

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสมบัติของสารประกอบ InBO_3 ที่เจือด้วยธาตุหลากหลายชนิด



นายก้องภพ สำเร็จ
นายณัฐวัฒน์ ทูมเมฆ
นายพงศ์ศักดิ์ แสงเพชร

อ.พ.
กชย.พ.
2549

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**62283**
วัน,เดือน,ปี - 8 ส.ค. 2549

b. 11616866
i.....

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสมบัติของสารประกอบ InBO_3 ที่เจือด้วยธาตุหลากหลายชนิด



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Study of InBO₃ Compound Doped with Various Elements



A Spacial 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 2005

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง	การศึกษาสมบัติของสารประกอบ InBO_3 ที่เจือด้วยธาตุหลากหลายชนิด
นักศึกษา	นายก้องภพ สำเร็จ นายณัฐวัฒน์ ทุมเมฆ นายพงศ์ศักดิ์ แสงเพชร
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สาขาวิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูรัศม์เกียรติ

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

คณะกรรมการตรวจสอบ			ลายมือชื่อ
ประธานกรรมการ	อ. กิรบุทธิ์ ศรีนวลจันทร์		
กรรมการ	อ. ศ. ทิพวรรณ กล้ายบุญมี		
กรรมการ	รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ		
กรรมการที่ปรึกษา	รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง		
กรรมการที่ปรึกษาร่วม	ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูรัศม์เกียรติ		

(รองศาสตราจารย์วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการพิเศษเรื่อง การศึกษาสมบัติของสารประกอบ InBO_3 ที่เจือด้วยธาตุหลากหลายชนิด

นักศึกษา นายก้องภพ ลำเร็จ
นายณัฐวัฒน์ ทุมเมฆ
นายพงศ์ศักดิ์ แสงเพชร

ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์

สาขาวิชา ฟิสิกส์ประยุกต์

ปีการศึกษา 2548

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. จูตินัย แก้วแดง

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผศ. ดร. ชัยสิงห์ ภูริภัยเกียรติ

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษฉบับนี้ ต้องการตรวจสอบสมบัติทางด้านการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Ge และ Si โดยเจือ Bi ใน InBO_3 ด้วยปริมาณ 1, 10, 20, 30 และ 40% ของสารทั้งหมดและเจือ Ge และ Si ใน InBO_3 ด้วยปริมาณ 1% ของสารทั้งหมด อุณหภูมิของการวัดการเรืองแสงอยู่ในช่วง 50K ไปถึง 250K โดยสเปกตรัมของการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ ที่อุณหภูมิ 50K แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งพีกการเรืองแสงสูงสุดมีค่าอยู่ในช่วง 424 ถึง 451 nm โดยจะมีค่าเลื่อนไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อปริมาณในการเจือ Bi เพิ่มขึ้น ความเข้มของตำแหน่งการเรืองแสงสูงสุดของ InBO_3 ที่เจือด้วย Bi, Ge และ Si จะเพิ่มขึ้นตามการลดลงของอุณหภูมิของการวัดการเรืองแสง พลังงานกระตุ้นของพาหะอิสระที่ได้จากความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ และ $1000/T$ มีค่าอยู่ในช่วง 10 ถึง 60 meV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title A Study of InBO_3 Compound Doped with Various Elements

Name Kongpop Samret
Natawat Toommake
Pongsakdi Sangpetch

Department Applied Physics **Faculty of Science**

Program Applied Physics

Academic Year 2005

Special Project Advisor Assoc. Prof. Dr. Thitinai Gaewdang

Special Project Co-Advisor Assist. Prof. Dr. Chaisingh Poo-Rakkiat

ABSTRACT

The objective of the special project were to investigate the luminescent properties of InBO_3 doped by Bi, Ge and Si. The Bi concentrations in the InBO_3 were varied at 1, 10, 20, 30 and 40% of the total compound. The Ge and Si concentrations in the InBO_3 were fixed constant at 1% of the total compound. The measured temperature was varied from 50 to 250K. The results of the PL measurement of $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ at 50K showed maximum emission peak about 424 to 451 nm and the maximum emission peak position shifted to longer wavelength with increasing the Bi concentrations. Moreover, the PL intensity of the maximum emission peak of InBO_3 doped by Bi, Ge and Si were increased with decreasing the temperature of the PL measurement. The activation energy of the free carriers obtained from the relation of $\ln(I/I_0)$ and $1000/T$ was about 10 to 60 meV.

