนซ์ของไอออน Si^{4+} และ Ge^{4+} ในสารประกอบ InBO_3
นักศึกษา	นางสาว ณัฐชยา แก้วเรืองฤทธิ์ นางสาว สุภาพร สอาดพงษ์
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา	2549
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. ฐิตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	อ. ณัฐพร พรหมรส

บทคัดย่อ

โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นการศึกษาลักษณะ โครงสร้างและสมบัติการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยการตรวจสอบด้วยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และโฟโตลูมิเนสเซนซ์ตามลำดับ โดย InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยปริมาณ 1%, 5%, 10%, 20% และ 30% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด ผลการวัดการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์พบว่า InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} และ Ge^{4+} มีโครงสร้างเป็นแบบเฮกซะ โกนอลและค่าคงที่โครงสร้างผลึกมีค่าลดลงเมื่อปริมาณการเจือเพิ่มขึ้น ผลการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ตำแหน่งฟิสิกการเรืองแสงสูงสุดอยู่ในช่วง 452 ถึง 467 นาโนเมตร และ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Ge^{4+} ที่อุณหภูมิ 50 เคลวิน ตำแหน่งฟิสิกการเรืองแสงสูงสุดอยู่ในช่วง 464 ถึง 474 นาโนเมตร เมื่อปริมาณการเจือมากขึ้นฟิสิกการเรืองแสงจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่มากขึ้น และจากการเรืองแสงโดยอุณหภูมิที่ใช้ในการวัดอยู่ในช่วง 50 ถึง 300 เคลวิน เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นพบว่าความเข้มการเรืองแสงมีค่าลดลง และพลังงานกระตุ้นของพาหะอิสระที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ และ $1000/T$ มีค่าอยู่ในช่วง 30 ถึง 55 meV

Special Project Title	Photoluminescence of Si^{4+} and Ge^{4+} in InBO_3 Compound
Name	Miss. Nutchaya Kaewraungrit Miss. Supapord Saardpong
Department	Applied Physics Faculty of Science
Program	Applied Physics
Academic Year	2006
Special Project Advisor	Assoc. Prof. Dr. Thitinai Gaewdang
Special Project Co-Advisor	Aj. Nathaporn Promros.

Abstract

In this special project, the structural and luminescent properties of InBO_3 doped by Si^{4+} and Ge^{4+} using X-ray diffraction (XRD) and photoluminescence (PL) measurements were investigated, respectively. The Si^{4+} and Ge^{4+} concentrations in the InBO_3 were varied at 1%, 5%, 10%, 20% and 30% of the total content by mole. The diffraction patterns of $\text{InBO}_3:\text{Si}_x^{4+}$ and $\text{InBO}_3:\text{Ge}_x^{4+}$ showed hexagonal structure and lattice constants were decreased with increasing concentrations. The results of the PL measurements of $\text{InBO}_3:\text{Si}_x^{4+}$ at 50 K showed maximum emission peak about 452 to 467 nm and $\text{InBO}_3:\text{Ge}_x^{4+}$ at 50 K showed maximum emission peak about 464 to 474 nm. The maximum emission peak position shifted to longer wavelength with increasing the Si^{4+} and Ge^{4+} concentration. Luminescent intensity was decreased with increasing temperature from 50 to 300 K. Activation energy of the free carriers obtained from the relation of $\ln(I/I_0)$ and $1000/T$ was about 30 to 55 meV.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความเมตตาและกรุณาของ รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง รศ.งามนิตย์ วงษ์เจริญ รศ.ดร. ทิพรัตน์ วงษ์เจริญ และ ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการทดลองตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและการให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดการศึกษา รวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ตั้งมโนไว้ให้กับลูกศิษย์ทุกคนเสมอมา

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และ เจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์คำแนะนำในการใช้เครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ (X-ray diffractometer) ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 advance ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ รศ.วิชาญ เตชิตธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชา เพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รศ.ดร.อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสาร

ขอขอบคุณ อ. ณัฐพร พรหมรส ที่ได้ทำการตรวจสอบและแก้ไขโครงการพิเศษและให้ความช่วยเหลือ ถ่ายทอดความรู้ แนะนำทางด้านวิชาการ รวมไปถึงการให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ คุณฐิติกร จรรยาธรรม คุณประธาน ประจวบโชค และ คุณณัฐวัฒน์ หุมเมฆ นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้อุปกรณ์ต่างๆ และคำแนะนำในการใช้โปรแกรมเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชา ตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา

ณัฐชยา แก้วเรืองฤทธิ์
สุภาพร สอาดพงษ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ซ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงาน	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
2 ทฤษฎีและหลักการ	5
2.1 โครงสร้างผลึกแบบของ InBO_3	5
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	6
2.3 ปฏิกิริยาการเรืองแสงของสาร	8
2.4 โฟโตลูมิเนสเซนซ์	10
2.5 กลไกการเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์	14
2.5.1 การเรืองแสงที่เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวโดยตรงกับโฮล ในแถบวาเลนซ์	14
2.5.2 การเรืองแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในระดับพลังงาน ย่อยร่วมกัน	15
2.5.3 การเรืองแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับ โคคัลไลซ์	16
2.5.4 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอน	17
2.6 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนในลักษณะต่างๆ	17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า
2.6.1 การเรียงแสงจากเอ็กซ์ทอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้	17
2.6.2 การเรียงแสงจากเอ็กซ์ทอนที่ถูกจับด้วยกับดักไอโซอิเล็กทริก	18
2.7 การเรียงแสงจากคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ	19
2.8 การตรวจสอบวัสดุด้วยโฟโตลูมิเนสเซนซ์	21
2.9 หลักการติดตั้งโฟโตลูมิเนสเซนซ์	21
2.9.1 หลักการทำงาน	22
2.9.2 พลังงานกระตุ้น	23
2.9.3 การควบคุมอุณหภูมิ	24
2.10 การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง	26
2.11 แผนภาพระยะทางสัมพันธ์ของตำแหน่งอะตอมในผลึก	27
2.12 พารามิเตอร์ของคัปปลิง ฮวง-รีส์	30
2.13 การย้ายสถานะทางพลังงานโดยไม่มีแสง	34
3 วิธีการทดลอง	37
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสาร	37
3.1.1 ขั้นตอนการคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดลอง	37
3.1.2 ขั้นตอนการผสมสาร	38
3.1.3 ขั้นตอนการอัดเม็ดสาร	39
3.1.4 ขั้นตอนการเผาสาร	39
3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสาร	41
3.2.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุดภาคของผงผลึก InBO_3 ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	41
3.2.2 ตรวจสอบการเรียงแสงของสารที่ทำการวิจัยด้วยเครื่องเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

บทที่	หน้า	
4	ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล	46
	4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	47
	4.2 ผลการศึกษาการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si ⁴⁺ และ Ge ⁴⁺	51
5	บทสรุปและข้อเสนอแนะ	66
	5.1 บทสรุป	66
	5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ	68
เอกสารอ้างอิง		69
ภาคผนวก		72
ประวัติผู้เขียน		73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของลูมิเนสเซนซ์ตามวิธีการกระตุ้น	9
ตารางที่ 2.2 สารที่ใช้ทำความเย็นภายในตัวโคร โอลิไนท์ที่ความดัน 1013 mb	24
ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$	64
ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกของ InBo_3 ,	5
รูปที่ 2.2 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของ โครงสร้างผลึกของ InBo_3 ,	6
รูปที่ 2.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์	7
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน	10
รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเรืองแสงและไม่เรืองแสง	11
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน	12
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เรืองออกมากับความยาวคลื่น	12
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงโดยการเจือสาร 2 ชนิด	13
รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงของพาหะ ก.แสดงถึงตัวแอกติเวเตอร์ (A) ใน โครงผลึกเจ้าบ้าน (H) ข.แสดงทั้งเซนซิไทซ์เซอร์ (S) และแอกติเวเตอร์ (A) ใน โครงผลึกเจ้าบ้าน (H)	13
รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเรืองแสงในระดับพลังงานของสารเจือ ที่มีระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า	14
รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเรืองแสงของพาหะอิสระระหว่างแถบคอนดักชันและแถบเวเลนซ์	15
รูปที่ 2.12 แสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและ โฮล ที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (กรณีซ้าย) และการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้และ โฮลอิสระ (กรณีขวา)	15
รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเรืองแสงของศูนย์กลางชนิด F ใน KCl	16
รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงเอ็กซิตอนที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้	18
รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมการเรืองแสงของเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคูლობ์ของ GaP:S	18
รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างคูของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ	19
รูปที่ 2.17 การติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์พื้นฐาน	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.18 สเปกตรัมของการแผ่รังสีของหลอดไฟแต่ละชนิด ระยะห่าง 50 ซม	23
รูปที่ 2.19 แสดงพันธะอ็อกเตฮีดรอล AB_6	26
รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพระยะทางสัมพัทธ์ของตำแหน่งของกลุ่มอะตอม AB_6 ที่สั้นในลักษณะเข้า – ออกจากกัน	28
รูปที่ 2.21 แสดงรูปร่างของแอมพลิจูดของฟังก์ชัน $ x_0(Q) ^2$ และ $ x_{20}(Q) ^2$ ของออสซิลเลเตอร์ฮาร์โมนิก	29
รูปที่ 2.22 แสดงการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงานระหว่างสถานะเริ่มต้นกับสถานะตอนปลายของอิเล็กตรอนในอะตอมเป็นศูนย์กลางการเรืองแสง	30
รูปที่ 2.23 แผนผังแสดงระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างอะตอมในโครงผลึกซึ่งใช้อธิบายถึงกลไกการเกิด	34
ก. กระบวนการเรืองแสง	
ข. กระบวนการไม่เรืองแสงขณะที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะทางพลังงานจากสถานะตอนปลายสู่สถานะตอนต้นเส้นกราฟรูปไซน์แสดงถึงเส้นทางการย้ายสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอน โดยไม่มีการเรืองแสงเกิดขึ้น	
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร	37
รูปที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร โดยการตั้ง โปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเตาเผา	38
รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	39
รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายของเครื่องเอกซเรย์ดิฟแฟรค โตรมิเตอร์ ซึ่งใช้ในการตรวจสอบ โครงสร้างของสารประกอบเซรามิกส์ $InBO_3$	40
รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่องสเปกโตรฟลูออโร โฟโตมิเตอร์ รุ่น RF-5301PC พร้อมด้วย ปืนกลโรตารีและระบบทำความสะอาด โดยเครื่อง โคร โอิจินิคที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการเรืองแสงของ $InBO_3$ ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} และ Ge^{4+}	41
รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการติดตั้งเครื่องมือในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของสารประกอบ InBO_3 ที่เจือ Si^{4+} 1% ของน้ำหนักปริมาตรทั้งหมดที่มีลักษณะเป็นเม็ด ก. ก่อนเผา ข. หลังเผา	46
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงผลึกสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}_x^{4+}$	47
รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงผลึกสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}_x^{4+}$	48
รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ผลึกกับสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}_x^{4+}$	50
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่ผลึกกับสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}_x^{4+}$	50
รูปที่ 4.6 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (1%) ที่อุณหภูมิ 50 K	51
รูปที่ 4.7 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (5%) ที่อุณหภูมิ 50 K	52
รูปที่ 4.8 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (10%) ที่อุณหภูมิ 50 K	52
รูปที่ 4.9 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (20%) ที่อุณหภูมิ 50 K	53
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (1%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	53
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (5%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	54
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (10%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	54
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (20%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Si ⁴⁺ (1%)	56
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Si ⁴⁺ (5%)	56
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Si ⁴⁺ (10%)	57
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Si ⁴⁺ (20%)	57
รูปที่ 4.18 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Ge ⁴⁺ (1%) ที่อุณหภูมิ 50 K	58
รูปที่ 4.19 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Ge ⁴⁺ (5%) ที่อุณหภูมิ 50K	58
รูปที่ 4.20 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Ge ⁴⁺ (10%) ที่อุณหภูมิ 50 K	59
รูปที่ 4.21 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ :Ge ⁴⁺ (20%) ที่อุณหภูมิ 50 K	59
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ สารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ : Ge ⁴⁺ (1%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	60
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ สารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ : Ge ⁴⁺ (5%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	60
รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ สารประกอบเซรามิกส์ InBO ₃ : Ge ⁴⁺ (10%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	61

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ สารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (20%) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K	61
รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (1%)	62
รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (5%)	62
รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (10%)	63
รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (20%)	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการโครงการพิเศษ

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ คือวิธีการใช้ในการศึกษาชนิดและปริมาณของสารเจือหรือข้อบกพร่องของผลึก ซึ่งใช้หลักการเรืองแสงของผลึกภายใต้การกระตุ้นด้วยแสง จากแหล่งกำเนิดที่เหมาะสม แสงที่ใช้กระตุ้นอาจเป็นอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไอปรอทหรือแสงจากเลเซอร์ชนิดต่างๆ อิเล็กตรอนในเนื้อวัสดุ โดยเฉพาะที่ในบริเวณผิวหน้าของเนื้อวัสดุ จะดูดกลืนพลังงานแล้วเคลื่อนย้ายระดับพลังงานไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้น หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงาน ตกกลับลงมายังสถานะพื้น ผ่านระดับพลังงานที่ปรากฏในช่องว่างแถบพลังงานแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548]

ในปี 1976 Raghavan ได้เสนอวิธีการใหม่ในการตรวจจับนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ โดยผ่านปฏิกิริยานิวเคลียร์ $\nu(E > 128 \text{ keV}) + {}^{115}\text{In} \rightarrow e^- + {}^{115}\text{Sn}^* + \gamma$ จากนั้นนิวเคลียสของธาตุ ${}^{115}\text{Sn}^*$ จะปล่อยรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 116 และ 496 KeV โดยที่ ${}^{115}\text{Sn}^*$ มีช่วงชีวิต 3.2 μs ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างตัวตรวจจับที่เป็นวัสดุของแข็ง InBO_3 เป็นสารประกอบที่มีเนื้อ In^{3+} ในปริมาณมากจึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดนิวตริโน [Messous และคณะ, 1995] โดยที่ผ่านมาได้มี การศึกษาสมบัติการเรืองแสงของ InBO_3 เป็นแถบกว้างที่มีจุดสูงสุดที่พลังงาน 3.10 eV ค่าเลื่อนไปของสโตก (stoke shift) มีค่าประมาณ 1.26 eV ค่าเลื่อนไปของสโตกส์ที่มีค่ามากกว่าพบในสารประกอบ BO_3 ชนิดอื่น ๆ ที่เจือด้วย Bi^{3+} และมีโครงสร้างแบบแคลไซต์ (calcite structure) โดย $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}$ จะมีแถบการเรืองแสงเป็นแถบกว้างนอกจากนั้นยังมีการเจือด้วย Cr^{3+} ลงใน InBO_3 ซึ่งแถบการเรืองแสงจะเกิดจาก ${}^4T_2 \rightarrow {}^4A_2$ ซึ่งสามารถนำไปทำเป็นลูมิเนสเซนส์ โซลาคอนเซนเตรเตอร์ (luminescent solar concentrator) และ โซลิดสเตทเลเซอร์ (solid state laser) [Dotsenko และคณะ, 1996] การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของ $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Ge}^{4+}$ ผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (XRD) พบว่าโครงสร้างผลึกของ ZnGa_2O_4 ที่เจือด้วย Ge^{4+} เป็นเฟสเดี่ยวและค่าคงที่ของโครงผลึกมีค่าลดลง ZnGa_2O_4 ที่เจือด้วย Ge^{4+} พิกของการเรืองแสง จะเลื่อนไปจากความยาวคลื่น 400 ถึง 360 นาโนเมตร [Kim^{***} และคณะ, 2003] การศึกษาลักษณะทางโครงสร้างผลึกและสมบัติทางแสงของ $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Si}^{4+}$ ทำการศึกษาโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โครงสร้างผลึกของ $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Si}^{4+}$ เป็นเฟสเดี่ยว การวัดด้วยโฟโตลูมิเนสเซนซ์ แถบสเปกตรัมที่อุณหภูมิ 6 เคลวิน เกิดพีค 2 พีค ที่ 375 และ 400 นาโนเมตร แสดงให้เห็นว่า ZnGa_2O_4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ถูกเจือด้วย Si^{4+} ความเข้มแสงฟลักจะสูงกว่า ZnGa_2O_4 ที่ไม่ได้เจือ และเมื่อทำการเจือ Si^{4+} ลงใน ZnGa_2O_4 ตำแหน่งฟลักของการเรืองแสง จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่ยาวกว่า พฤติกรรมนี้อธิบายได้ โดยแถบพลังงานผู้รับ (acceptor) ของซิงค์เป็นตำแหน่งว่างและแถบพลังงานผู้ให้ (donor) ของ Si^{4+} [Kang^{a,*} และคณะ, 2002] ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาเราได้ศึกษาการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Si}^{4+}$ และ Ge^{4+} และทำการเจือธาตุอื่น ๆ เข้าไปอีกเพื่อศึกษาถึงผลที่จะเกิดขึ้นซึ่งเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยปริมาณการเจือที่ต่างกัน
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} โดยการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
3. ศึกษาการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิต่ำ และศึกษาผลของอุณหภูมิต่ำต่อการเรืองแสง
4. เพื่อเป็นพื้นฐานในการศึกษาและนำไปประยุกต์ใช้กับการเตรียมสารชนิดอื่นๆต่อไป
5. เพื่อศึกษาการสร้างและใช้เครื่องมือในการตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคและ เชนมภาพที่ใช้ในโรงงานพิเศษ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ด้วยการเจืออะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ในปริมาณที่ต่างกัน
2. ตรวจสอบโครงสร้างผลึก ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์
3. ตรวจสอบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
4. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอนดังนี้

1. จัดสรรตารางการแบ่งเวลาของขั้นตอนในการวิจัย
2. นำเอกสารอ้างอิงที่ได้จากการค้นคว้ามาใช้เป็นฐานข้อมูลและใช้เปรียบเทียบในการทำการวิจัย
3. ศึกษาอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในงานวิจัย เช่น
 - 3.1 เตาอุณหภูมิสูง
 - 3.2 เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์
 - 3.3 เครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
4. ทำการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้
 - 4.1 อัดเม็ดสารตัวอย่างของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 บริสุทธิ์เพื่อใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง
 - 4.2 อัดเม็ดสารตัวอย่างที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ในปริมาณที่ต่างกัน
5. ทำการตรวจสอบคุณสมบัติของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่ได้ดังต่อไปนี้
 - 5.1 ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
 - 5.2 ตรวจสอบคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ในปริมาณที่ต่างกันด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
 - 5.3 ตรวจสอบคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัยเปรียบเทียบผลกับเอกสารอ้างอิง และสรุปผลการวิจัยระยะเวลาในการดำเนินงานแต่ละขั้นตอน

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบหลักการทำงานและวิธีการใช้ในอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย เช่น เตาอุณหภูมิสูง เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ เป็นต้น
2. ทราบถึงวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3
3. ทราบถึงโครงสร้างของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3
4. ทราบถึงผลของชนิดของสารเจือ และปริมาณของสารเจือที่มีต่อคุณสมบัติทางการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทราบถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อคุณสมบัติทางการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+}
- 6 ใช้เป็นพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการศึกษาสารชนิดอื่นๆต่อไปและเป็นแรงกระตุ้นทางการค้นคว้าวิจัยสารประกอบเซรามิกส์ชนิดใหม่ๆ



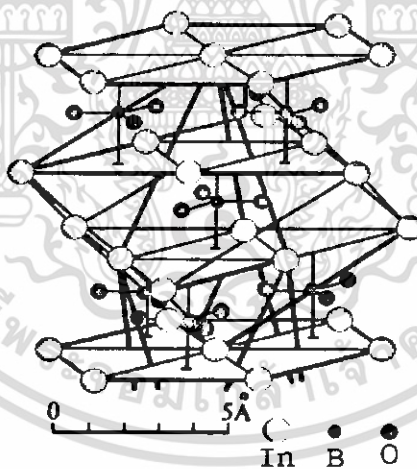
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

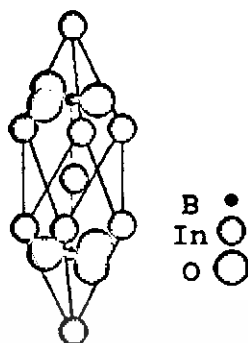
ทฤษฎีและหลักการ

ในงานวิจัยเป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างและคุณสมบัติด้านการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Ge^{4+} และ Si^{4+} ซึ่งจะได้อธิบายในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ โดยประกอบไปด้วยลักษณะโครงสร้างของโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ การศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และหลักการเกี่ยวกับการเรืองแสงของสารซึ่งเป็นวัตถุประสงค์สำคัญในงานวิจัยนี้

2.1 ลักษณะโครงสร้างผลึกของ InBO_3 [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548]



รูปที่ 2.1 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึก ของ InBO_3 [Garcia ,2005]



รูปที่ 2.2 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกของ InBO_3

ในรูปด้านบนถ้าพิจารณาตามแนวแกน B จากบนลงล่าง เราจะพบไอออน In ที่ปลายของรอมโบฮีดรอล (rhombohedral) แสดงให้เห็น จากนั้นเราจะพบกลุ่ม BO_3 ที่จุดศูนย์กลางของรอมโบฮีดรอลและจะพบไอออน In อีกครั้งที่ตำแหน่งสุดท้าย ไอออน In ตัวแรกใน 3 ตัวที่เหมือนกันนี้ จะมีลักษณะเช่นเดียวกับไอออน In ตัวบนของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่แสดงในรูป 2.2 กลุ่ม BO_3 ที่จุดศูนย์กลางของรอมโบฮีดรอลมีลักษณะเช่นเดียวกับกลุ่ม BO_3 ด้านบนในรูปที่ 2.2 ไอออน In ลำดับที่ 2 ใน 3 ตัวที่เหมือนกับที่ต่ำกว่าด้านล่างของรอมโบฮีดรอลมีลักษณะเช่นเดียวกับไอออน In ตรงกลางรูปที่ 2.2 หนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างแบบแคลไซต์ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ซึ่งเป็นรอมโบฮีดรอลที่ยืดออก ซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม BO_3 ที่จัดเรียงตัวต่างกับ 2 กลุ่ม กลุ่มหนึ่งมีตำแหน่งอยู่บน ไอออน ตรงกลางและอีกกลุ่มอยู่ด้านล่าง ไอออน In ตรงกลางหนึ่งหน่วยเซลล์นี้ประกอบด้วยอะตอม In 2 อะตอม ($8 \times 1/8 + 1$) และกลุ่ม BO_3 2 กลุ่ม มีพันธะเคมีแบบอ็อกตะฮีดรอล (octahedral)

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548; ฐิตินัย และคณะ, 2546; ฐิติกร, 2550]

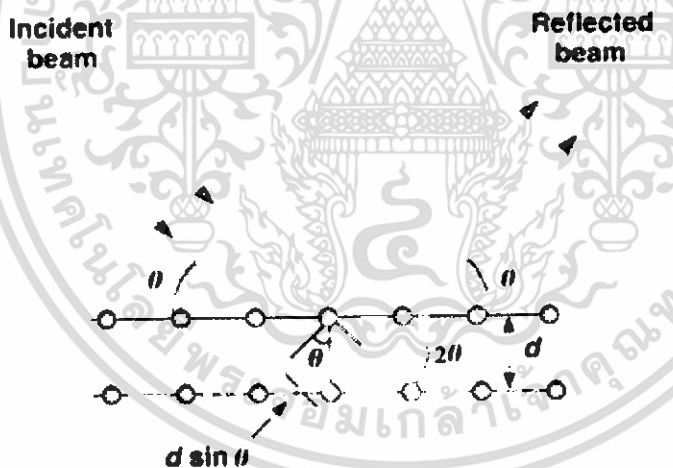
การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยวิธี $\theta - 2\theta$ ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ เป็นวิธีที่ใช้ในการจำแนกลักษณะโครงสร้างของผลึก ซึ่งอาศัยรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกับสารตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ซึ่งสารตัวอย่างจะหมุนเป็น θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ และเมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่าน โครงสร้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริมโดย แบริกก็ได้เสนอว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบ โดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุด เมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (path difference) เป็นจำนวนเท่าระนาบของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ซึ่งเรียกว่ากฎของแบรกก์ ดังสมการ(2.1)

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (2.1)$$

- โดย λ คือ ความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์
 n คือ ลำดับของการเลี้ยวเบน
 d_{hkl} คือ ระยะห่างระหว่างระนาบ
 θ คือ มุมตกกระทบและมุมสะท้อนของรังสีเอ็กซ์เมื่อเทียบกับระนาบของผลึก



รูปที่ 2.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

โดยในระนาบที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบ แล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ จะเรียกว่า ระนาบแบรกก์ และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบ เรียกว่า มุมเลี้ยวเบนซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท จากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริม จะทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์มีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้ จากตำแหน่งพิกัดในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพิกัดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมสำหรับธาตุ หรือสารประกอบชนิดเดียวกัน และจะมีตำแหน่งของพิกัดที่มุมของการเลี้ยวเบนต่างกันสำหรับธาตุ หรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่างกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผลึก ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้น ทำได้โดยเปรียบเทียบตำแหน่งของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ ซึ่งดัชนีมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก

2.3 ปรากฏการณ์การเรืองแสงของสาร [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548; ฐิตินัย และคณะ, 2546; ฐิติกร, 2550; ดุสิต, 2542.]

ปรากฏการณ์การเรืองแสงของสาร(luminescence) เป็นชื่อเรียกปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเรืองแสงทั้งหมด นอกเหนือจากการเรืองแสงชนิดการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) และชนิดการแผ่รังสีเชเรนโกฟ (Cerenkov radiation) การเรืองแสงของสารเกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่สถานะระดับพลังงานที่ต่ำกว่าการเรืองแสงของสาร สังเกตได้ทั้งในวัสดุก๊าซ ของเหลว และของแข็งและทั้งวัสดุชนิดอนินทรีย์และอินทรีย์ วิธีการกระตุ้นให้พลังงานแก่วัสดุมีได้หลายวิธี เช่น การฉายแสง การยิงลำอิเล็กตรอน การยิงลำไอออน การเพิ่มความกดดัน การเพิ่มความร้อน การทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี การป้อนสนามไฟฟ้าและการผ่านกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแสดงชนิดของลูมิเนสเซนซ์ โดยแบ่งตามวิธีการกระตุ้นดังตารางที่

2.1

ตารางที่ 2.1 แสดงชนิดของการเรืองแสงของสารตามวิธีการกระตุ้น

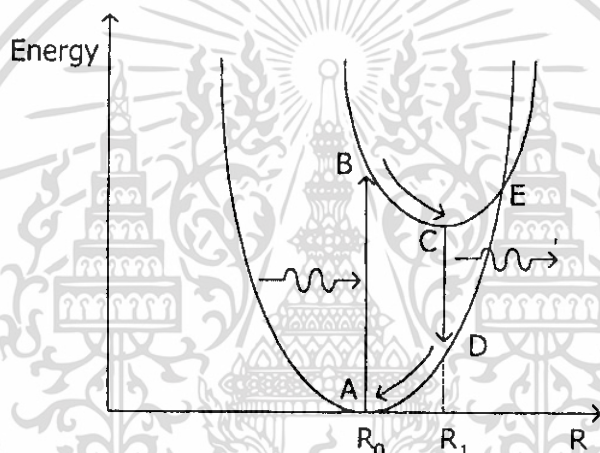
ชนิดของลูมิเนสเซนซ์	วิธีการกระตุ้น
- โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence:PL) - ชนิดสโตก (stokes type) - ชนิดแอนติสโตก (anti-Stokes type)	แสง
- อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence:EL) - อินทรินซิกอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (intrinsic EL) - ไดโอดเปล่งแสง (carrier Injection EL:LED)	ไฟฟ้า
- แคโทดลูมิเนสเซนซ์ (cathode-luminescence)	อิเล็กตรอน
- เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermo-luminescence)	ความร้อน
- ไทโรลูมิเนสเซนซ์ (tribo-luminescence)	การเสียดสี
- เคมีคัลลูมิเนสเซนซ์ (chemical-luminescence)	ปฏิกิริยาเคมี
- เอกซ์เรย์ลูมิเนสเซนซ์ (x-ray-luminescence)	รังสีเอกซ์

ในกรณีของหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์จะทำงานโดยเริ่มจากปรอทที่บรรจุอยู่ภายในหลอด จะถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้าให้เกิดการดีสชาร์จ (discharge) ทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่เคลือบอยู่บริเวณผิวด้านในของหลอด ทำให้เกิดแสงสว่างที่ตามนุษย์มองเห็นกรณีจอภาพโทรทัศน์ชนิด CRT (cathode ray tube) สว่างได้ เพราะสารเรืองแสงชนิดฟอสฟอรัส (phosphors) ถูกกระตุ้นด้วยลำอิเล็กตรอนที่ถูกยิงออกมาจากปืนอิเล็กตรอน (electron gun) กรณีไดโอดเปล่งแสง (LED) นั้นเปล่งแสงได้เพราะมีกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไป ปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์เหล่านี้มีความสำคัญมากต่อประสาทตาของมนุษย์ทำให้ตาของมนุษย์มองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ ทำให้มนุษย์สามารถรับรู้และอ่านข้อมูลจากหน่วยแสดงผลได้ด้วยตาและทำให้มนุษย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้อย่างมีความสุข

2.4 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548; ฐิตินัย และคณะ, 2546; ฐิติกร, 2550; จุสิต, 2542.]

แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

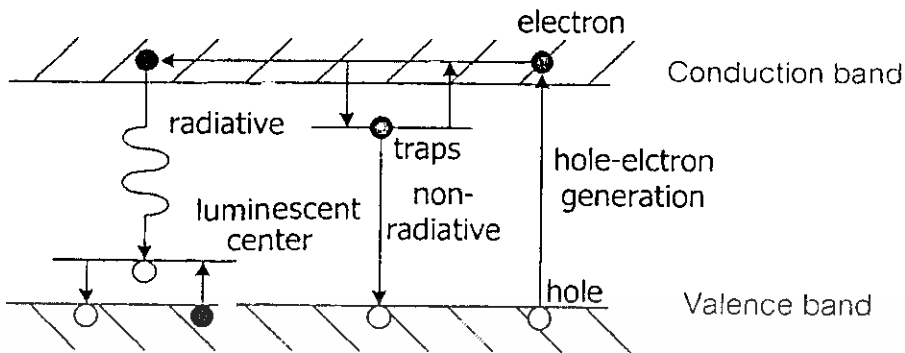
1. ฟลูออเรสเซนซ์ จะเกิดการเรืองแสงในขณะที่มีการกระตุ้น กลไกก็จะมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) สั้นๆ ประมาณน้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-8} วินาที
2. ฟอสฟอเรสเซนซ์ จะเกิดการเรืองแสงภายหลังที่มีการกระตุ้นจึงมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) นานกว่าแบบฟลูออเรสเซนซ์ คืออาจมีค่าประมาณ 10^{-3} วินาที หรืออาจเป็นชั่วโมง



รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 2.4 จากอิเล็กตรอนที่อยู่ตำแหน่ง A เมื่อถูกคลื่นพลังงานโฟตอนจะถูกกระตุ้นจนไปอยู่ที่ตำแหน่ง B และหลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ (R_1) และอิเล็กตรอนที่เคลื่อนจากตำแหน่ง B ไปยัง C ได้ปล่อยโฟนอน (non-radiative) ออกไป หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากจุด C ไปยัง D และเรืองแสง (radiative) โดยจะมีโฟตอนเกิดขึ้น และที่ตำแหน่ง D ให้ออกรอบๆ จะรีแลกเซชันเพื่อกลับไปยังตำแหน่ง R_0 ที่ตำแหน่ง C เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้การเรืองแสงหายไป (quenching temperature) อิเล็กตรอนจะไปอยู่ที่ตำแหน่ง E จะทำให้อิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้น (excited state) สามารถกลับมาที่สถานะพื้น (ground state) ได้เลย โดยพลังงานค่าเดิมจะไม่มี การเรืองแสงออกมา (non-radiative)

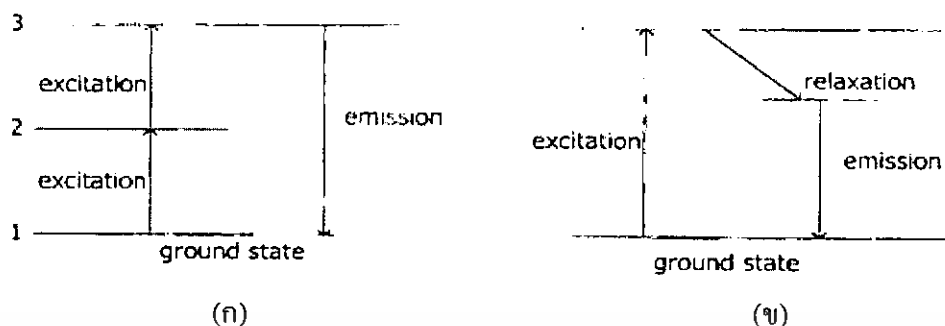
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเรืองแสง และ ไม่เรืองแสง

จากรูปที่ 2.5 เมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนจะเกิดการเลื่อนไป จากตำแหน่งเดิม หากอิเล็กตรอนนี้ถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอน (trap) มากกว่าจึงทำให้ สารกึ่งตัวนำ ไม่ค่อยเกิดการเรืองแสง

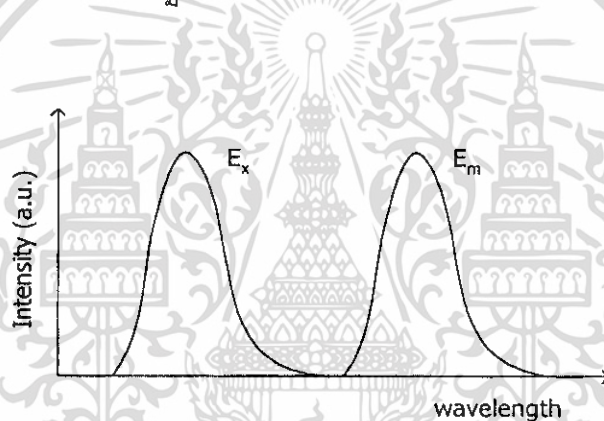
จากปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบปกติ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในการเรืองแสงจะมี คำน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น แต่ในปรากฏการณ์ แอนติ-สโตก พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมี ค่าสูงกว่าพลังงานกระตุ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุบางชนิดมีระดับพลังงานที่ตรงกึ่งกลางพอดี เมื่อ เราใส่พลังงานกระตุ้นที่มีค่าเท่ากับระดับพลังงาน 1 ไป 2 นั้น จะเปรียบเสมือนว่า ให้พลังงาน กระตุ้นจากระดับพลังงาน 2 ไป 3 ด้วย ดังนั้นในที่สุดอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงาน จากระดับ พลังงาน 1 ไป 3 เมื่อให้พลังงานกระตุ้นภายในครั้งเดียว และจากนั้นจะย้ายสถานะ พลังงานจาก ระดับพลังงาน 3 มายังระดับพลังงาน 1 โดยปลดปล่อยพลังงานออกมาดังนั้น พลังงานโฟตอนที่ ปลดปล่อยออกมาจึงมีค่ามากกว่าพลังงานโฟตอนกระตุ้นที่ใส่เข้าไป ดังรูปที่ 2.6 (ก)



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน

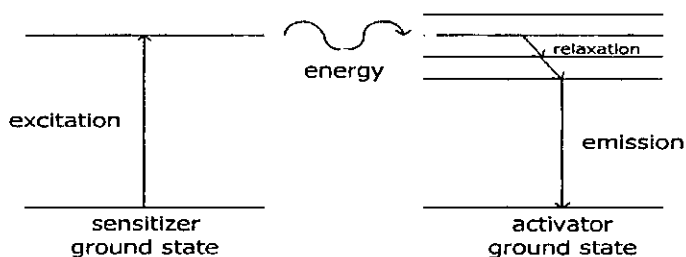
ก. แอนติสโตก (anti-stoke)

ข. ปราภฏการณ์การเรืองแสงแบบปกติ

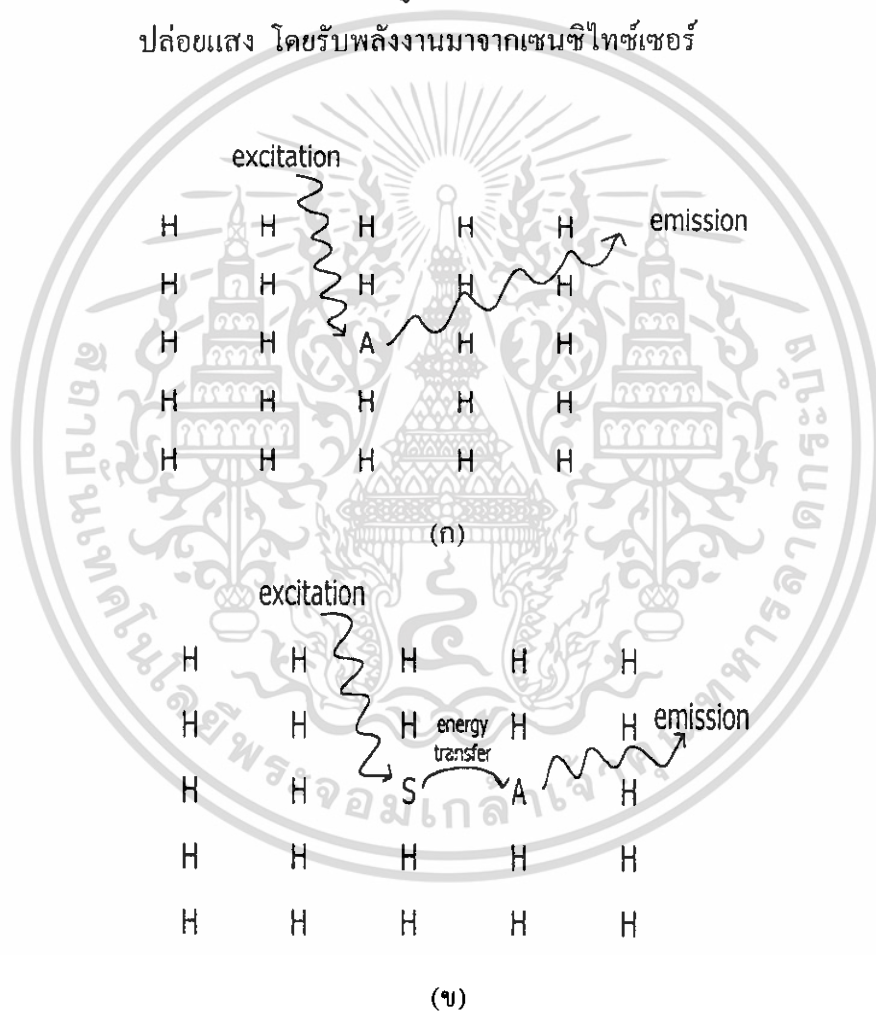


รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เรืองแสงออกมากับความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าพลังงานของการเรืองแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลื่อนไปของสโตก (stoke shift) พลังงานที่หายไปจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับโครงผลึก (lattice) โดยที่ E_x และ E_m คือ แถบพลังงานการกระตุ้นและแถบพลังงานของการเรืองแสงตามลำดับ



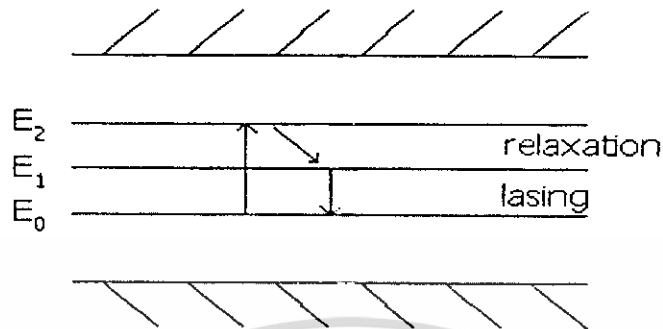
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงโดยการสื่อสาร 2 ชนิดจะมี
เซนซิไทเซอร์เป็นตัวดูดกลืนแสง และ แอกติเวเตอร์ เป็นตัวปลด
ปล่อยแสง โดยรับพลังงานมาจากเซนซิไทเซอร์



รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงของพหุอะ

- ก. แสดงถึงตัวแอกติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H)
- ข. แสดงทั้งเซนซิไทเซอร์ (S) และแอกติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเรืองแสงในระดับพลังงานของสารเจือ
ที่มีระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า

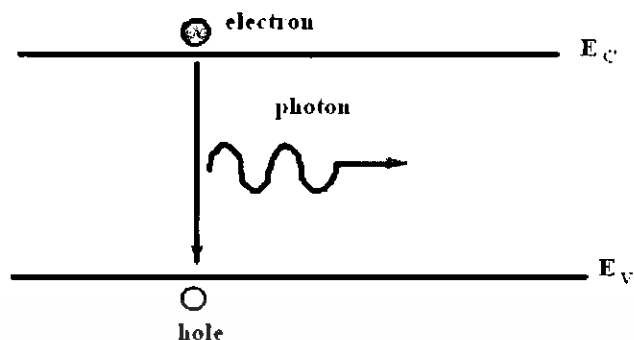
เมื่อไอออนถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานขึ้นไปทีระดับพลังงานสูงสุดของสารเจือ จากนั้นจะเกิดการผ่อนคลาย (relaxation) หลังจากนั้นจะเกิดการเรืองแสง (lasing) ตกกลับลงมาที่ระดับพลังงานต่ำที่สุดของสารเจือและจะเรืองแสงในตัวของมันเองออกมา

2.5 กลไกการเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์ [ฉวีวัฒน์ และคณะ, 2548; ฐิตินัย และคณะ, 2546; ฐิติกร, 2550; Kittel, 1971]

กลไกการเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์เกิดจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ โดยสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ ดังนี้

2.5.1 การเรืองแสงที่เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวโดยตรงกับโฮลในแถบวาเลนซ์

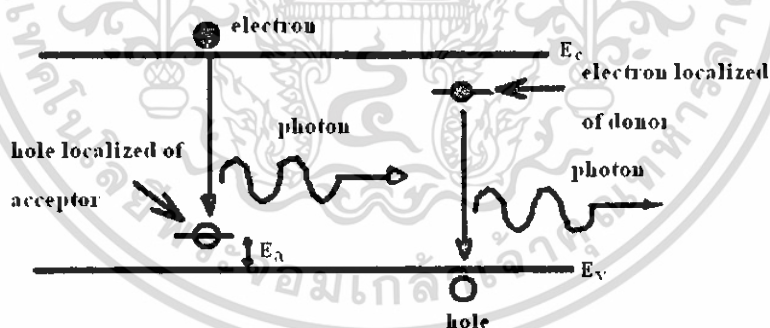
เป็นการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (band-to-band transition) กล่าวคือเป็นการรวมตัวกันโดยตรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำตกลงมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) แสงที่เปล่งออกมา จะมีพลังงานโฟตอนเท่ากับขนาดของช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเรืองแสงของพาหะอิสระระหว่างแถบนำและแถบเวเลนซ์

2.5.2 การเรืองแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในระดับพลังงานย่อยร่วมกัน

เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวกับโฮล ที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับหรืออิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ในระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้รวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์โดยการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูป 2.12

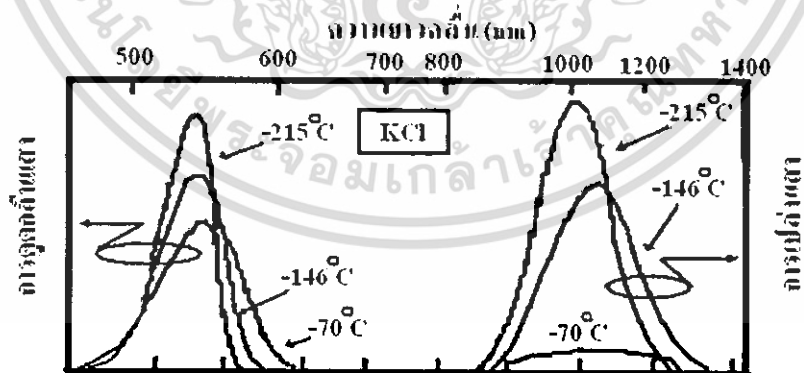


รูปที่ 2.12 แสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮล ที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (กรณีซ่าย) และการเรืองแสง ที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้และโฮลอิสระ (กรณีขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 การเรืองแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับโลคอลลൈซ์

เกิดจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนที่มีสถานะพลังงานแบบโลคอลลൈซ์ (localized states-to-localized states) ตัวอย่างเช่น การเปล่งแสงจากศูนย์กลางชนิด F (F-centers) ในวัสดุชนิดอัลคาไลไนต์เฮไลด์ซึ่งผลึกของวัสดุชนิดนี้เมื่อถูกอบให้ร้อนภายในบรรยากาศของโลหะตระกูลอัลคาไล (เช่น Li, Na, K, Rb, Cs และ Fr) จะทำให้อะตอมของโลหะอัลคาไลไนต์แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อผลึกอัลคาไลไนต์เฮไลด์และทำให้ในเนื้อผลึกนั้นมีจำนวนอะตอมชนิดเฮไลด์ (เช่น F, Cl, Br, I และ At) ที่ไม่สมดุลกับอะตอมอัลคาไลไนต์คือเปรียบเสมือนกับเกิดช่องว่างที่ขาดอะตอมเฮไลด์ จากนั้นเพื่อให้สภาพทางไฟฟ้าเป็นกลางอิเล็กตรอนจะวิ่งไปจับอยู่ที่ช่องว่างของเฮไลด์เปรียบเสมือนว่าช่องว่างนั้นเป็น ไอออนบวกและอิเล็กตรอนจะถูกแรงดึงดูดบีบอัดไว้คล้ายกับแบบจำลองของอะตอมไฮโดรเจน และอิเล็กตรอนเหล่านั้นมีสถานะพลังงานอยู่ที่สถานะพื้นต่อนั้นเมื่อมีแสงส่องเข้าสู่ผลึกชนิดนี้แสงนั้นจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะจากสถานะพื้นให้ขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้นจึงเกิดการดูดกลืนแสงขึ้น หลังจากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานกลับคืนสู่สถานะพื้นจะมีการเรืองแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นออกมา จึงทำให้ผลึกนั้นมีสีตามความยาวคลื่นของแสงที่ถูกเรืองแสงออกมา เราเรียกการเกิดข้อบกพร่องของโครงผลึกเช่นนี้ว่าเป็นการเกิดศูนย์กลางสี (color centers) หรือ ศูนย์กลางเอฟ ซึ่งย่อมาจากผู้ค้นพบคือ ฟาร์บี-เซนเทอร์ม (Farbe Senterm)



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของศูนย์กลางชนิด F ใน KCl

2.5.4 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอน

เอ็กซิตอน คือ คู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้น แต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นนั้น ยังมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้พาหะทั้งคู่แยกออกจากกันเป็นอิสระได้ กล่าวคือ ยังมีแรงดึงดูดดึงดูดคู่อิเล็กตรอนและโฮลจับกันอยู่เป็นคู่ๆ และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลยังอยู่ภายในช่องว่างพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนและโฮลดังกล่าวเกิดการรวมกันจะปลดปล่อยพลังงานออกมาโดยเอ็กซิตอนมี 2 ชนิด คือ

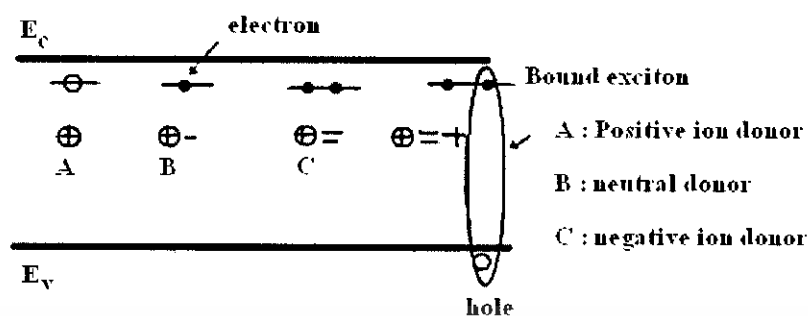
- เอ็กซิตอนชนิดที่เป็นอิสระ (free exciton) การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนชนิดอิสระนี้มีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานเล็กน้อย
- เอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว (bound exciton) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในเอ็กซิตอนชนิดนี้อยู่ใกล้กันมาก ดังนั้นพลังงานโฟตอนของแสงที่ถูกเรืองออกมาจากการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงมีค่าน้อยกว่า ขนาดของช่องว่างพลังงานมาก