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษเรื่องนี้สามารถสำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางเอาไว้ด้วยความเมตตาและกรุณาของ รศ. งามนิตย์ วงษ์เจริญ รศ.ดร. ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ ผศ.ดร. ชัยสิงห์ ภูริภักย์เกียรติ และ รศ.ดร. จูตินัย แก้วแดง ที่อำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในการทดลอง ตลอดจนอุปการะทุนสนับสนุนและให้คำปรึกษาทางวิชาการที่ดีตลอดการศึกษารวมไปถึงการปลูกฝังสิ่งที่ตั้งงามให้กับลูกศิษย์ทุกคนเสมอมา

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำปลอดประจุมาใช้ในการทดลองของโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์คำแนะนำในการใช้เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟร็กโตมิเตอร์ ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ในการศึกษาโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาค

ขอขอบคุณ รศ. วิชาญ เดชดิธีระ หัวหน้าภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์จัดสรรงบประมาณของภาควิชาเพื่อใช้ในงานวิจัย

ขอขอบคุณ รศ.ดร. อารีย์ วิเชียรฉาย ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้เครื่องอัดเม็ดสารและกล้องจุลทรรศน์

ขอขอบคุณ คุณธวัชชัย ขาวประเสริฐ คุณจรินทร์ โพธิ์ไชยะ และ คุณชำนาญ จันทร์ชุ่ม เจ้าหน้าที่อาคารฝึกงาน ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่อำนวยความสะดวกในการเข้าใช้เครื่องมือเพื่อประดิษฐ์อุปกรณ์ในการทดลองสำหรับการจัดทำโครงการพิเศษ

ขอขอบคุณ คุณปกรณ์ สิทธิเขตรกรณ์ และคุณ ประธาน ประจวบโชค นักศึกษาปริญญาโท ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความช่วยเหลือและ ให้คำแนะนำทางด้านวิชาการ รวมไปถึงการให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้ อุปกรณ์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอขอบคุณ คุณณัฐพร พรหมรส ที่ได้ทำการตรวจสอบและแก้ไขโครงการพิเศษเรื่องนี้ และให้ความช่วยเหลือ ถ่ายทอดความรู้ แนะนำทางด้านวิชาการ รวมไปถึงการให้คำแนะนำเกี่ยวกับการใช้อุปกรณ์ต่างๆ

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่เมตตาประสาทวิชาตั้งแต่การศึกษาภาคบังคับถึงปัจจุบัน ตลอดจนขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ที่ให้ความอุปการะทุนในการศึกษาเล่าเรียน และเป็นกำลังใจด้วยดีตลอดมา



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	จ
สารบัญตาราง	ช
สารบัญรูป	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินการ	4
1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	5
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	6
2.1 โครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์	6
2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	8
2.3 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	9
2.4 ลูมินิสเซนซ์	10
2.5 โฟโตลูมินิสเซนซ์	11
2.6 กลไกการเรืองแสงแบบลูมินิสเซนซ์	15
2.6.1 การเรืองแสงที่เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวโดยตรงกับโฮลในแถบวาเลนซ์	15
2.6.2 การเรืองแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในระดับพลังงานย่อยร่วมกัน	16
2.6.3 การเรืองแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับโลคอไลซ์	16
2.6.4 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอน	18
2.7 การเรืองแสงจากเอกซิตอนในลักษณะต่างๆ	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.7.1 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้	18
2.7.2 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับด้วยกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์	19
2.8 การเรืองแสงจากคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ	20
2.9 หลักการติดตั้งโฟโตลูมิเนสเซนซ์	21
2.9.1 พลังงานกระตุ้น	22
2.9.2 การควบคุมอุณหภูมิ	23
2.9.3 หัววัดสัญญาณและหน่วยประมวลผล	24
2.10 การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง	25
2.11 รัสเซลล์-ซาวน์เดอร์ คัปปลิง	25
2.12 การบวกของสปินสองตัว	30
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	34
3.1 ขั้นตอนการเตรียมสาร	34
3.1.1 ขั้นตอนการคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดลอง	34
3.1.2 ขั้นตอนการผสมสาร	35
3.1.3 ขั้นตอนการอัดเม็ดสาร	36
3.1.4 ขั้นตอนการเผาสาร	36
3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสาร	38
3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคของผงสารประกอบเชิงเซรามิกส์ InBO_3 ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	38
3.2.2 การตรวจสอบการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Si และ Ge ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์	39
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล	43
4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์	43

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2 ผลการศึกษาการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Ge และ Si	44
บทที่ 5 สรุปผลและข้อเสนอแนะ	58
5.1 สรุป	58
5.2 ข้อเสนอแนะ	59
เอกสารอ้างอิง	60
ภาคผนวก	63
ประวัติผู้เขียน	69