2.6 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนในลักษณะต่างๆ [ฉวีวัฒน์ และคณะ, 2548; สฐิตินัย และคณะ, 2546; จุติกร , 2550; Kittel,1971]

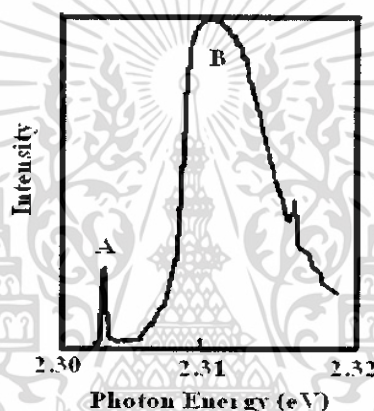
2.6.1 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้

การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้ตัวอย่างเช่น การเจือสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP ด้วยอะตอม S จะทำให้อะตอม S เข้าไปแทนที่อะตอม P และอะตอม S จะทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ ในสภาพที่อะตอม S จับอิเล็กตรอนไว้นั้นอะตอม S ยังมีสภาพไฟฟ้าเป็นกลางแต่ถ้าอะตอม S ปลดปล่อยให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำ อะตอม S จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอออนบวก ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ “+” แทนไอออนบวกและสัญลักษณ์ “+ -” แทนสภาพ S ที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวมาจับที่อะตอมผู้ให้ ที่เป็นกลางนี้จะทำไดเนอร์ที่เป็นกลางเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบแยกซึ่งสามารถแทนไอออนลบได้ด้วยสัญลักษณ์ “+ =” รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของการเกิดเอ็กซิตอนลักษณะ ดังกล่าว ในสภาพเช่นนี้ถ้ายังมีโฮลวิ่งเข้ามาใกล้ไอออนลบนี้โฮลจะถูกแรงดึงดูดจากไอออนลบดึงดูดไว้และทำให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.14 ด้านริมขวาและถ้าคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้มีการรวมตัวกันก็จะเกิดการเรืองแสงออกมา โดยรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการเรืองแสงจากเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวใน GaP:S

76633



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงเอ็กซิตอนที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้



รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมการเรืองแสงของเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวหลวมๆ ของ GaP:S

2.6.2. การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับด้วยกับดักไอโซอิเล็กทรอนิก (isoelectronic trap)

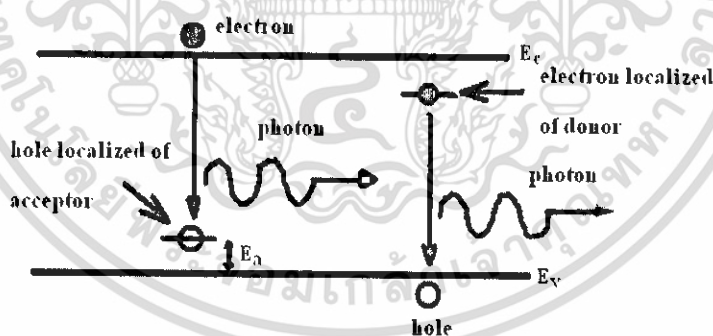
พิจารณาตัวอย่างการเติมอะตอมไนโตรเจน N เข้าสู่ GaP ในกรณีนี้อะตอม N จะเข้าไปแทนที่อะตอม P แต่เนื่องจากทั้งอะตอม N และอะตอม P เป็นธาตุในหมู่ 5 เหมือนกัน เพราะฉะนั้นสภาพไฟฟ้าจึงเป็นกลางเหมือนเดิม กล่าวคืออะตอม N ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้หรืออะตอมผู้รับแต่อย่างใดแต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอะตอม N มีคุณสมบัติในการดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าอะตอม P (เรียกว่าอะตอม N มีค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีสูง) ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนในผลึกวิ่งวนมาใกล้อะตอม N ก็จะทำให้อะตอม N จับอิเล็กตรอนไว้ได้ดี ในสภาพเช่นนี้กล่าวได้ว่าอะตอม N นั้นกำลังสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์กับดักชนิดนี้มีสภาพประจุไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีแรงดึงดูด โสไลต์ซึ่งมีประจุบวกให้เข้ามาใกล้ได้ดี จึงส่งผลให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนขึ้นมาอิเล็กตรอนและโฮลในเอ็กซิตอนชนิดนี้สามารถรวมตัวกันได้ง่าย จึงทำให้ประสิทธิภาพของการเรืองแสงมีค่าสูงมาก ตัวอย่างในกรณีผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP ซึ่งปกติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีแถบพลังงานช่องว่างแบบไม่ตรง จึงมีประสิทธิภาพของการเรืองแสงไม่ดีนักแต่ถ้าเติม อะตอม N เข้าไปในผลึก GaP นี้จะสามารถสร้างกับดักไอโซอิเล็กทริกขึ้นในผลึกได้และ เกิดเอ็กซิตอนและทำให้การรวมตัวของพาหะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมา เปรียบเสมือนว่า ผลึก GaP กลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีแถบพลังงานช่องว่างแบบตรง จึงได้มีการพัฒนา GaP ไปประดิษฐ์เป็นไดโอดเปล่งแสงอย่างแพร่หลาย และสามารถเรืองแสงสีแดงที่สว่างมากๆ ได้ดี

2.7 การเรืองแสงจากคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ (DA pair) [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548; จูตินัย และคณะ, 2546; จูติกร, 2550; คุณิต, 2542]

การเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้ให้และโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้รับโดยทั่วไปมีประสิทธิภาพดีมาก รูปที่ 2.16 แสดงกลไก การรวมตัวของพาหะชนิดนี้ ตัวอย่างได้แก่การเจือ GaP ด้วย S ที่เป็นอะตอมผู้ให้และ C ที่เป็นอะตอมผู้รับพร้อมๆกัน



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ

คุณสมบัติของการเรืองแสงชนิดนี้มีลักษณะเด่นหลายข้อซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

- ความน่าจะเป็นของการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล $W(r)$ ขึ้นกับ ระยะห่าง (r) ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับถ้าระยะห่างของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับมีค่าน้อย จะมีการเรืองแสงก็จะดีดังนี้

$$W(r) = W_{\max} e^{-\frac{r}{R_d}} \quad (2.2)$$

โดย

W_{\max} คือ ค่าคงที่

R_d คือ ค่ารัศมีของวงโคจรอิเล็กตรอนรอบอะตอมผู้ให้
พลังงานโฟตอนของการเรืองแสง มีค่า

$$h\nu = E_g - (E_a + E_d) + \frac{q^2}{\epsilon_r} \quad (2.3)$$

โดย

E_g คือ ช่องว่างของแถบพลังงาน

E_a, E_d คือ ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับและอะตอมผู้ให้ ตามลำดับ

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุ

-ถ้าเพิ่มความเข้มของแสงที่ใช้กระตุ้นจะทำให้สเปกตรัมของการเรืองแสง เคลื่อนตัวไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากขึ้น

-หลังจากตัดแสงที่ใช้กระตุ้นออก และเมื่อเวลาผ่านไปสเปกตรัมของการเรืองแสงจะเคลื่อนตัวไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยลง

2.8 การตรวจสอบวัสดุด้วยโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence: PL) [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548; จูตินัย และคณะ, 2546; จูติกร, 2550; <http://members.thai.net/nanomaterials.htm>]

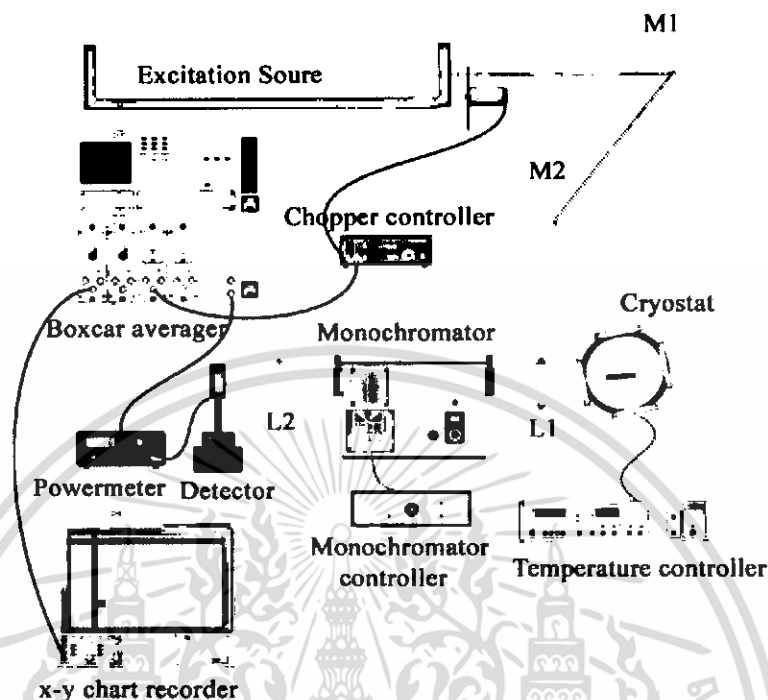
โฟโตลูมิเนสเซนซ์ คือ การเรืองแสงของวัสดุเนื่องจากถูกกระตุ้นด้วยแสง จะใช้ศึกษา ลักษณะเฉพาะที่หลากหลายของ วัสดุ เช่น ลักษณะพื้นผิว ความบริสุทธิ์ของ โลหะผสม รวมไปถึง ความขรุขระของพื้นผิว

การทดสอบวัสดุด้วยโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เป็นการตรวจสอบที่ไม่ทำให้เกิดความเสียหายกับ สารตัวอย่างนอกจากนี้เวลาในการทำการทดสอบด้วยวิธีนี้ค่อนข้างน้อยจึงสามารถใช้ทดสอบ กระบวนการที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในวัสดุได้ การสั้นของความเข้มของสัญญาณ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ จะเกิดขึ้นได้หากให้สนามไฟฟ้าให้ที่ผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ยังพบว่าความร้อนมีผลต่อความเข้ม ของสัญญาณ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ ด้วย

ข้อเสียของการตรวจสอบวัสดุด้วยโฟโตลูมิเนสเซนซ์ จะเกิดขึ้นเนื่องจากจะศึกษารังสีที่ถูก ปลดปล่อยของวัสดุ ดังนั้นหากใช้ทดสอบวัสดุที่มีค่าประสิทธิภาพการเรืองแสง (radiative efficiency) ต่ำ จะเป็นการยากที่จะศึกษาด้วยเทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนซ์ และการทดลองต้องจัดด้วยมือหรือต้อง ควบคุมสภาพแวดล้อมเป็นอย่างดี เนื่องจากชิ้นงานจะต้องถูกกระตุ้นด้วยแสงซึ่งจะเกิดอย่างรวดเร็ว

2.9 หลักการติดตั้งโฟโตลูมิเนสเซนซ์ [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548; จูตินัย และคณะ, 2546; จูติกร , 2550; <http://members.thai.net/nanomaterials/page1/nanomaterials.htm>]

พื้นฐานการติดตั้งอุปกรณ์วัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์อาจเป็นเลเซอร์ หรือ หลอดไฟโดยที่อาจจะ เป็นสเปกตรัมต่อเนื่องหรือพัลส์ก็ได้ ก่อนที่จะใช้โฟตอนเหล่านี้ไปกระตุ้นสารตัวอย่าง ต้องใช้ ฟิลเตอร์กรองแสงเพื่อเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการก่อน ปกติชิ้นสารตัวอย่าง มักจะเก็บในที่ที่มี อุณหภูมิต่ำ ๆ ขณะทำการวัดเพื่อลดปัญหาการเกิดโฟนอน



รูปที่ 2.17 การติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์พื้นฐาน

2.9.1 หลักการทำงานของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

เมื่อแสงที่มีพลังงานเพียงพอตกกระทบวัสดุ โฟตอนจะถูกดูดกลืนและอิเล็กตรอนจะกระโดดไปอยู่ในสถานะกระตุ้น ในที่สุดการกระตุ้นเหล่านี้จะหยุดลงและอิเล็กตรอนจะกลับสู่สถานะพื้น และจะปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง เรียกว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ เนื่องจากสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ นี้จะขึ้นอยู่กับพลังงานของการทรานซิชัน ดังนั้นเราจึงสามารถคำนวณหาระดับพลังงานได้จากสเปกตรัมของโฟโตลูมิเนสเซนซ์

นอกจากนี้ความแตกต่างของความเข้มของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ซึ่งเกิดจากปัจจัยภายนอกที่สามารถควบคุมได้ เช่น อุณหภูมิ และความต่างศักย์ที่ใช้กระตุ้น จะถูกใช้เพื่อศึกษาลักษณะของแถบพลังงาน

สัญญาณโฟโตลูมิเนสเซนซ์ มักจะขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้น ซึ่งสามารถควบคุมได้โดยการควบคุมความเข้มของแสงที่ใช้ยังเข้าสู่ชิ้นงาน หากชนิดหรือคุณภาพของวัสดุที่ต้องการศึกษาเปลี่ยนไป จะทำให้สัญญาณของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เปลี่ยนตำแหน่งไปด้วย

เนื่องจากโฟโตลูมิเนสเซนซ์ มักจะเกิดบริเวณใกล้พื้นผิวของวัสดุ ดังนั้นการวิเคราะห์ด้วย โฟโตลูมิเนสเซนซ์ จึงเป็นเครื่องมือที่สำคัญที่ใช้ในการศึกษาพื้นผิว

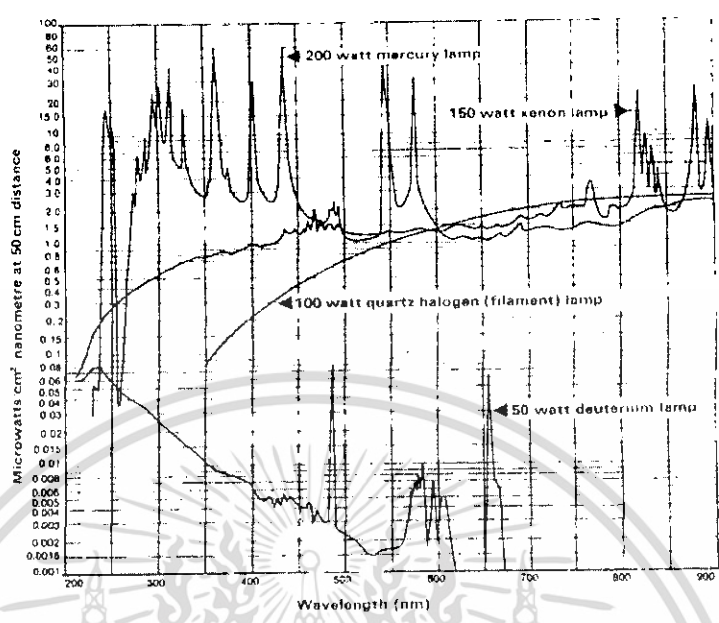
แสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นตัวอย่างจะถูกแยกสเปกตรัมโดยโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ก่อนที่จะวัดโดยหัววัดสัญญาณแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งต่อไปยังภาคแสดง การวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

1. กำหนดค่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้ในการกระตุ้นคงที่แล้วทำการสแกนช่วงความยาวคลื่น โฟตอนที่สารตัวอย่างเปล่งออกมา โดยปกติพลังงานโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมามักจะมีพลังงานน้อยกว่าพลังงาน โฟตอนกระตุ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตกส์
2. กำหนดให้หัววัดเลือกวัดความยาวคลื่น โฟตอนคงที่ค่าหนึ่งแล้วทำการสแกนความยาวคลื่นโฟตอนที่ใช้กระตุ้น
3. กำหนดให้ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้กระตุ้นและที่ปลดปล่อยออกมาคงที่ และทำการวัดสเปกตรัมการเกิดลูมิเนสเซนซ์ เทียบกับเวลาเมื่อโฟตอนที่ใช้กระตุ้นเป็นพัลส์เดี่ยว

โดยปกติสเปกตรัมในแบบที่ 1 และ 2 ที่ทำการบันทึกจะเป็นค่าระหว่างความยาวคลื่น มีหน่วยเป็นนาโนเมตร (nm) กับความเข้มของโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมามีหน่วยเป็นหน่วยใดๆ (arbitrary unit, a.u.)

2.9.2 พลังงานกระตุ้น

การเลือกแหล่งกำเนิดโฟตอนเพื่อใช้เป็นพลังงานกระตุ้นนั้น ขึ้นกับที่เราต้องการวัดลูมิเนสเซนซ์ในรูปแบบไหน เช่น เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนอาพันธ์ มีลำแสงขนาน และเลเซอร์บางชนิดเป็นพัลส์สัญญาณค่อนข้างสั้น เหมาะกับการวัดในรูปแบบที่ 1 และ 3 การใช้เลเซอร์ทำให้มีสัญญาณรบกวนต่ำแต่มีข้อเสียคือ การปรับเลือกช่วงความยาวคลื่นทำได้ยาก การใช้หลอดไฟสุญญากาศก็จะทำให้เกิดปัญหาตรงนี้ได้เนื่องจากมีช่วงความยาวคลื่นกว้าง (broadband) จึงเหมาะกับการวัดในรูปแบบที่ 2 ซึ่งหลอดไฟมีให้เลือกใช้หลายชนิด และหลายความเข้ม ดังแสดงสเปกตรัมในรูปที่ 2.18



รูปที่ 2.18 สเปกตรัมของการแผ่รังสีของหลอดไฟแต่ละชนิด ระยะห่าง 50 ซม.

2.9.3 การควบคุมอุณหภูมิ

ชิ้นตัวอย่างส่วนมากถูกนำมาใส่ไว้ในไครโอสแตท (cryostat) เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการวัดได้ปกติการวัดทำในอุณหภูมิต่ำบางครั้งอาจต่ำถึง 1 K ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องปั๊มฮีเลียมเหลวหรือไนโตรเจนเหลวหมุนเวียนผ่านระบบอย่างต่อเนื่องเพื่อดึงพลังงานความร้อนออกไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั่วไปใช้คอมเพรสเซอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ภายนอก (ไครโอจินิก) อีกที่ภายในไครโอสแตท ชิ้นสารตัวอย่างจะถูกยึดติดกับแท่งโลหะ (cold finger) พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทผ่านโลหะแท่งนี้ นอกจากนี้ภายในไครโอสแตทยังมีสภาพเป็นสุญญากาศประมาณ 10^{-2} torr เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำบนชิ้นตัวอย่างและป้องกันความร้อนภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ระบบภายใน ตัวไครโอสแตทนี้จะมีช่อง (window) ทางเข้าและออกของโฟตอนที่ใช้กระตุ้นและปลดปล่อยออกมาจากชิ้นตัวอย่าง

ตารางที่ 2.2 สารที่ใช้ทำความเย็นภายในตัวไครโอเจนิคที่ความดัน 10^{13} mbar

	^3He	^4He	H_2	Ne	N_2	Ar
$T_{\text{boil}} \text{ (K)}$	3.2	4.2	20.4	27.1	77.3	87.3
$\rho \text{ (kg m}^{-3}\text{)}$	59	125	71	1024	804	1399
$c_p \text{ at } T_{\text{boil}} \text{ (kJ kg}^{-1} \text{K}^{-1}\text{)}$		4.4	9.3	1.8	2.0	1.1
$V_{\text{gas}}/V_{\text{liquid}}$	438	699	788	1338	644	785
$l_v \text{ (kJ kg}^{-1}\text{)}$	7	21	448	87	199	163

การเปลี่ยนพลังงานโฟตอนที่สารตัวอย่างปลดปล่อยออกมาไปเป็นสัญญาณไฟฟ้านั้นมีปัจจัยทางฟิสิกส์หลายอย่างที่มีผลต่อการวัด สมบัติที่สำคัญของหัววัด (detector) ทัวไปได้แก่

1. ความไว (sensitivity) โดยทัวไปคือค่ากระแสในหน่วยแอมแปร์ที่เกิดขึ้นเทียบกับพลังงานของโฟตอนที่ตกกระทบในหน่วยวัตต์ บางครั้งเรียกว่า ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม
2. ช่วงความยาวคลื่นที่วัดได้
3. ค่าอัตราส่วนสัญญาณที่วัดต่อสัญญาณรบกวน (signal to noise ratio) ปกติเกิดจากโฟตอนที่มาจากแหล่งกระตุ้น
4. การตอบสนองในการเปลี่ยนพลังงานโฟตอนไปเป็นสัญญาณไฟฟ้าเมื่อโฟตอนที่ตกมากระทบมีลักษณะเป็นพัลส์
5. ความเป็นเชิงเส้นในช่วงความยาวคลื่นที่วัด

หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube) เป็นหัววัดที่มีการตอบสนองต่อโฟตอนในช่วงความยาวคลื่นกว้างมากประกอบด้วยโฟโตแคโทด (photo cathode) ไดโนด (dynode) แอโนด (anode) โดยส่วนโฟโตแคโทดจะเป็นตัวรับแสงหรือโฟตอน เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกขึ้น โดยโฟโตอิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปยังขั้วไดโนดที่หนึ่ง ซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการชน แล้วถูกเร่งต่อไปยังไดโนดที่สองและสามทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณปกติอัตราขยายกระแส (gain) จะอยู่ที่ 10^7 ถึง 10^{10} เท่า และความไวในการเปลี่ยนพลังงานโฟตอนเป็นสัญญาณไฟฟ้าอยู่ที่ 10^{-9} วัตต์ สัญญาณทั้งหมดที่ได้ จะถูกส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผลซึ่งโดยมากมักจะเป็นคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์และแสดงผลออกมา

2.10 การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง (photoionization) [ณัฐวัฒน์ และคณะ, 2548; ฐิตินัย และคณะ, 2546; ฐิตินกร, 2550; ดุสิต, 2542]

เป็นกระบวนการทางกายภาพที่จะเกิดจากโฟตอนเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมไฮออน หรือ โมเลกุล ผลที่ได้คือ การหลุดออกมาของอิเล็กตรอนหนึ่งตัวซึ่งการหลุดออกมาของอิเล็กตรอน เป็นที่รู้จักกันในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน และมีพลังงานจลน์เท่ากับค่าของพลังงานโฟตอน ลบด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอนจะเกิดการกระตุ้นแต่ไม่เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่เข้าชนกับของ อะตอมหรือไอออน ตัวอย่างเช่น การทำให้อะตอมของไฮโดรเจนอะตอมแตกตัวเป็นไอออน โฟตอนต้องมีพลังงานมากกว่า 13.6 eV ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่น 91 นาโนเมตรสำหรับ โฟตอนที่มีพลังงานมากกว่านี้พลังงานของการปล่อยโฟโตอิเล็กตรอนสามารถหาได้ดังสมการที่ (2.4)

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - 13.6eV \quad (2.4)$$

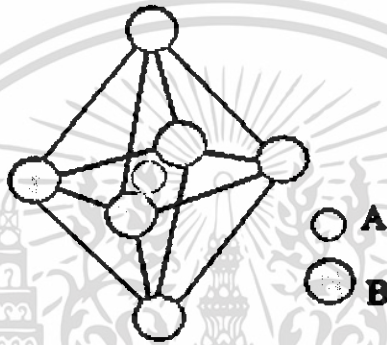
โดย h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ = 6.625×10^{-34} J.s

ν คือ เป็นค่าความถี่ของพลังงานโฟตอน

ไม่ใช่ทุกโฟตอนที่เคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือไอออนแล้วจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง นั้นเกี่ยวข้องกับ ภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสงที่ขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของโฟตอนและ ไอออนหรืออะตอมที่เราสนใจ สำหรับพลังงานโฟตอนที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นไอออนจะได้ว่าภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนมีค่าเป็นศูนย์ ถ้ามีค่ามากกว่าพลังงานกระตุ้น ภาคตัดขวางจะลดแบบผกผันกับค่าพลังงาน โฟตอนยกกำลังสาม

2.11 แผนภาพระยะทางสัมพัทธ์ของตำแหน่งอะตอมในผลึก (configurational coordinate diagram) [ฐิตินัย และคณะ, 2546; ฐิติกร, 2550; Garcia,2005; [http://www. TETA &OTA\Molecular diagrams.html](http://www.TETA&OTA\Molecular diagrams.html)]

พิจารณาอะตอม A ซึ่งถูกล้อมรอบด้วยอะตอม B จำนวน 6 อะตอม ในพันธะแบบอ็อกตะฮีดรอล (octahedral) ดังแสดงในรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 แสดงพันธะอ็อกตะฮีดรอล AB_6

อะตอม A จะประพฤติตัวเป็นศูนย์กลางของการเปล่งแสง (optically active centers) ส่วนอะตอม B จะเป็นอะตอมลิแกนด์ (ligand atom) อะตอม A จะถูกเจือลงใน โครงผลึกสถิต (static lattice) ของอะตอมเจ้าของบ้าน (host lattice) ซึ่งหมายความว่าอะตอม A และ B ถูกตรึงอยู่ในโครงผลึกที่มีระยะห่างกันค่าหนึ่ง แต่ในความเป็นจริง โครงผลึกสั่นไหวได้ ดังนั้นอะตอม A จึงเป็นการสั่นไหวตามโครงผลึกไปด้วย ซึ่งก็หมายความว่า การสั่นไหวของอะตอม B ทั้งหมดจะส่งผลต่อสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic state) ของอะตอม A และเมื่อสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอน (electronic state) ของอะตอม A เปลี่ยนแปลงไป อะตอมลิแกนด์ B ก็จะมีผลต่อโดยที่ระยะสมมูลระหว่างอะตอม A และ B เป็นค่าใหม่ ซึ่งสถานะสุดท้ายจะมีค่าแตกต่างไปจากสถานะเริ่มต้น จากการประมาณ โดยทฤษฎีของ บอร์น และออปเพินไฮเมอร์ (Born and Oppenheimer) จะถือว่าการเคลื่อนที่ของอะตอมช้ากว่าการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในอะตอม ดังนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เสมือนนิวเคลียสของอะตอมหยุดนิ่ง ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาการเคลื่อนที่ของนิวเคลียสและอิเล็กตรอนวาเลนซ์ว่าเป็นอิสระต่อกันได้ นั่นคือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในอะตอม A สามารถแสดงอยู่ในรูปฟังก์ชันของระยะห่างระหว่าง

อะตอม A และ B ดังนั้นฟังก์ชันเฉพาะ (eigen function) ของอิล็กตรอนวาเลนซ์ในอะตอม A จะแสดงได้ดังนี้คือ

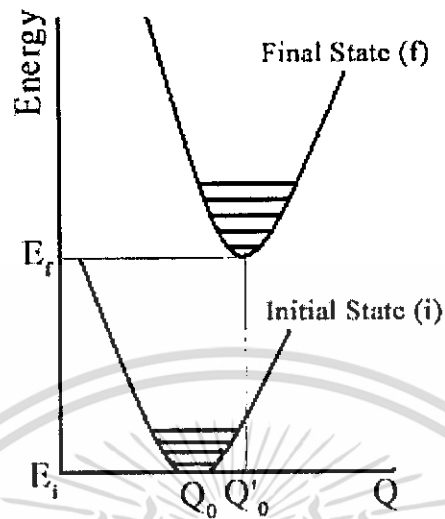
$$\Psi = f(\vec{r}_i, \vec{R}_i) \cdot \chi(\vec{R}_i) \quad (2.5)$$

เมื่อ $f(\vec{r}_i, \vec{R}_i)$ คือ ฟังก์ชันคลื่นของอิล็กตรอนวาเลนซ์ในกรณีโครงผลึกไม่สั่นไหว ส่วน $\chi(\vec{R}_i)$ เป็นฟังก์ชันคลื่นของการสั่นของโครงผลึก (vibrational wavefunction) และ \vec{R}_i คือ เวกเตอร์แสดงตำแหน่งของอะตอม A ในโครงผลึก

เพื่อให้เข้าใจได้ง่ายขึ้นจะพิจารณารณที่อะตอม B สั่นเข้าหาและสั่นออกจากอะตอมใน 1 มิติ ดังนั้นระยะทางสัมพัทธ์ของอะตอม B เทียบกับอะตอม A คือระยะทาง Q (configurational coordinate : Q) ซึ่งจะสัมพันธ์กับระยะทาง A-B จากสมการที่ 1 ฟังก์ชันเฉพาะ Ψ สามารถเขียนได้ใหม่เป็น

$$\Psi = f(\vec{r}_i, Q) \cdot \chi(Q) \quad (2.6)$$

ผลเฉลยของสมการชโรดิงเจอร์ใน 1 มิติ จะแสดงอยู่ในรูปของเส้นกราฟของพลังงานศักย์ที่สถานะพื้น i และที่สถานะกระตุ้น f ดังรูปที่ 2.20 ซึ่งแผนภาพในรูปที่ 2.20 นี้เรียกว่าแผนภาพแสดงระยะทางสัมพัทธ์ของตำแหน่งอะตอมในผลึก เส้นโค้งที่บในรูปที่ 2.20 แสดงพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาของไอออนในผลึก (interionic interaction potential energy) ในขณะที่เส้นตรงที่ลากขนานกันในแนวนอนแสดงระดับของพลังงานโฟนอน ส่วนตำแหน่งสมดุลของการสั่นของโครงผลึกที่สถานะพื้น และที่สถานะกระตุ้นอยู่ที่ Q_0 และ Q'_0 ตามลำดับ ส่วนเส้นประที่เป็นกราฟพาราโบลาจะแสดงการประมาณว่าโครงผลึกสั่นแบบออสซิลเลเตอร์ฮาร์โมนิกส์ อะตอม B จะสั่นเข้า-ออกเมื่อเทียบกับจุดสมดุล



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพระยะทางสัมพัทธ์ของตำแหน่งของกลุ่มอะตอม AB_0 ที่สั่นในลักษณะเข้า - ออกจากกัน

พลังงานศักย์ของอันตรกิริยาของไอออนในผลึกที่สถานะพื้น $E_i(Q)$ และที่สถานะกระตุ้น $E_f(Q)$ จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$E_i(Q) = E_i + \frac{1}{2} M \Omega_i^2 (Q - Q_0)^2 \quad (2.7)$$

$$E_f(Q) = E_f + \frac{1}{2} M \Omega_f^2 (Q - Q'_0)^2 \quad (2.8)$$

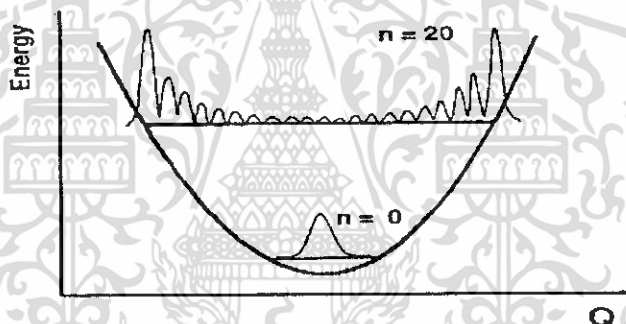
เมื่อ M คือมวลยังผลของอะตอม A และ B ส่วน Ω_i และ Ω_f เป็นความถี่ของการสั่นของสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น ซึ่งความถี่ทั้งสองค่านี้อาจมีค่าต่างกันเล็กน้อยในแนวแกนของรูปที่ 2.20 จะสอดคล้องกับระดับพลังงานของโฟนอนของออสซิลเลเตอร์แบบฮาร์โมนิกที่ความถี่ Ω ระดับพลังงานของโฟนอนจะแสดงได้ดังนี้คือ

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) \hbar \Omega \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ $n = 0, 1, 2, \dots$ แต่ละสถานะของการสั่นของโครงผลึกจะแสดงด้วยฟังก์ชันออสซิลเลเตอร์ฮาร์โมนิก $\chi_n(Q)$ ส่วนโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่งที่ตำแหน่ง Q ในสถานะ n ของคลื่นจะแสดงได้โดยฟังก์ชัน $|\chi_n(Q)|^2$ รูปที่ 2.21 แสดงรูปร่างของฟังก์ชัน $|\chi_n(Q)|^2$ ที่สถานะของการสั่น $n = 0$ และ $n = 20$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่สถานะต่ำสุด ($n = 0$) แอมพลิจูดของโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่งจะอยู่ที่ตำแหน่งสมมูล Q_0 ในขณะที่สถานะการสั่น $n = 20$ แอมพลิจูดของโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนมากที่สุดจะอยู่ที่ตำแหน่ง Q ซึ่งตำแหน่ง Q นี้จะอยู่ที่บริเวณเส้นแกนนอนตัดกับเส้นกราฟพาราโบลา

จะเห็นได้ว่าค่ามากที่สุดของโอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนตัวใดตัวหนึ่งที่สถานะ n ที่ต่างกัน จะอยู่ในตำแหน่ง Q ที่ต่างกัน ดังนั้นสถานะ n ที่ต่างกันจะเป็นตัวกำหนดรูปร่างของสเปกตรัมของการกระตุ้นและสเปกตรัมของการเรืองแสง



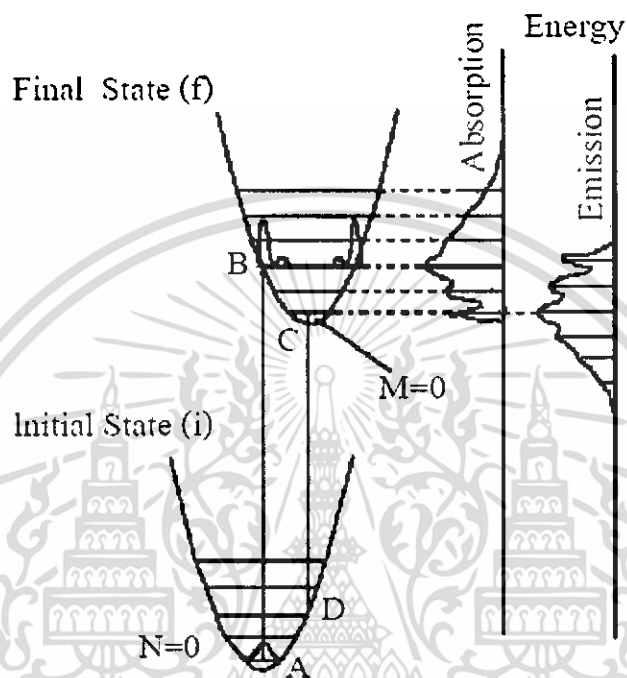
รูปที่ 2.21 แสดงรูปร่างของแอมพลิจูดของฟังก์ชัน $|\chi_0(Q)|^2$ และ $|\chi_{20}(Q)|^2$ ของออสซิลเลเตอร์ฮาร์โมนิกส์

2.12 พารามิเตอร์ของคัปปลิง ฮวง-ริส (HUANG- RHYS Coupling) [จูตินัย และคณะ, 2546; จูติกร, 2550; Garcia, 2005]

ในหัวข้อนี้พิจารณาถึงรูปร่างของแถบดูดกลืนแสงและแถบเรืองแสงซึ่งเป็นผลมาจากการคัปปลิงระหว่างอะตอมที่เป็นศูนย์กลางการเรืองแสง (luminescent center) กับโครงผลึกเพื่อให้เข้าใจง่ายจะพิจารณาที่สถานะของพลังงานเริ่มต้น i (i -state) และสถานะทางพลังงานตอนปลาย f (f -state) ต่างก็สั่นแบบ ออสซิลเลเตอร์ฮาร์โมนิก ด้วยความถี่ Ω เท่ากัน โดยมีจุดสมมูลอยู่ที่ Q_0 และ Q'_0 จากหลักการของ แฟรงค์ คอนดอน (Frank Condon principle) กล่าวว่าการย้ายสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอนจากสถานะเริ่มต้น (i -state) ไปยังสถานะตอนปลาย (f -state)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเกิดขึ้นเร็วกว่าการเปลี่ยนระยะทางสัมพัทธ์ของตำแหน่งอะตอมในผลึกมาก ดังนั้น การย้ายสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอนจะแสดงได้ดังถูกสรในแนวตั้ง ของรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แสดงการเคลื่อนย้ายสถานะทางพลังงานระหว่างสถานะเริ่มต้นกับสถานะตอนปลายของอิเล็กตรอนในอะตอม เป็นศูนย์กลางการเรืองแสง

ถ้าพิจารณาที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน เมื่อมีการกระตุ้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนย้ายสถานะจากระดับ $n=0$ ไปยังระดับพลังงานที่สอดคล้องกับระดับพลังงานของโฟนอนที่ $m = 0, 1, 2, \dots$ จากสมการ (2.6) จะได้ว่าโอกาสที่จะมีการดูดกลืนพลังงานจากระดับ $n = 0$ ไปยังระดับ m ใดๆ จะแสดงได้ดังนี้คือ

$$P_{if}(n = 0 \rightarrow m) \propto |\langle f(Q) | H_{int} | i(Q) \rangle|^2 \times |\langle \chi_m(Q) | \chi_0(Q) \rangle|^2 \quad (2.10)$$

เมื่อ H_{int} คือ ฮามิลโทเนียนของอันตรกิริยาระหว่างแสงที่ดูดกลืนกับอิเล็กตรอนวาเลนซ์ในอะตอม A ส่วน $i(Q)$ และ $f(Q)$ คือฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่สถานะเริ่มต้นและสถานะตอน

ปลายตามลำดับ ถ้าประมาณว่าฟังก์ชันคลื่นของอิเล็กตรอนวาลเลนซ์ที่ตำแหน่ง Q ใดๆ ไม่ต่างไปจากฟังก์ชันคลื่นที่ตำแหน่ง Q_0 ดังนั้น จะสามารถเขียนใหม่ได้ว่า

$$P_{if} (n = 0 \rightarrow m) \propto |\langle f(Q_0) | H_{int} | i(Q_0) \rangle|^2 \times |\langle \chi_m(Q) | \chi_0(Q) \rangle|^2 \quad (2.11)$$

เมื่อพจน์ $|\langle f(Q_0) | H_{int} | i(Q_0) \rangle|^2$ สอดคล้องกับสมาชิกเมทริกซ์ (matrix element) ในสถานะที่โครงผลึกยังไม่สั่นไหวหรือสถานะที่เป็นโครงผลึกที่ถูกตรึงอยู่กับที่ (rigid lattice) ส่วนพจน์ $|\langle \chi_m(Q) | \chi_0(Q) \rangle|^2$ เป็นโอกาสในการดูดกลืนแสงเนื่องจากการซ้อนเกย (overlap) ระหว่างฟังก์ชันสั่นไหว $\chi_0(Q)$ กับ $\chi_m(Q)$

ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน โอกาสทั้งหมดของการดูดกลืนแสง P_{if} จะเกี่ยวข้องกัผลรวมของโอกาสการดูดกลืนแสงจากสถานะพื้น $n = 0$ ไปยังสถานะกระตุ้น m ใดๆ ($m = 0, 1, 2, \dots$) ดังนั้นจะเขียนใหม่ได้ว่า

$$P_{if} \propto \sum_m |\langle f(Q_0) | H_{int} | i(Q_0) \rangle|^2 \times |\langle \chi_m(Q) | \chi_0(Q) \rangle|^2 = |\langle f(Q_0) | H_{int} | i(Q_0) \rangle|^2 \quad (2.12)$$

ในขณะที่ฟังก์ชัน $\chi_m(Q)$ จะประพฤติตัวเป็นเชิงเส้นตั้งฉากปกติ (orthonormal set) และ $\sum_m |\langle f(Q_0) | H_{int} | i(Q_0) \rangle|^2 \times |\langle \chi_m(Q) | \chi_0(Q) \rangle|^2 = 1$

จากรูปที่ 2.21 แสดงให้เห็นถึงรูปร่างของแถบดูดกลืนแสงและแถบเรืองแสงว่าเป็นลักษณะแถบกว้าง ครอบคลุมการเคลื่อนย้ายสถานะ $n = 0 \rightarrow m = 0, 1, 2, \dots$ (ในกรณีดูดกลืนแสง) และการย้ายสถานะ $m = 0 \rightarrow n = 0, 1, 2, \dots$ (ในกรณีเรืองแสง)

กรณีที่มีการย้ายสถานะ $n = 0 \leftrightarrow m = 0$ จะเรียกว่า เส้นโฟนอนศูนย์ (zero-phonon line) ซึ่งจะเป็นการย้ายสถานะโดยไม่มีโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้อง ค่าสูงสุดของแถบดูดกลืน จะเกิดขึ้นที่พลังงานที่มีแฟกเตอร์ซ้อนเหลื่อม (overlap factor) ค่าสูงสุด ซึ่งในที่นี้จะแสดงด้วยลูกศร AB รูปที่ 2.22 ซึ่งจะมีการเคลื่อนย้ายสถานะจากจุด A ไปยังจุด B ซึ่งที่จุด A นี้จะเป็นจุดสมมูลของสถานะพื้น ($n=0$) และเป็นตำแหน่งที่โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนในสถานะพื้นนี้มีค่าสูงสุด ส่วนจุด B ซึ่งเป็นจุดตัดกันเส้นโค้งของสถานะกระตุ้นของอิเล็กตรอนกับระดับโฟนอน ซึ่งที่จุด B นี้ โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนก็มีค่าสูงสุดด้วยเช่นกัน ในทำนองเดียวกัน ความเข้มสูงสุดของแถบเรืองแสงจะเกิดขึ้นที่ค่าพลังงานสอดคล้องกับลูกศร CD ของรูปที่ 2.22 โดยจะแสดงให้เห็นว่าตำแหน่งของพีค

ของแถบเรืองแสงจะมีพลังงานต่ำกว่าตำแหน่งของฟิสิกดุดกลืนแสง ซึ่งสอดคล้องกับหลักการเลื่อนของสโตกส์ (stoke's shift)

โดยปกติการเลื่อนของสโตกส์มักจะเขียนอยู่ในรูปของ $\Delta Q = Q'_0 - Q_0$ ถ้าการเลื่อนของสโตกส์มีค่ามากจะหมายถึง การคับปลิงของอิเล็กตรอนกับโครงผลึกที่สถานะพื้นกับที่สถานะกระตุ้นแตกต่างกันมาก ความแตกต่างของการคับปลิงนี้จะเขียนอยู่ในรูปของพารามิเตอร์ ฮวง-รีส์ ซึ่งนิยามไว้ดังนี้ คือ

$$\frac{1}{2} M \Omega^2 (\Delta Q)^2 = S \hbar \Omega \quad (2.13)$$

ดังนั้น พารามิเตอร์ ฮวง-รีส์ ก็คือการวัดค่าการเลื่อนของสโตกส์นั่นเอง จากรูปที่ 2.22 สามารถแสดงได้ว่า

$$E_a - E_c = 2 \frac{1}{2} M \Omega^2 (\Delta Q)^2 - 2 \frac{1}{2} \hbar \Omega = (2S - 1) \hbar \Omega \quad (2.14)$$

เมื่อ $E_a - E_c$ คือ พลังงานของการเลื่อนของสโตกส์ E_a คือ พลังงานของฟิสิกของแถบการดูดกลืนแสงส่วน E_c คือ พลังงานของฟิสิกของแถบเรืองแสง ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน รูปร่างขอบทั้งแถบดูดกลืนแสง (และแถบเรืองแสง) สามารถประมาณได้จากสมการ (2.10)

ถ้าทราบค่าฟังก์ชันซ้อนเกย $|\langle \chi_m(Q) | \chi_0(Q) \rangle|^2$ ที่แต่ละค่าของ m จากความรู้เรื่องฟังก์ชันคลื่นของฮอสมิตเตอร์ฮาร์โมนิก ฟังก์ชันซ้อนเกยดังกล่าวนี้ สามารถแสดงให้อยู่ในรูปของ S ได้ดังนี้ คือ

$$|\langle \chi_m(Q) | \chi_0(Q) \rangle|^2 = e^{-S} \times \frac{S^m}{m!} \quad (2.15)$$

ดังนั้น จึงสามารถที่จะทำนายความสัมพันธ์ของเส้นการดูดกลืนแสงของการย้ายสถานะ $0 \rightarrow m$ ได้ดังนี้คือ

$$I_{0 \rightarrow m} = e^{-S} \times \frac{S^m}{m!} \quad (2.16)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการ (2.12) ความเข้มของแถบการดูดกลืนแสง ซึ่งได้จากการหาพื้นที่ใต้กราฟของแถบการดูดกลืนแสงนี้ จะไม่ขึ้นกับพารามิเตอร์ S ดังนั้น แฟกเตอร์ S (ซึ่งสอดคล้องกับ $I_{o \rightarrow m}$) จะแสดงสัดส่วนของความเข้มของการดูดกลืนแสงที่เกิดจากเส้นโฟนอนศูนย์ ในขณะที่ ความเข้ม $I_{o \rightarrow 1} = e^{-s} \times S$ จะแสดงสัดส่วนของความเข้มของการดูดกลืนแสงที่สัมพันธ์กับการย้ายสถานะจาก $0 \rightarrow 1$ ในทำนองเดียวกัน ความเข้ม $I_{o \rightarrow 2} = e^{-s} \times \left(\frac{S^2}{2} \right)$ ก็จะแสดงสัดส่วนของความเข้มของการดูดกลืนแสงที่สัมพันธ์กับการย้ายสถานะจาก $0 \rightarrow 2$ ดังนั้นโดยทั่วไปแถบดูดกลืนแสงหรือแถบเรืองแสง ถ้ายังเป็นแถบกว้างก็แสดงว่า การคัปปลิงระหว่างอะตอมศูนย์กลางของการเรืองแสงกับโครงผลึกก็ยังมีค่ามาก

ที่กล่าวมาข้างต้น เป็นการพิจารณาแถบดูดกลืนแสงและแถบการเรืองแสงที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน ดังนั้นจึงมีแต่เฉพาะระดับพลังงาน โฟนอน $n = 0$ ที่เกี่ยวข้องกับการย้ายสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอน แต่ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นระดับพลังงาน โฟนอนที่ระดับสูงขึ้นไป จะมีส่วนร่วมกับการย้ายสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอนด้วย กล่าวคือในกรณีแถบดูดกลืนแสง ระดับพลังงาน โฟนอน $n = 1, 2, 3, \dots$ จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการดูดกลืนแสง และ ในทำนองเดียวกันระดับพลังงาน โฟนอน $m = 1, 2, 3, \dots$ จะมีส่วนเกี่ยวข้องกับกระบวนการเรืองแสงด้วย ดังนั้น แบนด์วิดท์ (ΔE) ของแถบดูดกลืนแสงและแถบเรืองแสงจะเพิ่มขึ้น ดังความสัมพันธ์นี้คือ

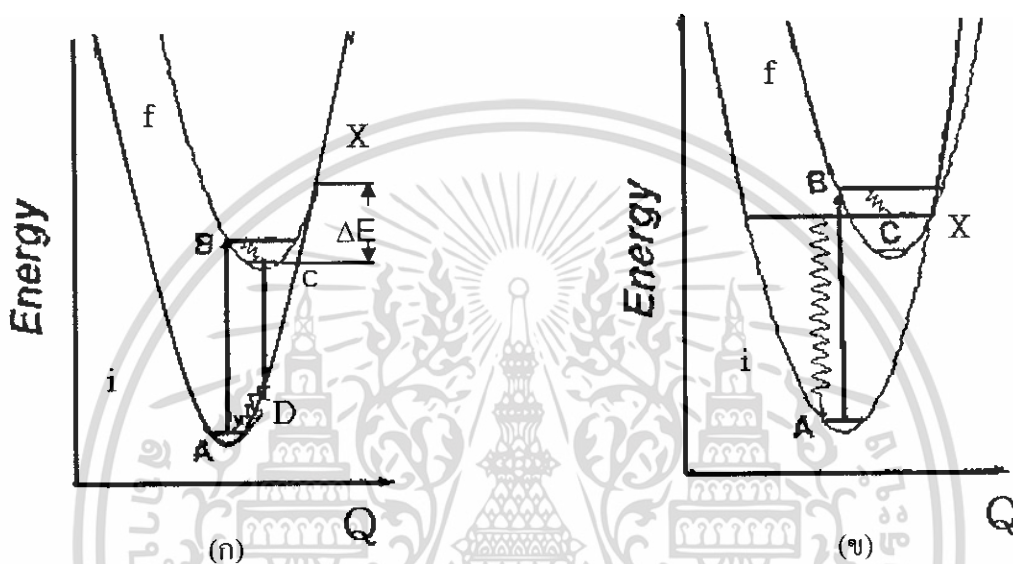
$$\Delta E(T) \approx \Delta E(0) \sqrt{\coth\left(\frac{\hbar\Omega}{2k_B T}\right)} \quad (2.17)$$