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1.1 แสดงผลระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย	4
ตารางที่ 2.1 ข้อมูลของโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ของสารประกอบบอเรต (MBO ₃)	8
ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของลูมิเนสเซนซ์ตามวิธีการกระตุ้น	10
ตารางที่ 2.3 สารที่ใช้ทำความเย็นภายในตัวโครโอินิกที่ความดัน 10 ¹³ mbar	24
ตารางที่ 2.4 แสดงค่าของอะตอมในเซลล์ดีและเซลล์เอฟ	28
ตารางที่ 2.5 แสดงฟังก์ชันเจาะจงของระบบที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว	32
ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 แสดงแผนการอธิบายพฤติกรรมการณ์เรืองแสงของสารประกอบของสาร ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi	2
รูปที่ 1.2 แสดงสเปกตรัมการกระตุ้นและสเปกตรัมการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ ที่ 4.2 K	2
รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ของ CaCO_3	6
รูปที่ 2.2 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ของ CaCO_3	7
รูปที่ 2.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตาม กฎของแบรกก์	9
รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน	11
รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเรืองแสงและ ไม่เรืองแสง	12
รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน (ก) แอนติ-สโตกส์ (anti-stokes) (ข) ปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบปกติ	13
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เปล่งออกมากับ ความยาวคลื่น	13
รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงโดยการเจือสาร 2 ชนิด จะมี เซนซิไทเซอร์เป็นตัวดูดกลืนแสง และแอกติเวเตอร์เป็นตัวปลดปล่อย แสงโดยรับพลังงานมาจากเซนซิไทเซอร์	14
รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงของพาหะ (ก) แสดงถึงตัวแอกติเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H) (ข) แสดงทั้งเซนซิไทเซอร์ (S) และแอกติเวเตอร์ (A) ใน โครงผลึกเจ้าบ้าน (H)	14
รูป 2.10 แผนภาพแสดงการเรืองแสงในระดับพลังงานของสารเจือที่มีระดับ พลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า	15
รูป 2.11 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเรืองแสงของพาหะ อิสระระหว่างแถบนำและแถบเวเลนซ์	16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.12 แสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮล ที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (กรณี ซ้าย) และการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้และโฮลอิสระ (กรณีขวา)	16
รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเรืองแสงของศูนย์กลางชนิด F ใน KCl	17
รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงเอ็กซ์ิตอนที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้	19
รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมการเรืองแสงของเอ็กซ์ิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวคู่ออมบ์ของ GaP:S	19
รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ	20
รูปที่ 2.17 แสดงแผนภาพการติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์	22
รูปที่ 2.18 สเปกตรัมของการแผ่รังสีของหลอดไฟแต่ละชนิด ระยะห่าง 50 ซม.	23
รูปที่ 2.19 แสดงการเชื่อมต่อของ L และ S สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยวชั้น p ชุดคู่ประกอบด้วยค่าของ j สองค่า	26
รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพการรวมเวกเตอร์สปินของระบบที่มีอิเล็กตรอน 2 ตัว	33
รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร	35
รูปที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร โดยการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเตาเผา	36
รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ	37
รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น Advance ซึ่งใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของ InBO ₃	38
รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ รุ่น RF-5301PC พร้อมด้วยโปรแกรมโรตารีและระบบทำความเย็นโดยเครื่องไคโอจีนิกที่ใช้ในการศึกษาคุณสมบัติการเรืองแสงของ InBO ₃ ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi , Si และ Ge	39

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการติดตั้งเครื่องมือในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง	41
รูปที่ 4.1 (a) แสดงรูป InBO_3 และ(b) แสดงรูป InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi	43
รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่มุม 2-Theta $10-80^\circ$	44
รูปที่ 4.3 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(1\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K	45
รูปที่ 4.4 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(10\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K	45
รูปที่ 4.5 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(20\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K	46
รูปที่ 4.6 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(30\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K	46
รูปที่ 4.7 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(40\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K	47
รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(1\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K	48
รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(10\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K	48
รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(20\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K	49
รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(30\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K	49
รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(40\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K	50
รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $1000/T$ ของ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}(1\%)$	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $1000/T$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}(10\%)$	51
รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $1000/T$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}(20\%)$	52
รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $1000/T$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}(30\%)$	52
รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $1000/T$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}(40\%)$	53
รูปที่ 4.18 แสดงแถบการกระตุ้นและการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}(1\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K	53
รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}(1\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K	54
รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $1000/T$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}(1\%)$	54
รูปที่ 4.21 แสดงแถบการกระตุ้นและการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}(1\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K	55
รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}(1\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K	55
รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $1000/T$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}(1\%)$	56