เมื่อ $\Delta E(0)$ เป็นแบนด์วิดท์ ที่อุณหภูมิศูนย์เคลวิน ส่วน $\hbar\Omega$ คือ พลังงาน โฟนอน ซึ่งในที่นี้จะถือว่าจุด Q_0 และ Q'_0 คงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิ รวมทั้งความเข้มของแถบแสง (หรือพื้นที่ใต้กราฟของแถบแสง) มีค่าคงที่ไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิด้วยเช่นกัน

2.13 การย้ายสถานะทางพลังงานโดยไม่มีการเรืองแสง [ฐิตินัย และคณะ, 2546; ฐิตกร, 2550; Garcia, 2005]

หลังจากที่มีการกระตุ้นให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะทางพลังงาน จากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้นแล้ว จากนั้นอิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้นจะย้ายสถานะทางพลังงานกลับคืนมายังสถานะพื้นเสมอ โดยการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน จึงเป็นการเรืองแสง (radiative emission) ของศูนย์กลางการเรืองแสงแต่ถ้าอิเล็กตรอนปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟนอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทวีคูณ (multiphonon emission) จะไม่มีการเกิดการเรืองแสงเกิดขึ้น (non-radiative emission) ในรูปที่ 2.23 เป็นแผนผังแสดงระยะทางสัมพันธ์ของอะตอมในผลึกที่มีการคับปลิงระหว่างอิเล็กตรอนกับโครงผลึกอย่างแรงโดยจุด X คือจุดตัดของเส้นพาราโบลาของสถานะเริ่มต้น i กับสถานะตอนปลาย f



รูปที่ 2.23 แผนผังแสดงระยะทางสัมพันธ์ระหว่างอะตอมในโครงผลึกซึ่งใช้อธิบายถึงกลไกการเกิด

ก. กระบวนการเรืองแสงและ

ข. กระบวนการไม่เรืองแสง ขณะที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะทางพลังงานสถานะตอนปลายสู่สถานะตอนต้นเส้นกราฟรูปไซน์แสดงถึงเส้นทางการย้ายสถานะทางพลังงานของอิเล็กตรอนโดยไม่มีการเรืองแสงเกิดขึ้น

จากรูปที่ 2.23 (ก) จุดสูงสุดของพีคการดูดกลืนแสงที่อุณหภูมิศูนย์เคลวินจะสอดคล้องกับเส้น AB โดยที่จุด B จะสัมพันธ์กับระดับโฟนอนที่สถานะกระตุ้นและจุด B จะอยู่ต่ำกว่าจุด X จากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะทางพลังงานจากจุด B ลงสู่จุด C โดยกระบวนการเกิดโฟนอนทวีคูณ (multiphonon process) จากนั้นจุด C จะกลายเป็นจุดเริ่มต้นของกระบวนการเรืองแสงซึ่งจะสอดคล้องกับเส้น CD และจะเกิดกระบวนการเกิดโฟนอนอีกครั้งหนึ่ง ขณะที่อิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานจากจุด D ไปยังจุดเริ่มต้นที่ A

ส่วนรูปที่ 2.23 (ข) จะสอดคล้องกับพารามิเตอร์ฮวง-รีส์ ค่ามากๆ ซึ่งจุด X จะอยู่ต่ำกว่าจุด B ดังนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะทางพลังงานที่มีระดับโฟนอนสอดคล้องกับจุด B ลงสู่สถานะทางเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานที่มีระดับโฟนอนสอดคล้องกับจุด X ซึ่งที่จุด X นี้ จะมีสถานะซ้อน (degeneracy) เกิดขึ้นเองทั้งสถานะพื้นและสถานะกระตุ้น ดังนั้นโอกาสที่อิเล็กตรอนจะย้ายสถานะลงสู่พื้นโดยผ่านระดับโฟนอนของเส้นพาราโบลา i จะมีมากกว่าผ่านระดับโฟนอนของเส้นพาราโบลา f ดังนั้นระดับโฟนอนที่จุด C จะไม่มีส่วนในการเรืองแสงเหมือนเช่นเคย จากนั้นระบบจะกลับคืนสู่สถานะพื้นโดยผ่านกระบวนการปลดปล่อยโฟนอนแบบทวีคูณผ่านทางพาราโบลา i

เมื่ออุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้นความเข้มของการเรืองแสงจะลดลง จะเรียกกระบวนการนี้ว่าการดับหายเนื่องจากความร้อน (thermal quenching) กระบวนการนี้เกิดจากอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ในที่มีระดับสูงกว่าระดับโฟนอนที่จุด A (ที่สถานะพื้น) และที่ระดับโฟนอนที่จุด B (ที่สถานะกระตุ้น) ซึ่งหมายถึงระดับโฟนอนที่จุด X จะมีอิเล็กตรอนเข้าไปอยู่ด้วย จะส่งผลให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะกลับคืนสู่สถานะพื้นโดยผ่านกระบวนการปลดปล่อยโฟนอนทวีคูณได้มากขึ้น ดังนั้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นการเรืองแสงจะลดลง เนื่องจากการปลดปล่อยโฟนอนมีบทบาทเพิ่มขึ้นนั่นเอง จากแผนภาพแสดงระยะทางสัมพัทธ์ระหว่างอะตอมในผลึก อิเล็กตรอนที่มีระดับโฟนอนที่จุด C จะถูกกระตุ้นให้ไปอยู่ที่ระดับ X ซึ่งจะต้องใช้พลังงานความร้อนเท่ากับพลังงานกระตุ้น (ΔE) ในทางปฏิบัติเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นความเข้มของการเรืองแสง (I) เป็นไปตามความสัมพันธ์

$$I = \frac{I_0}{C \exp\left(\frac{-\Delta E}{k_B T}\right) + 1} \quad (2.17)$$

- เมื่อ
- I_0 คือ ความเข้มของการเรืองแสงที่อุณหภูมิต่ำสุด (50 เคลวิน)
 - T คือ อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน
 - k_B คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ (Boltzmann's constant) = 1.38×10^{-23} J/K
 - C คือ ค่าคงที่

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเตรียมผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} เพื่อตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกและคุณสมบัติการเรืองแสงที่เกิดขึ้นตามชนิดและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะทำการตรวจสอบการเรืองแสงที่เกิดขึ้น ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+}
2. การตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 และการตรวจสอบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+}

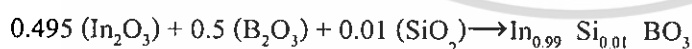
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสาร

ในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 การคำนวณปริมาณสาร

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย In_2O_3 , B_2O_3 , SiO_2 และ GeO_2 โดยในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} จะใช้สารตั้งต้นคือ In_2O_3 , B_2O_3 และ SiO_2 ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณดังสมการด้านล่าง

ในกรณี InBO_3 เจือด้วย Si^{4+} 1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด จะได้สมการดังนี้



(เลขอะตอม In = 114.820, O = 15.9994, B = 10.811, Si = 28.0855)

น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม

$$\begin{aligned} 0.495 (\text{In}_2\text{O}_3) + 0.5 (\text{B}_2\text{O}_3) + 0.01 (\text{SiO}_2) &= 0.495(277.683) + 0.5(69.6202) + 0.01(60.1843) \\ &= 137.430 + 34.8101 + 0.600843 \\ &= 172.841852 \text{ กรัม/โมล} \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการต่อไปนี้

ปริมาณของสารตั้งต้นที่เป็นองค์ประกอบ =

$$\frac{\text{มวลโมเลกุลของสารตั้งต้นใน 1 โมล} \times \text{น้ำหนักของสารทั้งหมดที่มีปริมาณสุทธิ 0.7 กรัม}}{\text{มวลโมเลกุลของสารประกอบเซรามิกส์ใน 1 โมล}}$$

ดังนั้น จะต้องใช้

$$\begin{aligned} \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{(137.4309)(0.7)}{172.8418} = 0.5566 \text{ กรัม} \\ \text{B}_2\text{O}_3 &= \frac{(34.8101)(0.7)}{172.8418} = 0.1410 \text{ กรัม} \\ \text{SiO}_2 &= \frac{(0.6008)(0.7)}{172.8418} = 0.0024 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

3.1.2 การผสมสาร

ในการผสมสารเริ่มต้น โดยการทำความสะอาดครกอาเกตด้วยน้ำยาทำความสะอาดแล้วนำครกอาเกตมาวางลงบนกระดาษขาวที่สะอาด นำสารที่ซั่งแล้วผสมในครกอาเกตแล้วบดโดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ให้สารละเอียดเป็นผง แล้วนำสารที่ทำการบดใส่ไว้ในภาชนะเก็บสารที่ได้เตรียมไว้ หลังจากนั้นทำความสะอาดครกอาเกตด้วยน้ำยาทำความสะอาดแล้วนำไปให้แห้ง โดยได้แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการผสมสารดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร

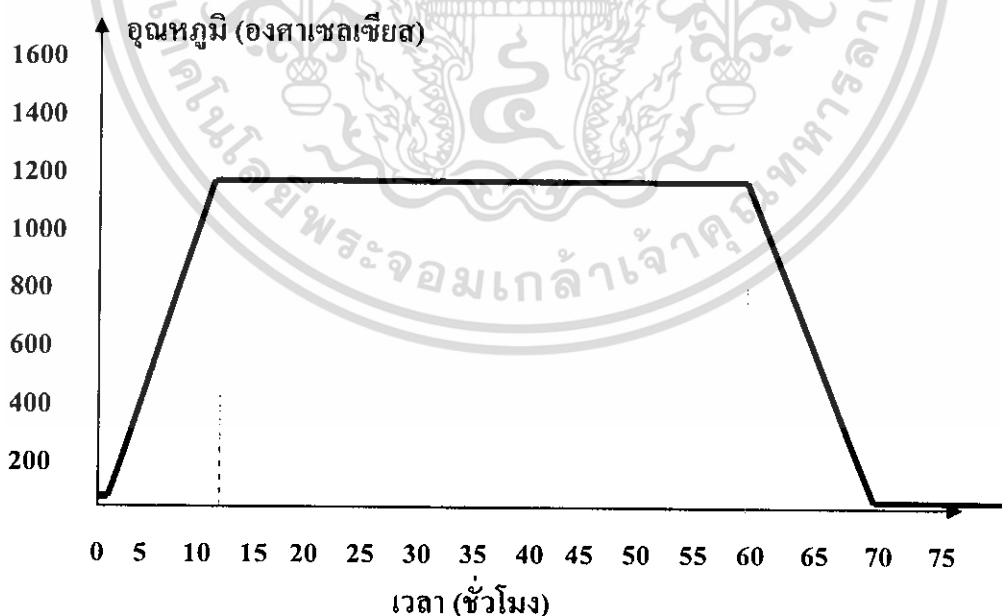
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 การอัดเม็ดสาร

ในขั้นตอนการอัดเม็ดสารเริ่มต้นจากการทำความสะอาดเครื่องอัดเม็ดด้วยแอลกอฮอล์ แล้วนำสารที่ผ่านการบดแล้วไปใส่ไว้ในเครื่องอัดเม็ดแล้วปิดให้เรียบร้อย นำไปวางบนเครื่องอัดไฮโดรลิกแล้วค่อย ๆ อัดให้แรงดันเพิ่มขึ้นจนถึง 5 ตัน ทิ้งไว้ 1 นาที แล้วหยุดการให้แรงดัน นำสารเทออกมาก็จะได้สารที่มีลักษณะเป็นเม็ด จากนั้นใช้คีมคีบสารเก็บใส่ภาชนะที่เตรียมไว้ แล้วทำความสะอาดเครื่องอัดเม็ดให้เรียบร้อย

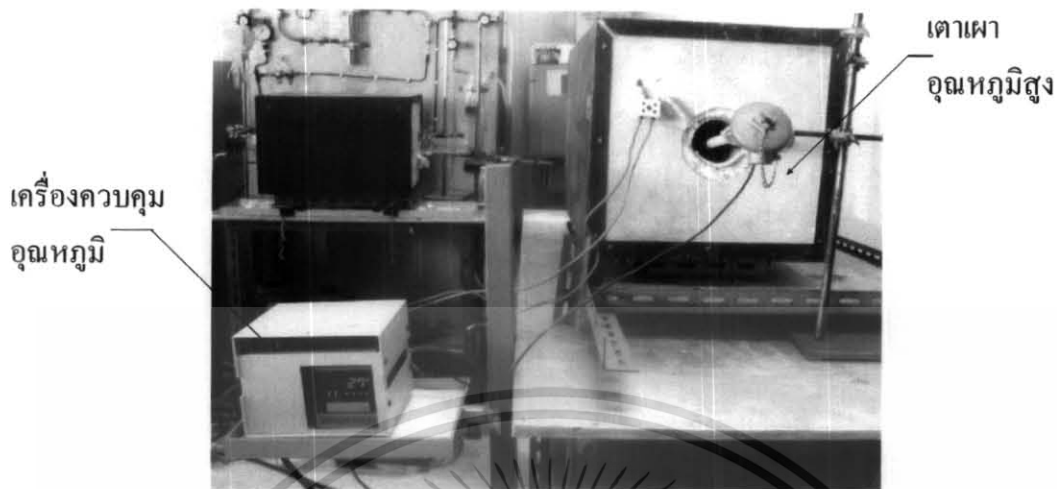
3.1.4 ขั้นตอนการเผาสาร

นำสารที่อัดเม็ดแล้วไปใส่ครุชีเบิลเพื่อที่จะนำไปเข้าเตาเผา (ครุชีเบิลที่ทนความร้อนได้สูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส) ก่อนใส่สารที่อัดเม็ดแล้วเข้าไปในเตาเผาต้องโรยผงซิลิกาที่ระหว่างแต่ละเม็ดเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารที่ใส่ในครุชีเบิล จากนั้นนำเข้าเตาเผา แล้วตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิโดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เมื่อถึงที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ให้ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 48 ชั่วโมง หลังจากนั้น ให้ลดอุณหภูมิลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิห้องแล้วปิดเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร



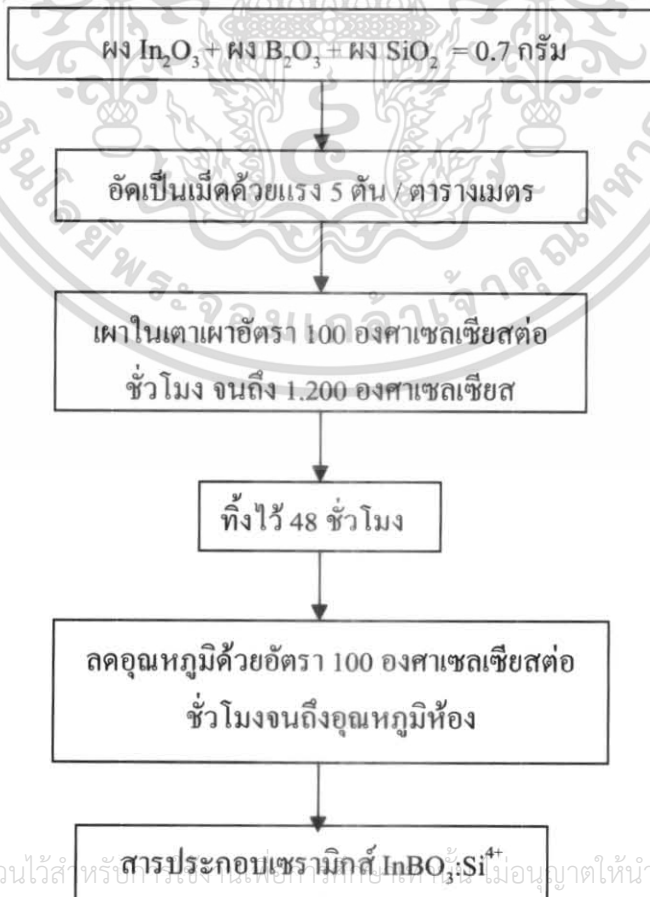
รูปที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร โดยการตั้ง โปรแกรมควบคุม อุณหภูมิเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

โดยสามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} ด้วยปริมาณ 1% ของสารประกอบทั้งหมดได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การตรวจสอบผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคของผงสารประกอบเชิงเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในโครงการพิเศษนี้ได้ใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์ มีความยาวคลื่น $\text{Cu}_{K\alpha}$ 1.5406 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของการตรวจสอบไว้ในบทที่ 4 โดยลักษณะของสารตัวอย่างที่นำไปตรวจสอบเป็นสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง โดยนำสารตัวอย่างที่เป็นผงมาบดแล้วนำมาอัดลงบนช่องสี่เหลี่ยมที่ทำมาจากอะลูมิเนียมจากนั้นนำไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์

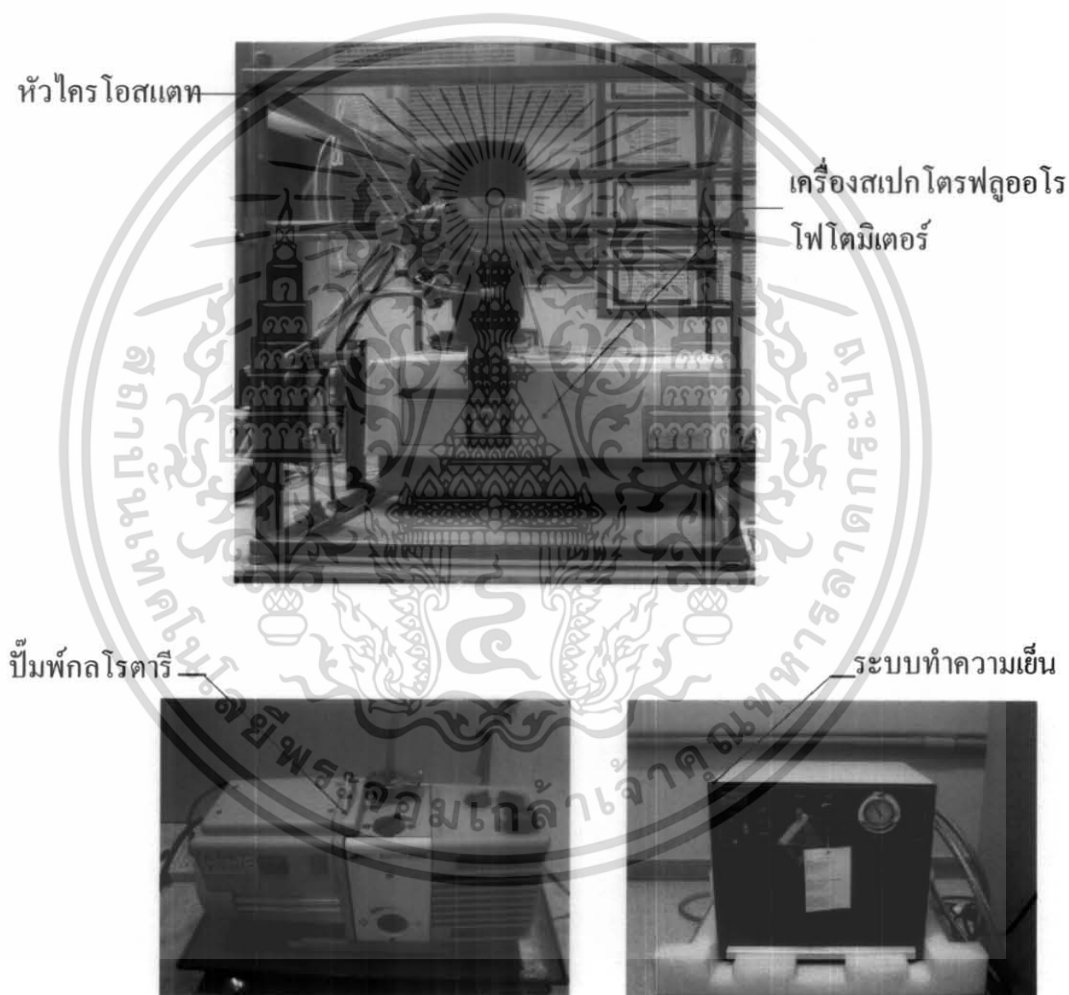


รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น Advance ซึ่งใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การตรวจสอบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์

ในการตรวจสอบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} นั้นจะทำการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ รุ่น RF-5031PC ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ รุ่น RF-5031PC พร้อมด้วยปั๊มฟลักโตรารีและระบบทำความเย็น โดยเครื่องโครโอจีนิกที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+}

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการวัดการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ มีขั้นตอนในการวัดดังต่อไปนี้

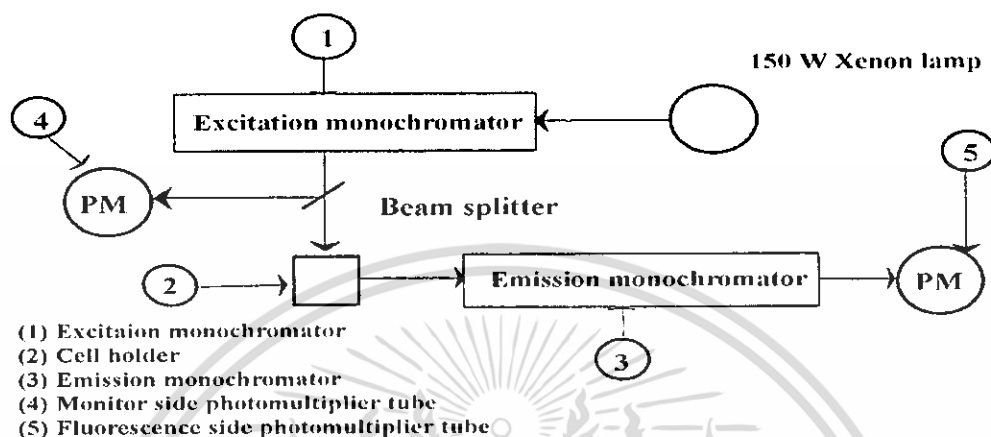
ในกรณีวัดการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง มีขั้นตอนดังนี้

- นำสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่เป็นผงบรรจุในช่องสี่เหลี่ยมที่แทนวางสารตัวอย่าง
- นำแก้วควอตซ์มาวางปิดทับที่สารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการในช่องสี่เหลี่ยมแล้วปิดสก็อตเทปสีดำ
- นำแท่นวางสารตัวอย่างเข้าเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
- เปิดเครื่อง แล้วทำการเปิดหลอดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ
- ปรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด
- ในการหาค่าพลังงานของการเรืองแสง (emission energy) ของสารตัวอย่างนั้นต้องให้ค่าพลังงานกระตุ้น (excitation energy) ที่มีค่าๆหนึ่ง โดยในการวัดจะทำการปรับสลิตเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจากหลอดซินอน และในกรณีสารตัวอย่างที่นำมาวิจัยนั้นไม่ทราบข้อมูล ให้ปรับพารามิเตอร์เป็นโหมดพลังงานกระตุ้น (excitation mode) แล้วให้มีค่าความยาวคลื่นของการเรืองแสงที่ 700 nm ขึ้นไป จากนั้นสังเกตที่สารตัวอย่างด้วยตาเปล่าว่าเห็นการเรืองแสงของสารที่ความยาวคลื่นค่าใด ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เห็นว่ามีกรเรืองแสงนั้นคือค่าการเรืองแสงของสารตัวอย่าง เมื่อทราบค่าพลังงานการเรืองแสงจะสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้น

ในกรณีวัดการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องได้แสดงแผนภาพการติดตั้งเครื่องมือไว้ในรูปที่ 3.6 โดยใช้หลอดซินอน 150 W เป็นแหล่งกำเนิดแสง แสงจากหลอดซินอนจะผ่านไปยังโมโนโครเมเตอร์ของพลังงานกระตุ้น (excitation monochromator) เพื่อเลือกค่าความยาวคลื่นในการกระตุ้น โดยแสงในค่า ความยาวคลื่นที่ต้องการจะถูกแยกไปตกลงบนผงสารประกอบเกิดการเรืองแสง และแสงที่เรืองออกมาจะผ่านไปยังโมโนโครเมเตอร์ของการเรืองแสง (emission monochromator) เมื่อเลือกค่าความยาวคลื่นในการเรืองแสง และแสงนี้จะเข้าสู่

ภาครับแสง (photomultiplier) ของเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ เพื่อประมวลผลและแสดงผลออกทางจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการติดตั้งเครื่องมือในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

โดยมีขั้นตอนในการเตรียมสารประกอบตัวอย่างดังต่อไปนี้

- นำสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่มีลักษณะเป็นผงบรรจุ ในแท่นวางสารตัวอย่างที่ช่องสี่เหลี่ยม
- นำแก้วควอตซ์วางประกบที่สารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่อยู่ในช่องสี่เหลี่ยมแล้วปิดด้วยสก็อตเทปสีดำ
- นำแท่นวางสารตัวอย่างเข้าหาวโคร โอสเตท ซึ่งอยู่ในระบบสุญญากาศ
- ทำให้เป็นสุญญากาศโดยสูบอากาศด้วยปั๊มฟัลด์ โรตารี เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงจนกว่าความดันมีค่า 10^{-2} ทอร์ เพื่อไม่ให้เกิดความชื้นกับสารที่นำมาทำการวิจัย
- เปิดเครื่องโคร โอสตินิคเพื่อให้ความเย็นในบริเวณห้วโคร โอสเตทแล้วสังเกตอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากเครื่องวัดอุณหภูมิ
- ในการวิจัยเราจะเริ่มที่อุณหภูมิต่ำสุดที่ 50K แล้วทำการวัดทุกๆ 10K จนถึงที่ 250K ปรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด
- ในการหาค่าพลังงานของการเรืองแสงของสารตัวอย่างนั้นต้องให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่มีค่าๆหนึ่ง และปรับสลิตนั้นเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจากหลอดไอปรอทและในกรณี สารตัวอย่างที่นำมาวิจัยนั้นไม่ทราบข้อมูล ให้ปรับพารามิเตอร์เป็นโหมดพลังงานกระตุ้น แล้วให้ความยาวคลื่นของการเรืองแสงมีค่า 700 nm ขึ้นไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นเริ่มทำการวิจัยโดยในระหว่างการวิจัยสังเกตที่สารตัวอย่างด้วยตาเปล่าว่าเห็น การเรืองแสงของสารที่ความยาวคลื่นค่าใด ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เห็นว่ามี การเรืองแสงนั้นคือค่าพลังงานการเรืองแสงของสารตัวอย่าง เมื่อทราบค่าพลังงานการเรืองแสง จะสามารถหาค่าพลังงานกระตุ้นได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิเคราะห์ผล

โครงการพิเศษนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงสารประกอบเซรามิกส์ และตรวจสอบคุณสมบัติการเรืองแสงของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} และ Ge^{4+} ในปริมาณการเจือที่แตกต่างกันคือ 1%, 5%, 10%, 20% และ 30% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด ซึ่งได้แสดงตัวอย่างของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} 1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด ที่มีลักษณะเป็นเม็ดดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างของสารประกอบ InBO_3 ที่เจือ Si^{4+} 1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด ที่มีลักษณะเป็นเม็ด

ก. ก่อนเผา

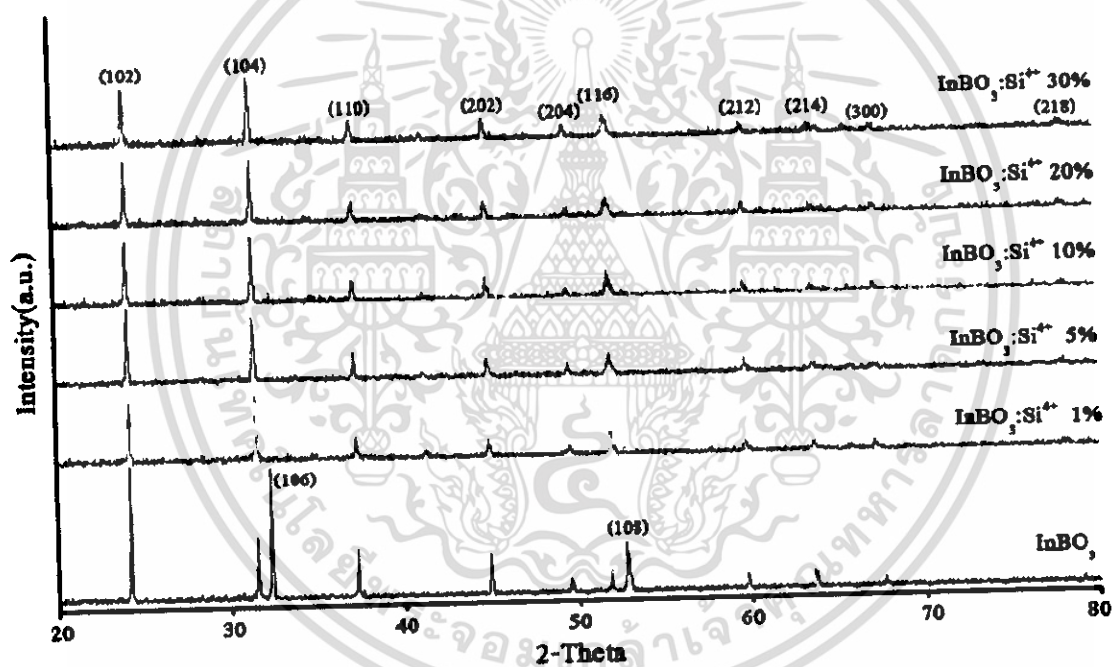
ข. หลังเผา

เมื่อนำสารตั้งต้นที่ประกอบด้วย In_2O_3 , B_2O_3 และ SiO_2 มาผสมโดยการบดให้เข้ากันแล้วไปทำการอัดเม็ด ได้ดังรูปที่ 4.1 (ก) ลักษณะเม็ดเป็นสี่เหลี่ยม มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 11.2 มิลลิเมตร ไปทำการเผาในเตาเผาสารที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ลักษณะเม็ดเป็นสีขาว ดังรูป 4.1 (ข) โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 10.5 มิลลิเมตร

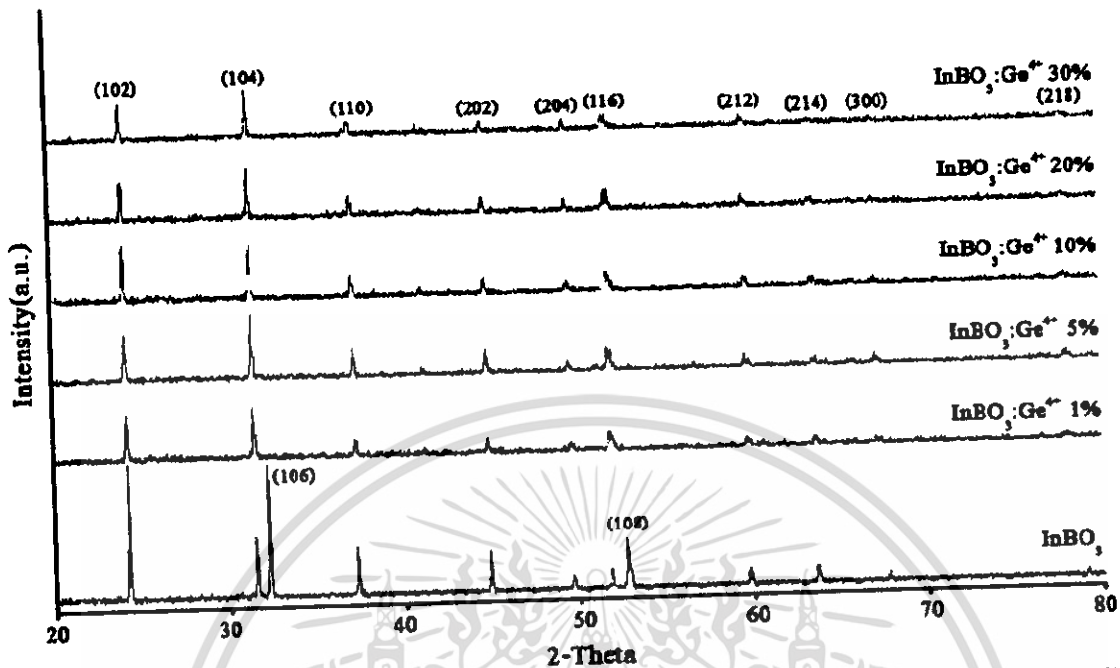
ในการศึกษาได้นำผงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} และ Ge^{4+} ที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ ทำการศึกษาคุณสมบัติการเรืองแสง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของผงสารประกอบเซรามิก InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการทราบถึงลักษณะ โครงสร้างผลึกของผงสารประกอบเซรามิก InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยปริมาณ 1%, 5%, 10%, 20% และ 30% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด ดังนั้นจึงได้นำผงสารประกอบเซรามิก InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ที่เตรียมได้ไปศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาลักษณะ โครงสร้างผลึกว่ามี การเปลี่ยนแปลงอย่างไรบ้าง เมื่อเพิ่มปริมาณการเจือ โดยจะพิจารณาค่าตำแหน่งของพีคที่ปรากฏแล้ว นำไปเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐานเพื่อพิจารณาลักษณะ โครงสร้างผลึกของ InBO_3 ซึ่งได้ผลดังรูปที่ 4.2 และ 4.3



รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิก $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$



รูปที่ 4.3 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$

ในรูป 4.2 และ 4.3 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์คิฟแฟรกโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีค่าความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอมที่มุม $2\theta = 20-80$ องศา ของผงสารประกอบ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} และ Ge^{4+}

จากรูปที่ 4.2 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} ซึ่งปรากฏระนาบ (102) ที่ตำแหน่งพิคมีมุม 2θ ประมาณ 24.232 องศา และที่ระนาบ (104) ที่ตำแหน่งพิคมีมุม 2θ ประมาณ 31.523 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุด และจะปรากฏระนาบอื่นๆคือ (110), (202), (204), (212), (214), (300), (218) ที่มุม 34.265, 44.927, 49.584, 59.726, 63.590, 67.918, และ 78.153 องศา ตามลำดับและจะไม่พบ (106) กับ (108) เมื่อมีการเจือ Si^{4+} เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพิคที่ได้กับไฟล์มาตรฐานดังแสดงไว้ในภาคผนวก (ก) จะพบว่าสารประกอบเซรามิกส์ที่ได้เป็นของ InBO_3 ที่มีลักษณะ โครงสร้างของผลึกเป็นแบบเอ็กซ์โกนอล

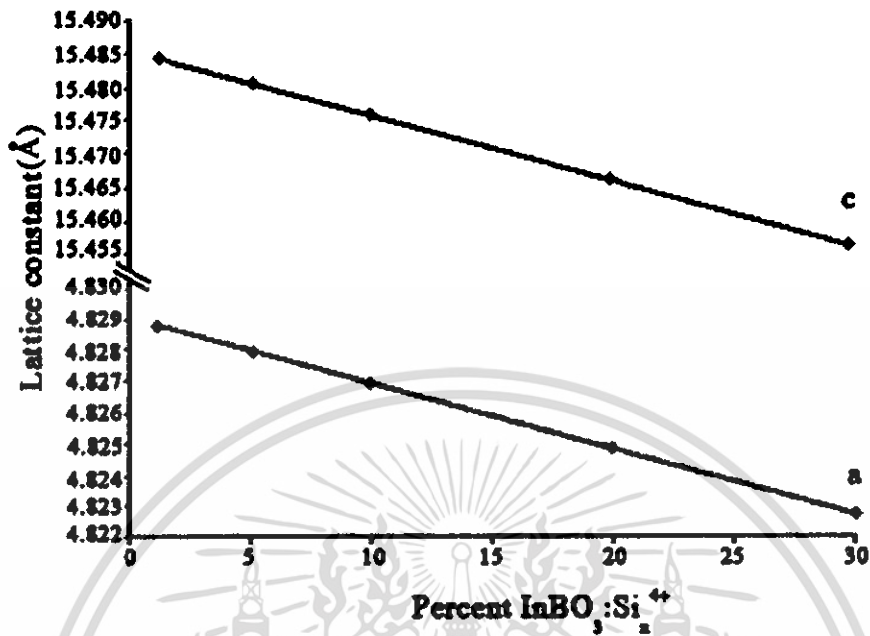
จากรูปที่ 4.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ge^{4+} ซึ่งปรากฏระนาบ (102) ที่ตำแหน่งพิคมีมุม 2θ ประมาณ 24.232 องศา และที่ระนาบ (104) ที่ตำแหน่งพิคมีมุม 2θ ประมาณ 31.523 องศา ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุด และจะปรากฏระนาบอื่นๆคือ (110), (202), (204), (212), (214), (300), (218) ที่มุม 34.265, 44.927, 49.584, 59.726, 63.590, 67.918, และ 78.153 องศา ตามลำดับและจะไม่พบ (106) กับ (108)

เมื่อมีการเจือ Ge^{4+} เมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพิกที่ได้กับไฟล์มาตรฐานดังแสดงไว้ในภาคผนวก (ก) จะพบว่า สารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 มีลักษณะโครงสร้างของผลึกเป็นแบบเอ็กซะโกนอล

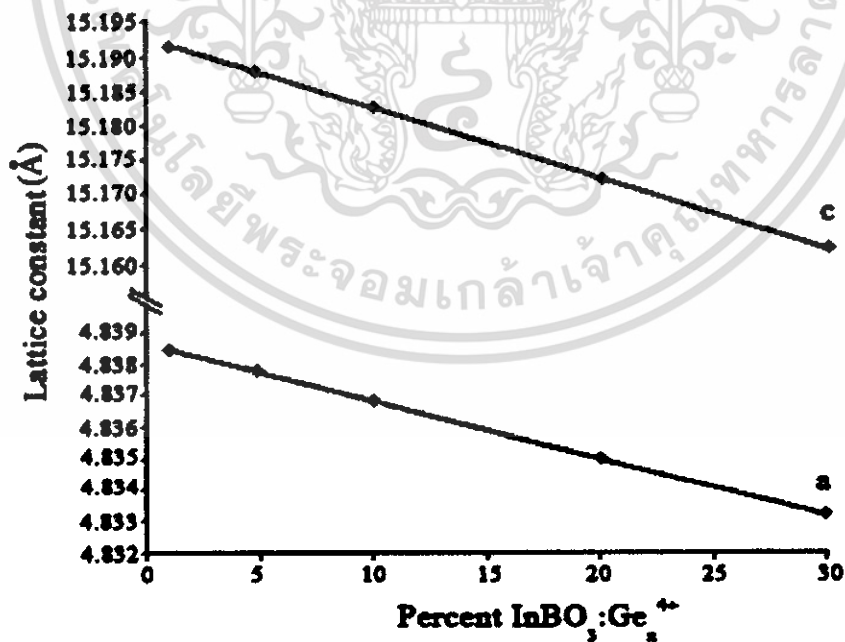
ได้นำค่าระนาบที่การเลี้ยวเบนออกมาที่มุม 20 องศา ตามผลการทดลองของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ไปคำนวณหาค่าคงที่ของโครงสร้างผลึก (a, c) โดยใช้โปรแกรม Cene ซึ่งได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4

จากรูปที่ 4.4 ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a มีค่าอยู่ในช่วง 4.8284 ถึง 4.8228 Å โดยค่า a จะมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ในการเจือ Si^{4+} เพิ่มขึ้น โดยที่ 1% มีค่า $a = 4.8284$ Å และที่ 30% มีค่า $a = 4.8228$ Å และค่าคงที่โครงสร้างผลึก c มีค่าอยู่ในช่วง 15.4808 ถึง 15.4531 Å โดยค่า c จะมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ในการเจือ Si^{4+} เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่ 1% มีค่า $c = 15.4808$ Å และที่ 30% มีค่า $c = 15.4531$ Å ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อปริมาณการเจือ Si^{4+} เพิ่มขึ้น อะตอมของ Si^{4+} จะเข้าไปแทนที่ In^{3+} ในสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 โดยขนาดของรัศมีไอออนของ Si^{4+} มีค่า 0.41 Å ของ In^{3+} จึงทำให้ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณการเจือ Si^{4+} ที่เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 4.5 ค่าคงที่โครงสร้างผลึก a มีค่าอยู่ในช่วง 4.8394 ถึง 4.8339 Å โดยค่า a จะมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ในการเจือ Ge^{4+} เพิ่มขึ้น โดยที่ 1% มีค่า $a = 4.8394$ Å และที่ 30% มีค่า $a = 4.8339$ Å และค่าคงที่โครงสร้างผลึก c มีค่าอยู่ในช่วง 15.1892 ถึง 15.1617 Å โดยค่า c จะมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ในการเจือ Ge^{4+} เพิ่มขึ้นเช่นกัน โดยที่ 1% มีค่า $c = 15.1892$ Å และที่ 30% มีค่า $c = 15.1617$ Å ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อปริมาณการเจือ Ge^{4+} เพิ่มขึ้น อะตอมของ Ge^{4+} จะเข้าไปแทนที่ In^{3+} ในสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 โดยขนาดของรัศมีไอออนของ Ge^{4+} มีค่า 0.53 Å ของ In^{3+} จึงทำให้ค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณการเจือ Ge^{4+} ที่เพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเจือ Si⁴⁺ สารประกอบเซรามิกส์ InBO₃:Si⁴⁺ กับค่าคงที่ผลึก



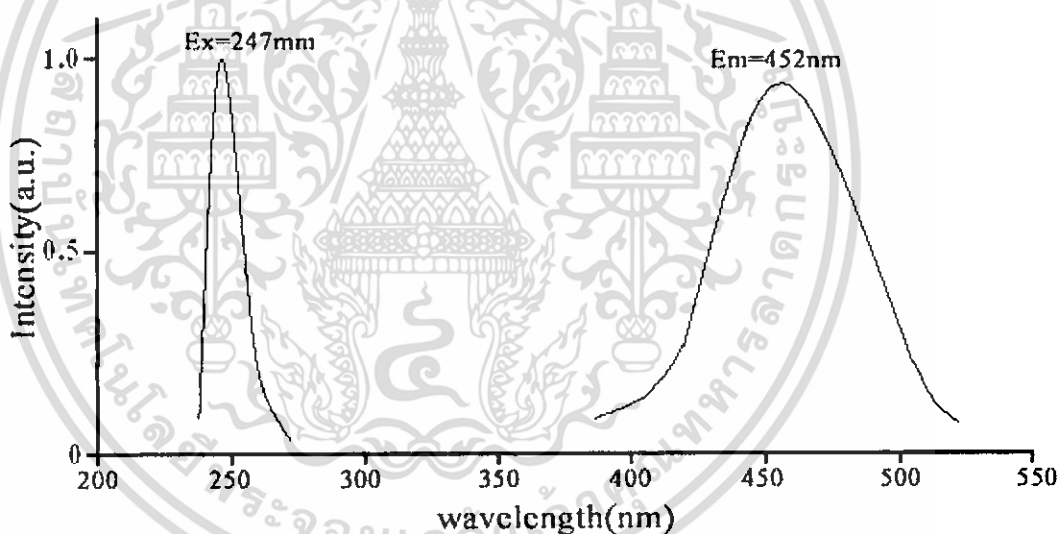
รูปที่ 4.5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การเจือ Ge⁴⁺ สารประกอบเซรามิกส์ InBO₃:Ge⁴⁺ กับค่าคงที่ผลึก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 ผลการศึกษาการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+}

ได้มีการศึกษาการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยปริมาณ 1% , 5% , 10% และ 20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด และศึกษาการเรืองแสงที่อุณหภูมิ 50K ถึง 300K ทำการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์รุ่น RF-5031PC ได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้

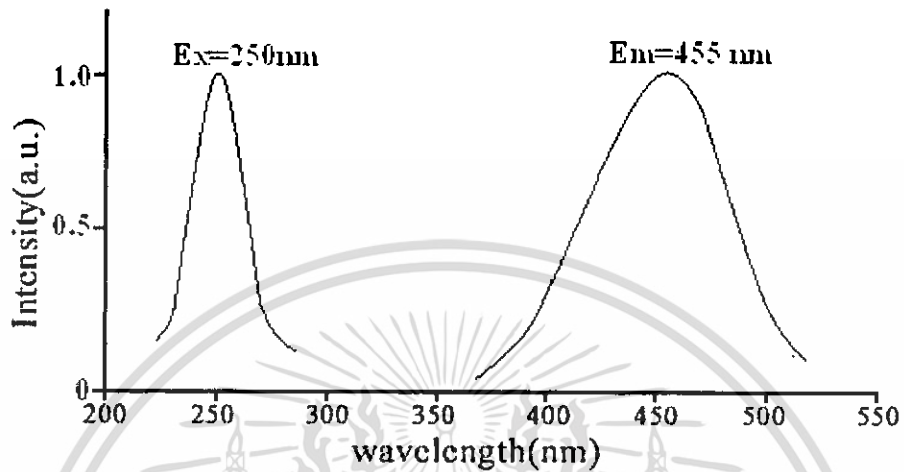
จากรูปที่ 4.6 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 247 นาโนเมตร และ แถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 452 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 2.77 eV



รูปที่ 4.6 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

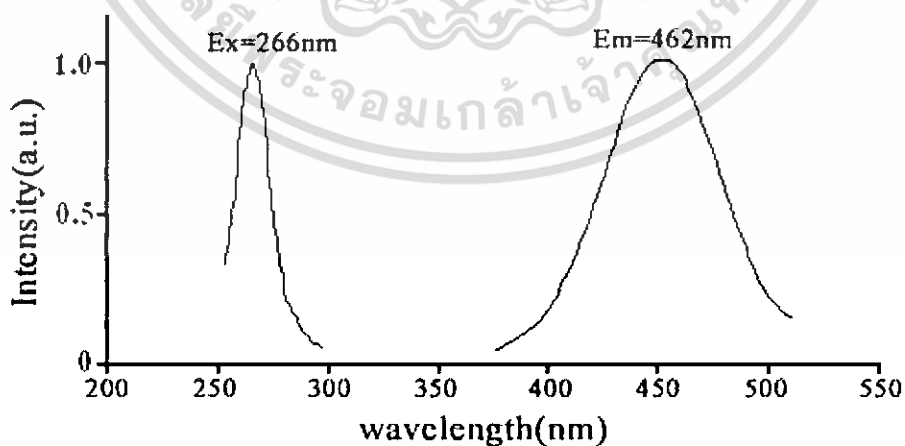
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.7 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 250 นาโนเมตร และ แถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 455 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตคส์ 2.23



รูปที่ 4.7 .แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (5% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

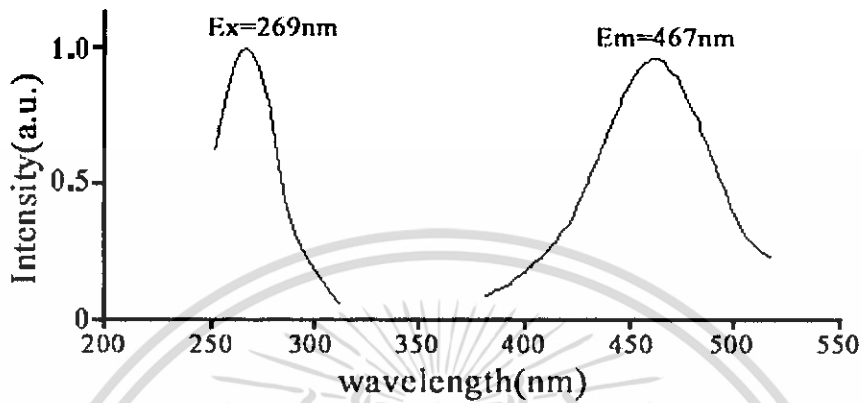
จากรูปที่ 4.8 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 266 นาโนเมตร และ แถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 462 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตคส์ 1.98eV