บทที่ 1

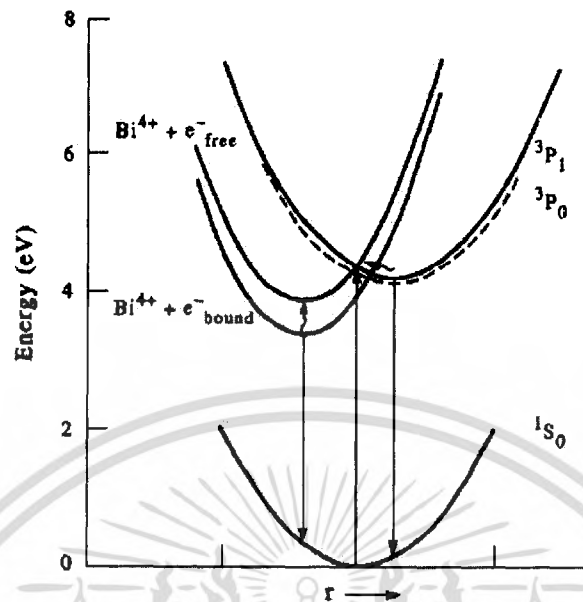
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของโครงการพิเศษ

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ คือวิธีการใช้ในการศึกษาชนิดและปริมาณของสารเจือหรือข้อบกพร่องของผลึก ซึ่งใช้หลักการเรืองแสงของผลึกภายใต้การกระตุ้นด้วยแสงจากแหล่งกำเนิดที่เหมาะสม แสงที่ใช้กระตุ้นอาจเป็นอัลตราไวโอเล็ตจากหลอดไอปรอทหรือแสงจากเลเซอร์ชนิดต่างๆ อิเล็กตรอนในเนื้อวัสดุ โดยเฉพาะที่บริเวณผิวหน้าของเนื้อวัสดุจะดูดกลืนพลังงานแล้วเคลื่อนย้ายระดับพลังงานไปยังระดับพลังงานที่สูงขึ้น หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานตกกลับลงมายังสถานะพื้นผ่านระดับพลังงานที่ปรากฏภายในช่องว่างแถบพลังงานแล้วปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของโฟตอน [1]

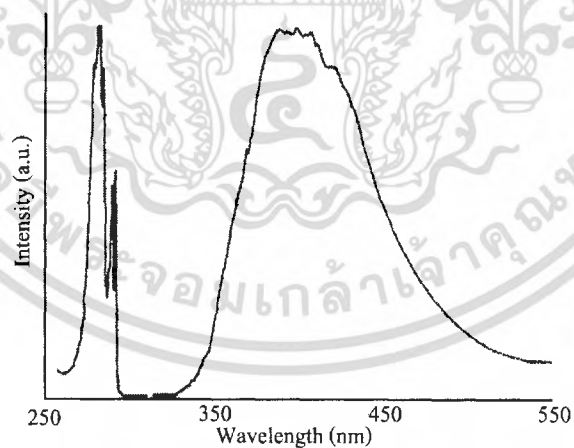
ในปี 1976 Raghavan ได้เสนอวิธีการในการตรวจจับนิวตริโนจากดวงอาทิตย์ โดยผ่านปฏิกิริยานิวเคลียร์คือ $\nu(E > 128\text{keV}) + {}^{115}\text{In} \longrightarrow e^- + {}^{115}\text{Sn}^*$ จากนั้นนิวเคลียสของธาตุ ${}^{115}\text{Sn}^*$ จะปล่อยรังสีแกมมาที่มีพลังงาน 116 และ 496 keV โดยที่ ${}^{115}\text{Sn}^*$ มีช่วงชีวิต 3.2 μs ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ที่จะสร้างตัวตรวจจับที่เป็นวัสดุของแข็ง InBO_3 เป็นสารประกอบที่มี In^{3+} ในปริมาณมากจึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับนิวตริโน [2] โดยที่ผ่านมาก็ได้มีการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของ InBO_3 และ InScBO_3 ที่เจือด้วย Ce^{3+} โดย Gaewdang et al. [3] โดยการเจือ Ce^{3+} ลงใน InBO_3 โดย K. Tanaka et al. [4] แถบการเรืองแสงจะเกิดจาก ${}^4\text{T}_2 \rightarrow {}^4\text{A}_2$ ซึ่งสามารถนำไปทำเป็นลูมิเนสเซนซ์โซลา คอนเซนเตรเตอร์ (luminescent solar concentrator) และ โซลิดสเตทเลเซอร์ (solid state laser) และการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วย Tb^{3+} โดย Chaminade et al. [5] พบว่าช่วงชีวิตของการเรืองแสงของ Tb^{3+} มีค่า 94 ms ที่อุณหภูมิห้องซึ่งค่อนข้างยาว นอกจากนั้นยังมีการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของ $\text{InLuBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ โดย Dotsenko et al. [6] และที่ผ่านมาก็ได้รายงานถึงสมบัติการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ ซึ่งมีโครงสร้างแบบแคลไซต์ประกอบด้วยประจุบวก (cation) ที่ถูกล้อมรอบด้วยอะตอมของออกซิเจน 6 ตัวที่มีรูปแบบเป็นออกตะฮีดรอล (octahedral) ตำแหน่งที่สมมาตรสำหรับไอออนลบคือ s_6 โดยกลุ่มบอเรต $(\text{BO}_3)^-$ ถูกแยกออกในโครงสร้างของ ผลึกสเปกตรัมการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ แสดงลักษณะเฉพาะโดยโครงสร้างที่เกิดการสั่นและการเลื่อนไปของสโตกส์ (stokes shift) เล็กน้อย โดยที่อุณหภูมิต่ำการเรืองแสง จะเกิดจาก ${}^3\text{P}_0 \rightarrow {}^1\text{S}_0$ อุณหภูมิสูงการเรืองแสงจะเกิดจาก ${}^3\text{P}_1 \rightarrow {}^1\text{S}_0$ โดยได้แสดงพฤติกรรมเรืองแสงของสารประกอบของธาตุที่เจือด้วยอะตอมของ Bi