รูปที่ 4.8 .แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (10% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

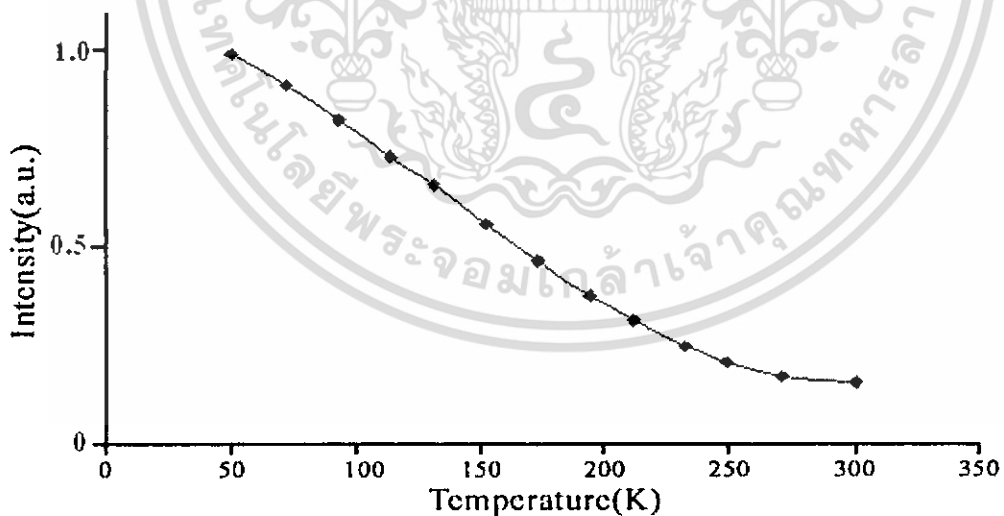
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.9 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 269 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 467 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 1.95 eV



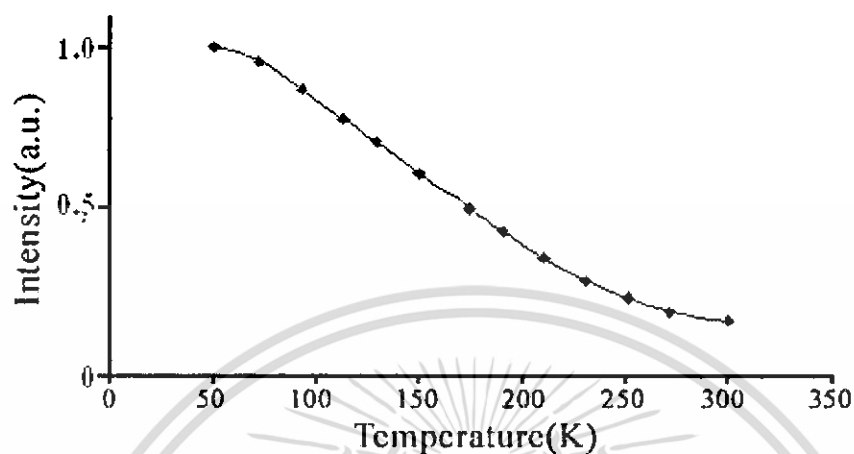
รูปที่ 4.9 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

ได้แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} ที่อุณหภูมิในขณะที่ทำการวัดมีค่า 50 K ถึง 300 K ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

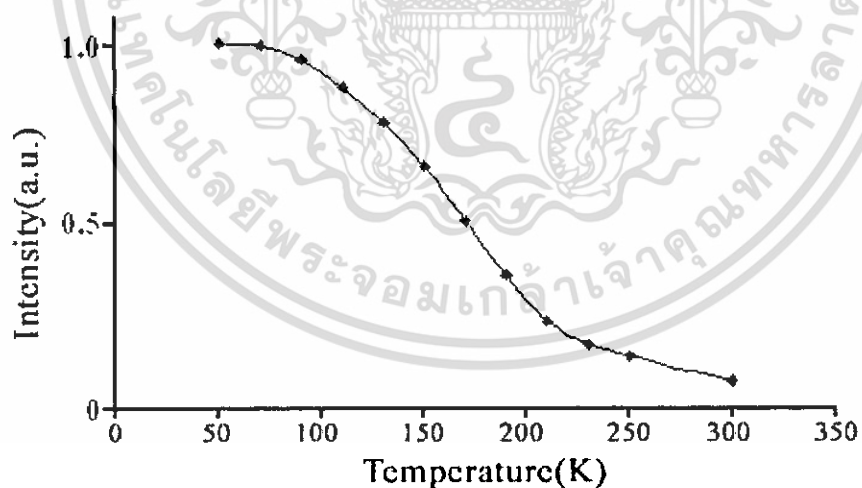


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

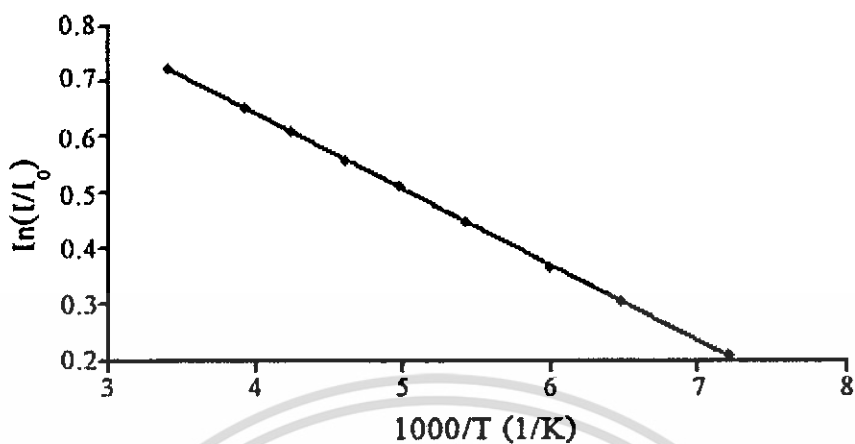


รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}$ (5% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}$ (10% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) กับอุณหภูมิ 50K ถึง 300 K

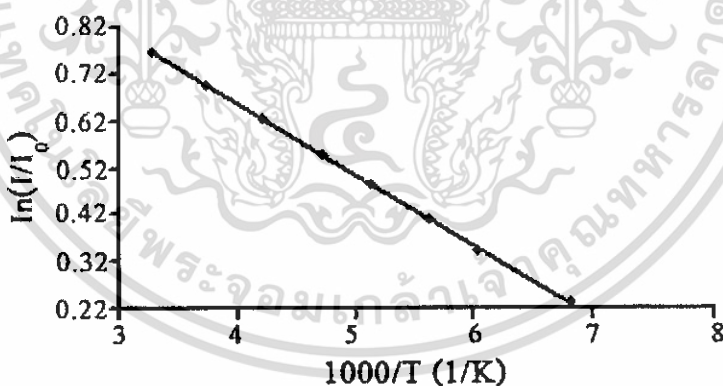
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 39 meV

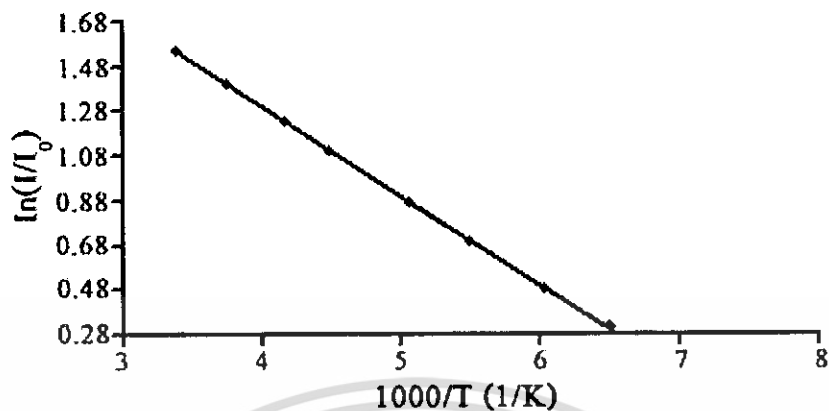


รูปที่ 4.15 ...แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (5% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 41 meV

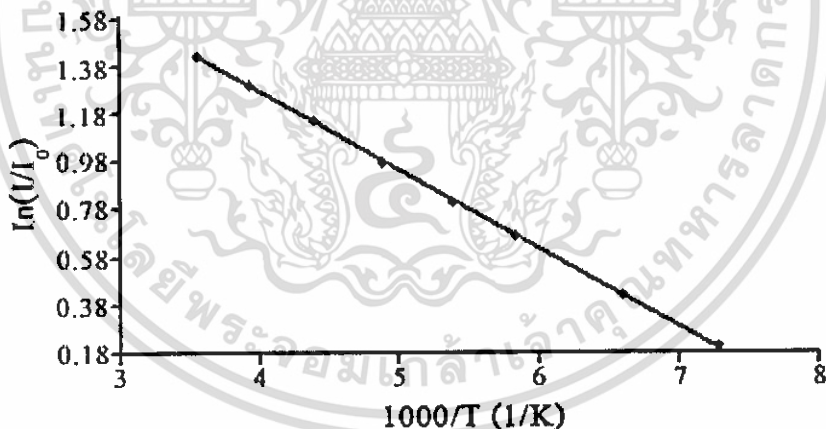
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (10% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 49.21 meV



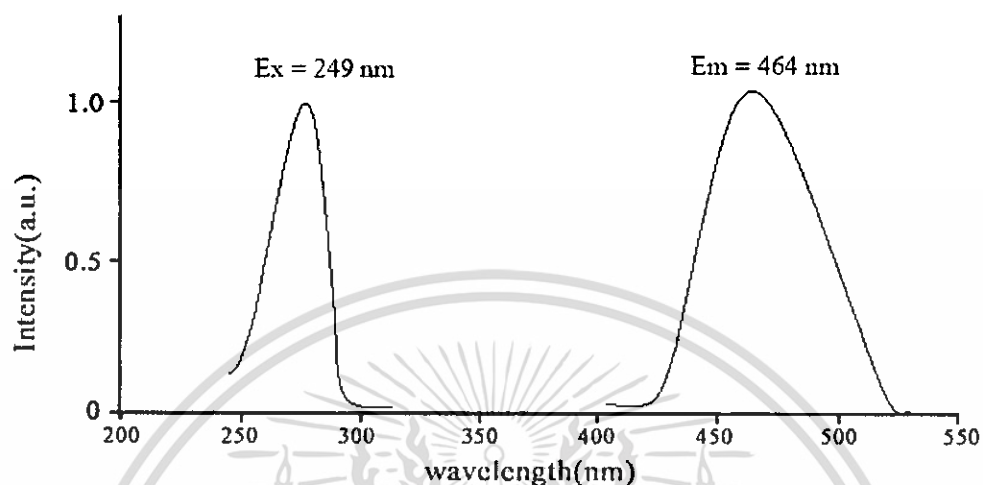
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$ (20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 54.33 meV

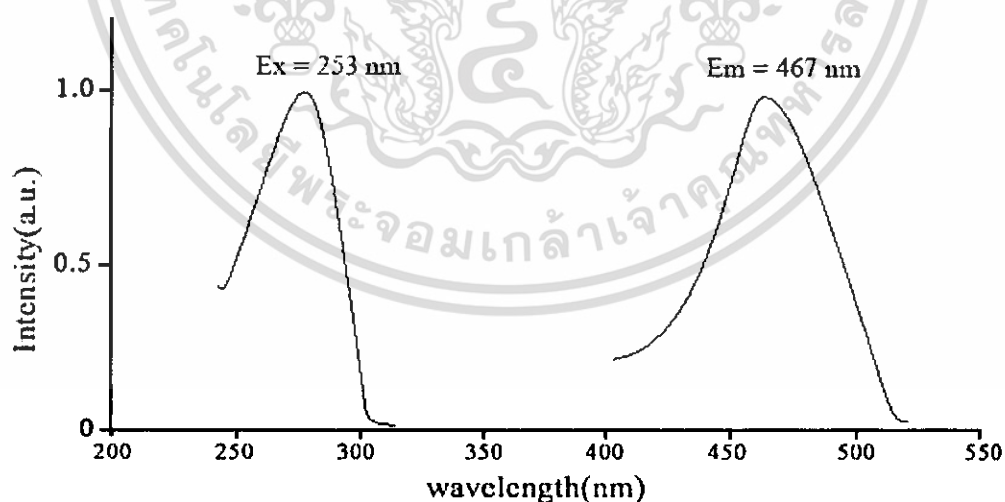
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.18 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 249 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 464 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 2.30 eV



รูปที่ 4.18 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

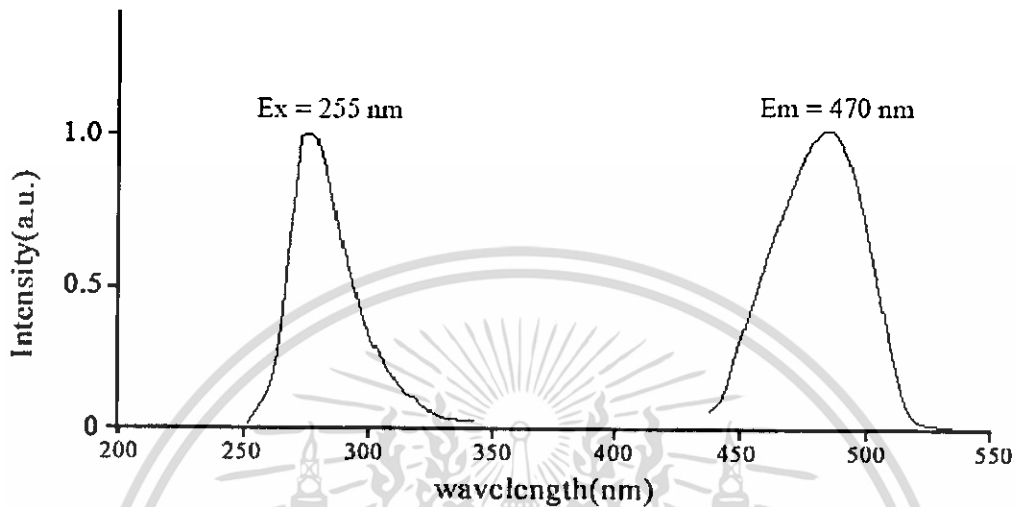
จากรูปที่ 4.19 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 253 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 467 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 2.24 eV



รูปที่ 4.19 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (5% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

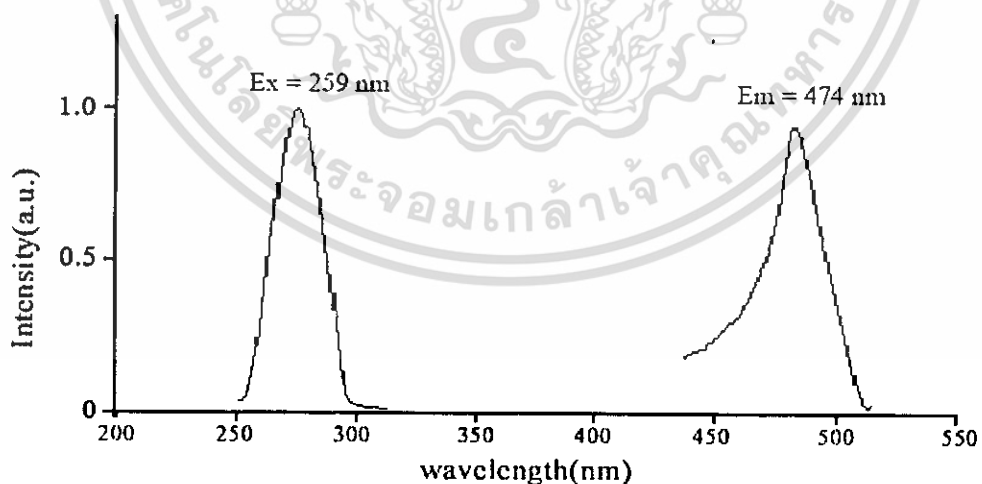
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.20 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 255 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 470 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 2.22 eV



รูปที่ 4.20 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (10% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

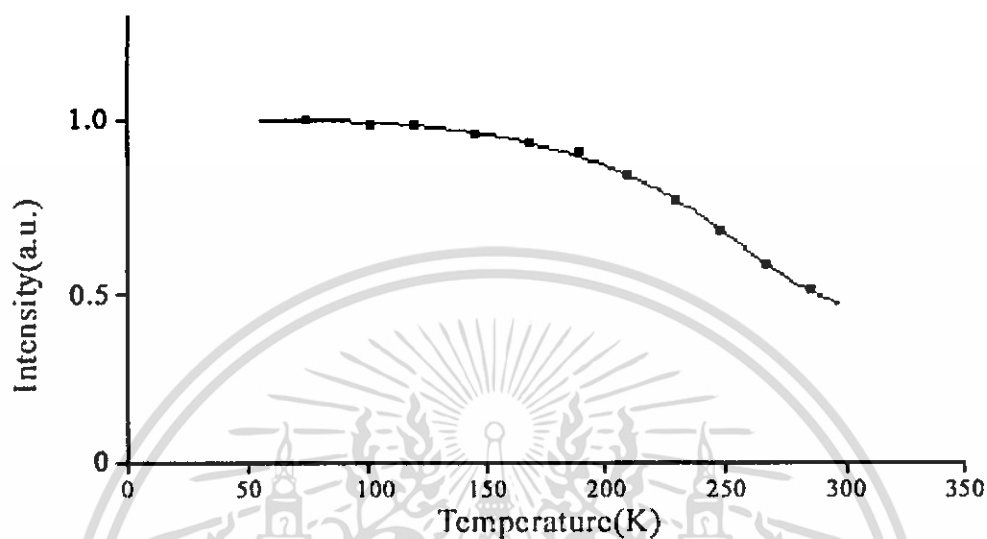
จากรูปที่ 4.21 แสดงแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 259 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 474 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 2.17 eV



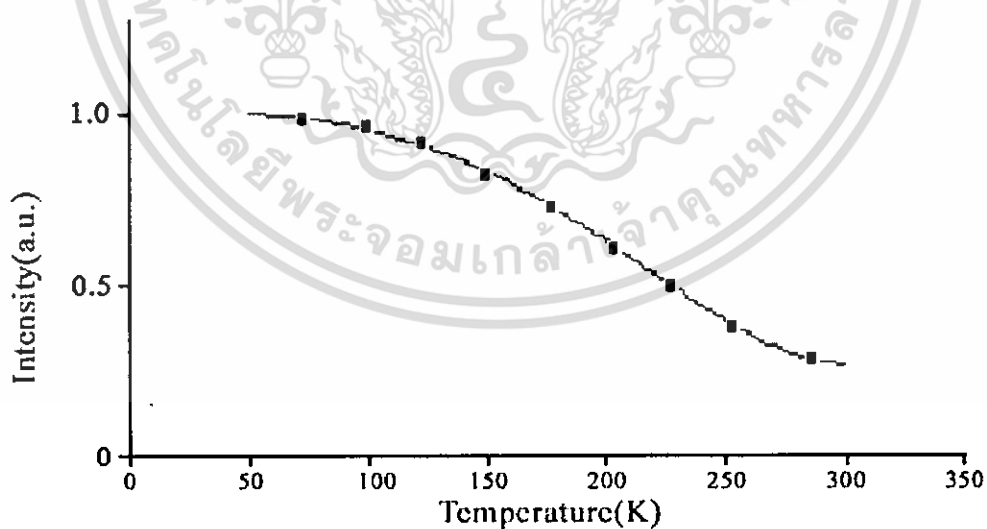
รูปที่ 4.21 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) ที่อุณหภูมิ 50 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้แสดงค่าความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ge^{4+} ที่อุณหภูมิในขณะที่ทำการวัดมีค่า 50 K ถึง 300 K ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้

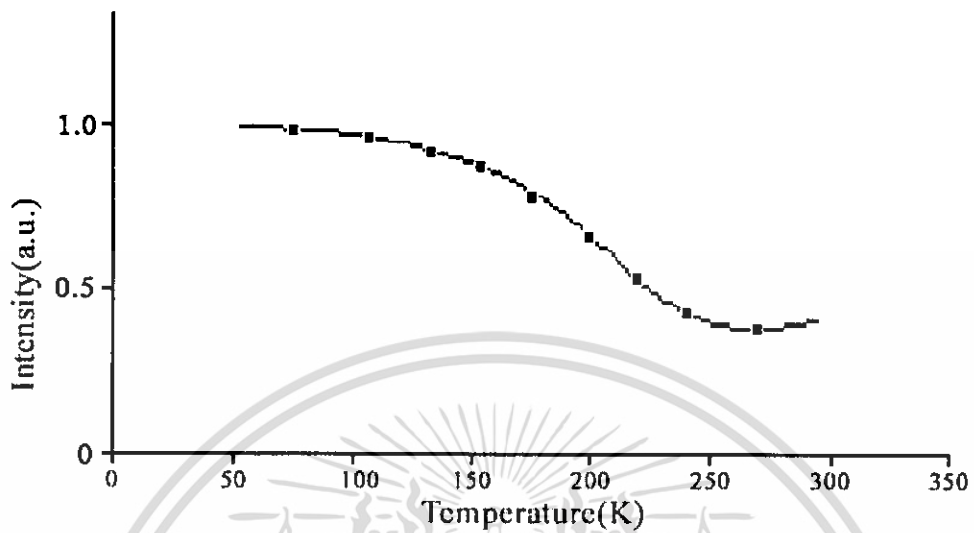


รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K

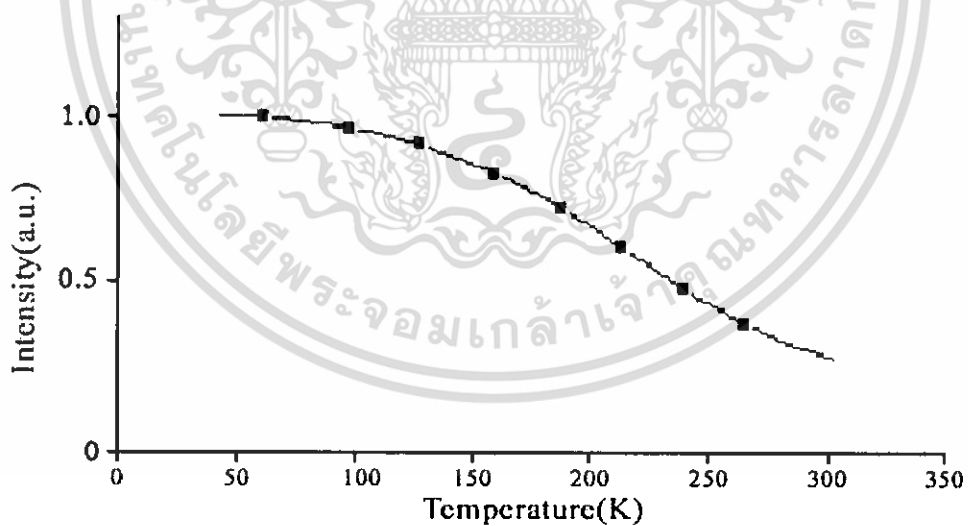


รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (5% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

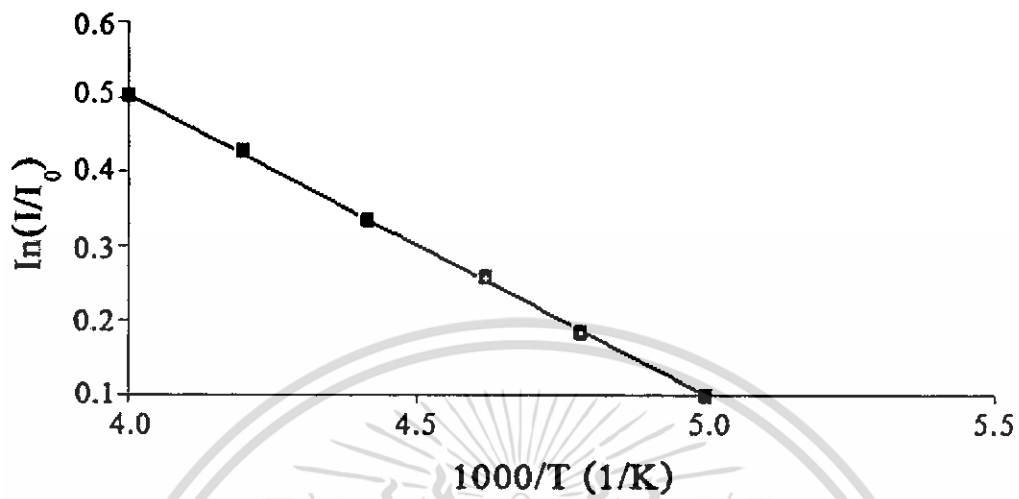


รูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (10% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K



รูปที่ 4.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด) กับอุณหภูมิ 50 K ถึง 300 K

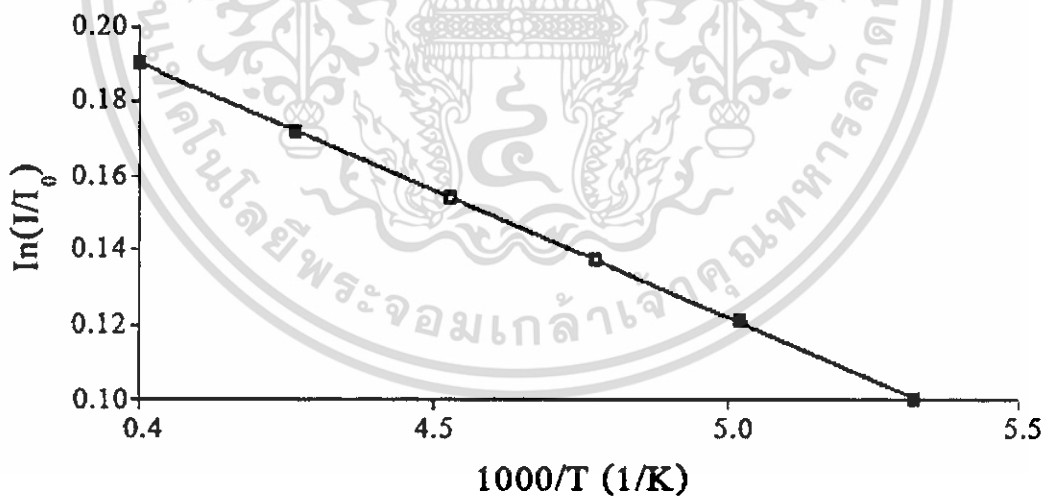
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.26 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (1% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 30.506 meV

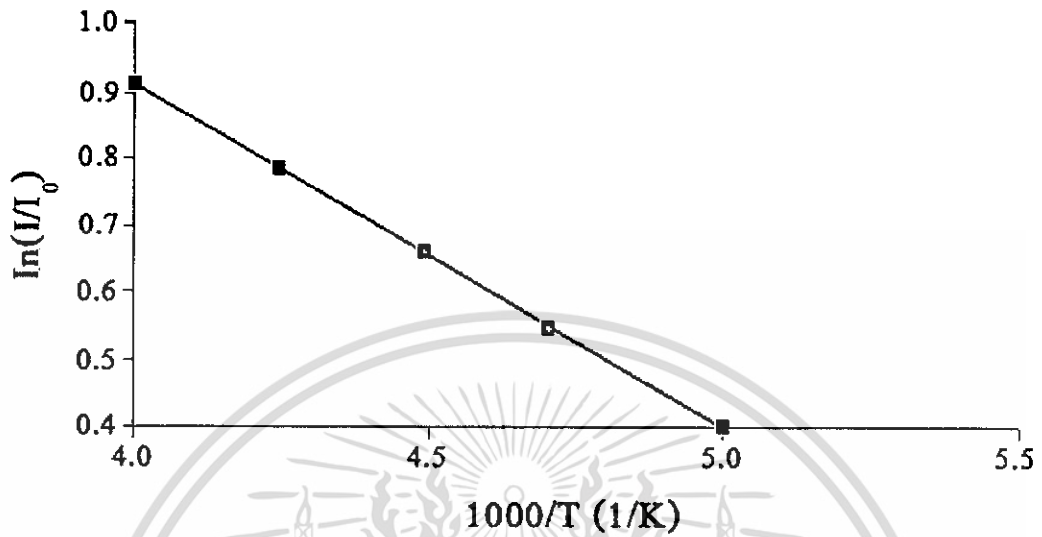


รูปที่ 4.27 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (5% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

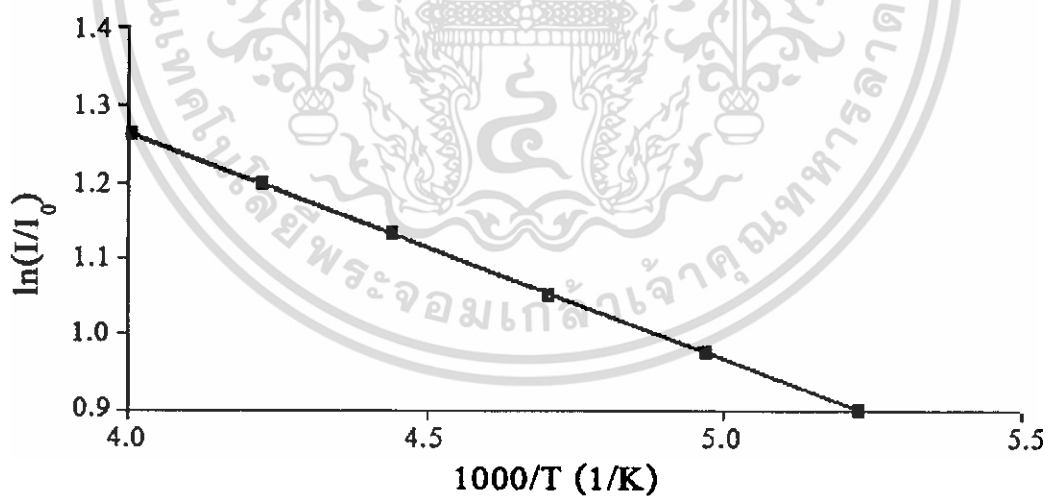
ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 35.811 meV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.28 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (10% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ 38.346 meV



รูปที่ 4.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของสารประกอบเซรามิกส์

$\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$ (20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด)

ซึ่งจากสมการ (4.20) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ 46.264 meV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Si}^{4+}$

Temperature (K)	Parameters											
	1% dopant			5% dopant			10% dopant			20% dopant		
	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)
50	247	452	2.277	250	455	2.235	266	462	1.980	269	467	1.955
100	247	452.5	2.280	250	456	2.241	266	462.4	1.980	269	467.6	1.958
150	247	453	2.283	250	457.6	2.251	266	462.8	1.980	269	468	1.961
200	247	454	2.289	250	459	2.258	266	463	1.980	269	469.4	1.968
250	247	455	2.295	250	459.4	2.261	266	463.4	1.990	269	470.2	1.973
300	247	456	2.301	250	460	2.265	266	464	1.990	269	471.8	1.982

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Ge}^{4+}$

Temperature (K)	Parameters											
	1% dopant			5% dopant			10 % dopant			20 % dopant		
	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)	λ_{ex} (nm)	λ_{em} (nm)	Stokes Shift (ev)
50	249	464	2.308	253	467	2.246	255	470	2.224	259	474	2.172
100	249	465	2.313	253	468.2	2.253	255	471	2.230	259	474.4	2.174
150	249	465.8	2.318	253	469	2.257	255	472	2.236	259	476	2.183
200	249	467	2.325	253	469.6	2.261	255	473	2.241	259	477	2.188
250	249	468	2.330	253	470	2.263	255	473.7	2.245	259	477.5	2.191
300	249	469	2.336	253	471	2.268	255	475	2.252	259	479	2.199

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.1 และ 4.2 เป็นตารางแสดงคุณสมบัติการเรืองแสงของสารประกอบเซอร์รามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ในปริมาณการเจือที่แตกต่างกันคือ 1%, 5%, 10% และ 20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมดและทำการวัดที่อุณหภูมิต่างๆ จะพบว่า ที่ปริมาณการเจือเพิ่มขึ้นส่งผลให้มีการเรืองแสงที่ความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น ค่าการเลื่อนไปของสโตกส์มีค่าลดลงด้วย และเมื่อทำการวัดที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นปริมาณความเข้มของการเรืองแสงจะค่อยๆ ลดลง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองได้ทำการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ในปริมาณการเจือ 1%, 5%, 10%, 20% และ 30% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด โดยวัตถุประสงค์คือ ทำสารเรืองแสงเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับนิวตริโน โซลิดสเตทเลเซอร์และคอนเซนเตรเตอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ ผลการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างผลึกของผงสารประกอบ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของไฟล์มาตรฐาน ซึ่งพบว่าโครงสร้างผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลและค่าคงที่ของโครงสร้างผลึกมีค่าลดลงเมื่อเปอร์เซ็นต์ในการเจือมากขึ้น

ผลการตรวจสอบการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ จะพบว่าในกรณี InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} ด้วยปริมาณการเจือ 1%, 5%, 10% และ 20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมดที่อุณหภูมิ 50K พบว่าจะปรากฏตำแหน่งของแถบการกระตุ้นสูงสุดอยู่ในช่วง 247-269 nm และปรากฏตำแหน่งของแถบการเรืองแสงสูงสุดอยู่ในช่วง 452-467 nm โดยค่าแถบการเรืองแสงจะมีค่าเลื่อนไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อปริมาณในการเจือเพิ่มขึ้น

ในการทดลองได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 50K จนถึง 300K พบว่าความเข้มของการเรืองแสงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มของการเรืองแสงที่อุณหภูมิสูงๆจะคงที่ จึงทำให้รู้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อความเข้มการเรืองแสง และมีผลต่อตำแหน่งพีกการเรืองแสงสูงสุดจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสีเขียว จากผลที่ได้ที่อุณหภูมิสูงทำให้เกิดการแยกระดับพลังงานที่ศูนย์กลางการเรืองแสง ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อน จะทำให้จุดสมดุลของการสั่นของอะตอมเลื่อนออกจากจุดสมดุลเดิม ส่งผลให้ความเข้มของการเรืองแสงลดต่ำลง ซึ่งมีค่าพลังงานกระตุ้นในช่วง 39-54.33 meV

ในกรณี InBO_3 เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ge^{4+} ด้วยปริมาณการเจือ 1%, 5%, 10% และ 20% ของน้ำหนักปริมาณสารทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 50K พบว่า จะปรากฏตำแหน่งแถบพลังงานการกระตุ้นสูงสุดอยู่ในช่วง 249-259 nm และปรากฏตำแหน่งการเรืองแสงสูงสุดอยู่ในช่วง 464-474 nm โดยค่าแถบการเรืองแสงจะมีค่าเลื่อนไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อปริมาณในการเจือเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

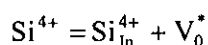
เมื่อ InBO_3 เจือด้วยอะตอมของธาตุ Ge^{4+} ด้วยปริมาณการเจือ 1%, 5%, 10% และ 20% ของปริมาณสารทั้งหมด ได้ทำการเพิ่มอุณหภูมิตั้งแต่ 50K จนถึง 300K จะพบว่าความเข้มของการเรืองแสงมีค่าลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ความเข้มของการเรืองแสงที่อุณหภูมิสูงๆจะมีค่าคงที่เป็นเหมือน กับ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} จึงทำให้รู้ว่าอุณหภูมิมีผลต่อความเข้มของการเรืองแสงและมีผลต่อตำแหน่งที่การเรืองแสงสูงสุดที่จะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นสีเขียว ที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะทำให้จุดสมดุลของการสั่นของอะตอมเลื่อนออกจากจุดสมดุลเดิม ส่งผลให้ความเข้มของการเรืองแสงลดต่ำลงซึ่งมีค่าพลังงานกระตุ้นในช่วง 30.506-46.264 meV

Kang และคณะ [Kang^{a*}และคณะ, 2003] ได้ศึกษาสมบัติการเรืองแสงของ $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Si}^{4+}$ และได้เสนอว่าศูนย์กลางการเรืองแสงเกิดจากไอออน Ge^{4+} เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของไอออน Ga^{3+} เนื่องจากรัศมีของ Ge^{4+} ใกล้เคียงกับ Ga^{3+} ในขณะเดียวกันก็จะทำให้เกิดแวนแคนซีของออกซิเจน (V_o) ซึ่งจะแสดงได้ถึงความสัมพันธ์



เมื่อ V_o^* คือแวนแคนซีของออกซิเจนที่สถานะถูกกระตุ้น (excited state)

สำหรับในโครงงานพิเศษนี้ไอออน Si^{4+} และ Ge^{4+} จะเข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของไอออน In^{3+} ซึ่งจะประพฤติตัวเสมือนเป็นระดับพลังงานผู้ให้และอยู่ต่ำกว่าของล่างสุดของแถบนำของ InBO_3 ส่วน V_o^* จะประพฤติตัวเป็นระดับพลังงานผู้รับและอยู่สูงกว่าขอบบนสุดของแถบวาเลนซ์ แถบการเรืองแสงจะเกิดจากการปลดปล่อยโฟตอนในขณะที่อิเล็กตรอนเคลื่อนย้ายกลับลงสู่แถบวาเลนซ์ ส่วนแถบการเรืองแสงที่เกิดจากระดับพลังงานของ V_o^* ไม่สามารถตรวจสอบได้ ซึ่งอาจเนื่องมาจากแถบการเรืองแสงมีช่วงพลังงานที่ต่ำกว่าความสามารถของเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ที่จะตรวจสอบได้ และเมื่อปริมาณสารเจือ Si^{4+} และ Ge^{4+} เพิ่มขึ้น ความยาวคลื่นของพีคของแถบการเรืองแสงจะเลื่อนไปทางความยาวคลื่นที่เพิ่มขึ้น (redshift) ซึ่งหมายถึงความแข็งหรือความเปราะ (stiffness) ของโครงผลึกเจ้าบ้าน (host lattice) จะลดลงส่งผลให้การเลื่อนไปของสโตคส์มีค่าเพิ่มขึ้นซึ่งบอกเป็นนัยๆว่าจะมีโฟนอนเข้ามาเกี่ยวข้องในกระบวนการการเรืองแสงมากขึ้น ดังนั้นในกระบวนการการเรืองแสงของไอออน Si^{4+} ที่เข้าไปแทนที่ในตำแหน่งของ In^{3+} จะแสดงได้ดังสมการ:



ในกรณีที่เจือด้วย Ge^{4+} จะได้ว่า:



5.2 ปัญหาและข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Si^{4+} และ Ge^{4+} ปัญหาที่พบและเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองดีขึ้น โดยปัญหาและข้อเสนอแนะมีดังนี้

- ในการชั่งสารนั้น สารที่เจือมีจำนวนน้อยมากจึงอาจเจือสารได้ไม่ตรงเท่าที่ควร ซึ่งทำให้เกิดความผิดพลาดขึ้นได้
- ก่อนนำสารมาทำการอัดเม็ด ควรทำความสะอาดบล็อกอัดเม็ดให้สะอาด เพื่อไม่ให้เม็ดสารมีสิ่งเจือปนจากบล็อกอัดเม็ด
- ก่อนเผาควรตรวจสอบสภาพเตาเผาว่ามีวัสดุแปลกปลอมหรือไม่ เพื่อความสะดวกในการวางถ้วยครุชิวีล จะได้ไม่ล้มขณะทำการเคลื่อนย้ายถ้วยครุชิวีล เข้า - ออก จากเตา
- ในการเผาเม็ดสารนั้น ได้เผาเม็ดสารหลายเม็ดในครุชิวีลเดียวใช้กับสารที่เป็นชนิดเดียวกัน แต่ถ้าเป็นสารต่างชนิดกัน จึงต้องเคลือบเม็ดสารต่างๆ ไว้ด้วยซิลิกอนเพื่อไม่ให้ผสมกัน จึงทำให้เม็ดสารมีซิลิกอนเจือปนอยู่ตลอดเวลาจะมีซิลิกอนรวมอยู่ด้วย ดังนั้นควรเผาในปริมาณ 1 เม็ดต่อ 1 ครุชิวีล
- ถ้าไฟดับในระหว่างทำการเผาสาร อุณหภูมิจะไม่ต่อเนื่องดังนั้นควรจดอุณหภูมิที่ไฟดับไว้ แล้วเริ่มทำการเผาสารต่อที่อุณหภูมินั้นเพื่อจะได้ไม่เสียเวลา
- อุณหภูมิในการวัดอาจจะไม่เท่ากับ 1,200 องศา เนื่องจากอาจสัมผัสตรงบริเวณขดลวดหรือถ้วยครุชิวีล จึงอาจไม่ใช่อุณหภูมิของเตาเผาที่แน่นอน
- ในการวัดการเรืองแสงของสารที่อุณหภูมิต่ำนั้นอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากจึงทำให้การวัดผลนั้นอาจไม่คงที่ เนื่องจากมีไอน้ำเกาะที่กระจกจึงทำให้ผลที่วัดได้นั้นมีความคลาดเคลื่อนได้
- ในการวัดการเรืองแสงของสารนั้นอาจมีแสงเล็ดลอดเข้ามาในขณะที่ทำการทดลองได้ จึงทำให้ตัวตรวจวัดนั้นตรวจวัดแสงที่เล็ดลอดเข้ามาด้วย จึงควรใช้ผ้าดำคลุมเครื่องไว้ป้องกันแสงและปิดไฟในห้องที่ทำการทดลองเพื่อที่จะได้ผลการทดลองที่ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ณัฐวัฒน์ ทูมเมฆ, ก้องภพ สำเร็จ, พงศ์ศักดิ์แสงเพชร, 2548, การศึกษาคุณสมบัติของสารประกอบ InBO_3 ที่เจือด้วยธาตุหลายชนิด, รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

Messous, Y., Chambon, B., De J'esus, M., Drain, D., Pastor, C. Garcia,, A. Chaminade, J. P, Gaewdang, T., Fouassier, C., Jacquier, B., and Varrel, B, 2005, **Indium disilicate, a new fast scintillator**, *Nuclear Instruments and methods in Physics research A* 354., pp.527-529.

Dotsenko, V. P., Berezovshaya, I. V. and Efrushina, N. P, 1996, **Photoionization and luminescence properties of Bi^{3+} in $\text{In}_{1-x}\text{Lu}_x\text{BO}_3$ Solid solutions**, *J. Phys. Chem Solids.*, Vol57, pp.437-441.

Kim^{a,*}, H.L.Park^a, G.C.Kim^b, T.W. Kim^c, Y.H.Hwang^d, H.K.Kim^d, S.I.Mho^e, S.D.Han^f, 1998, **“Luminescence enhancement of $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Mn}^{2+}$ by Ge^{4+} and Li^+ dopng”**, *Solid State Communications* 126, pp.515-518

Kang^{a,*}, J.S.Kim^a, M.Lee^a, J.H.Bahng^a, J.C.Choi^a, H.L.Park^a, G.C.Kim^b, T.W. Kim^c, Y.H.Hwang^d, H.K.Kim^d, S.I.Mho^e, S.D.Han^f, Y.S.Yy^f, H.J.Song^g, W.T.Kim^g, 2002, **“Tunable color emission of $\text{ZnGa}_2\text{O}_4:\text{Si}^{4+}$ phosphors with enhanced brightness due to donor formation”**, *Solid State Communications* 122, pp.633-636

Garcia Sole, L.E.Bausa and D.Jaque, 2002, **An Introduction to the Optical Spectroscopy of Tnorganic Solids**. Universided Autonoma de Madrid, Spain(170-182)

จิติณัษ แก้วแดง, งามนิตย์ วงษ์เจริญ, ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ และชัยสิงห์ ภูรัญเกียรติ, 2546, การประดิษฐ์ฟิล์มบาง $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ ที่มี Zn ในปริมาณสูงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์. รายงานวิจัยเสนอต่อคณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

จิติกร จรรยาธรรม, 2550, การศึกษาเชิงเปรียบเทียบสมบัติของฟิล์มบาง $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}$ ที่เตรียมโดยเทคนิคที่ต่างกัน วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.

คูสิต เกรืองาม, 2542, **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน**. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Kittel,C,1971, **Introduction of Solid State Physics**,4th ed.,John Wiley&Sons Inc.,New York pp4-32,46-48,56-60,364-365,540-552,611-612

บัญชา ชนบุญสมบัติ.2544, การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรคชั่น.สำนักพิมพ์ส.ท.สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น).

ณัฐพร พรหมรส,2548, การออกแบบและลักษณะเฉพาะของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง.วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

Wilson, J. and Hawkes, J. F. B,1989, **Optoelectronics An Introduction 2nd Ed. PrenticeHall**, Singapore.

Sze, S. M,1956, **Physic of Semiconductor Device 2nd ED.**John Wiley & Song Inc.

สุภาณี ลิ้มสุวรรณ, 2542, กลศาสตร์ควอนตัม,โรงพิมพ์เลียงเชียง. กรุงเทพฯ.

Anthony,R.West,1990, **Bounding,Energy levels AndBands in Inorganic Solids**,Longman Group Uk Limited

Abelas,F,1972, **Optical Peoperties of Solids**.pp.23-40,North-Holland,London

Anthony R. West,1989, **Solid State Chomical and It's Application**.pp.412-418,Singapore, John Wiley&Sons

J Wile,J.and J.F.BHawks,J.F.B,1989, **Optoelectronics**,2nd.pp.315-321,Singapore, Prentice Hall.

Blasse, G,1974, "Theremal Quenching of chateristic Luminescence.II ", JOURNAL OF SOLID STATE CHEMISTRY 9. pp.147-151.

Available from : <http://en.wihikipedia.org/wiki/stokes shift>.

Available from : <http://www.physics.utoledo.edu/~adc/Chap-27.htm>

Available from : <http://members.thai.nct/nanomaterials/page1/nanomaterials.htm>

Available from : http://www.ulg.ac.be/geolsed/sedim/compl_sedim.htm

Available from : <http://www.tptc.iit.edu/.../periodic-table.jpg>

Available from : <http://www.webelements.com/webelements/elements/text/Si/econ.html>

Available from : <http://www.TETA&OTA\Molecular diagrams.htm>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์

Pattern : 17-933		Radiation = 1.540598					Quality :
Indexed							
InBO ₃	2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>		
Indium Borate	24.232	100	1	0	2		
Lattice : Hexagonal	Mol. Weigth = 173.63	31.521	100	1	0	4	
S.G. : (o)	Volume[CD] ~	34.827	6	0	0	6	
a = 4.82300	311.36	37.265	35	1	1	0	
c = 15.45600	DX = 0.926	41.305	8	1	1	3	
		44.927	30	2	0	2	
		49.584	20	2	0	4	
		51.911	35	1	1	6	
		52.133	20	1	0	8	
ADDITIONAL DIFFRACTION LINE (S) :		59.726	20	2	1	2	
Additional weak lines not listed		63.590	14	2	1	4	
		64.179	6	1	0	10	
* Am. Mineral., volume 46 , page 1030 ,		65.807	8	2	0	8	
(1961) primary reference :		67.198	10	3	0	0	
Levin, Roth, Martin.		73.462	2	0	0	12	
		76.663	4	2	0	10	
Radiation : CuKα	Filter : Beta	77.926	4	3	0	6	
Lambda : 1.54180	d-sp : Not given	78.153	8	2	1	8	
SS/FOM F29 = 14		97.393	4	2	2	0	
(0.0172,118)		84.468	4	3	1	2	
		85.388	4	1	1	12	
		87.889	6	3	1	4	
		88.491	4	0	0	14	
		89.724	4	2	2	6	
		92.428	2	1	0	14	
		99.669	4	4	0	4	
		101.601	4	3	1	8	
		104.229	2	2	0	14	
		108.190	4	3	2	2	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นางสาว ณัฐชยา แก้วเรืองฤทธิ์ เกิดเมื่อวันที่ 20 มีนาคม พ.ศ. 2527 เป็นคนนครศรีธรรมราชโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสามตำบลวิทยาประชาสรรค์ และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใน คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2546

นางสาว สุภาพร สอาดพงษ์ เกิดเมื่อวันที่ 4 กุมภาพันธ์ พ.ศ. 2527 เป็นคนตราดโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนเสตอวิทยาคม รัชมิ่งคลาภิเษก และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ในปีการศึกษา 2546



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้