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 แสดงแผนการอธิบายพฤติกรรมของแสงของสารประกอบของสารที่เจือด้วยอะตอมของ Bi

โดยแสดงในรูปที่ 1.1 แสดงแถบกว้างของการเรืองแสงด้วยค่าสูงสุดที่ประมาณ 400 nm (3.1eV) ซึ่งสอดคล้องกับแถบการกระตุ้นสูงสุดที่ 280 nm (4.36eV) การเลื่อนไปของสโตกส์ของการเรืองแสงนี้มีค่าประมาณ 120 nm (1.26 eV) ซึ่งแสดง โครงสร้างที่เกิดการสั่นที่ 4.2 K [7]



รูปที่ 1.2 แสดงสเปกตรัมการกระตุ้นและสเปกตรัมการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ ที่ 4.2 K

โดยช่วงเวลาในการสลายตัวของแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วย Bi^{3+} มีค่าประมาณ 200 μs ที่ 4.2 K และมีค่าประมาณ 2 μs ที่ 300 K สำหรับการเลื่อนไปของสโตกส์ 1.26 eV เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่านี้มีค่ามากกว่าที่พบในการเรืองแสงของ Bi^{3+} ในสารประกอบบอเรตอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างแบบแคลไซต์ ซึ่งมีค่าประมาณ 0.20-0.25 eV ซึ่งเป็นสภาวะที่คล้ายคลึงกับที่เคยสังเกตใน $\text{InBO}_3 : \text{Sb}^{3+}$ ในการสังเกตของการเลื่อนไปของสโตกส์ที่มีค่ามากและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ ที่มีขนาดกว้างถูกพิจารณาว่ามีความผิดปกติ (anomalous) ปรากฏการณ์นี้เคยให้เหตุผลด้วยการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง (photoionization) ตามไอออนของสารเจือ โดยการสร้างของสถานะคู่เอ็กซิตอน (exciton-like state) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสถานะถูกกระตุ้นของไอออน Bi^{3+} ใน InBO_3 ถูกทำให้มีตำแหน่งอยู่ในแถบนำซึ่งผิดแผกจาก ScBO_3 และ LuBO_3 การเรืองแสงที่ผิดปกติของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ ถูกอธิบายโดย Blasse et al. ตามการสลายตัวของเอ็กซิตอนที่ติดกับดักเนื่องจากสารเจือ (impurity-trapped exciton) ไปสู่สถานะพื้นของไอออน Bi^{3+} ซึ่งคล้ายคลึงกันกับผลการทดลองเมื่อไม่นานมานี้ของไอออน Eu^{2+} และ Yb^{2+} ในสารประกอบฟลูออไรด์หลาย ๆ ตัว [9] โดยในโครงการพิเศษนี้จะศึกษาพฤติกรรม การเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi และอะตอมของ Ge และ Si เพื่อศึกษาถึงผลที่จะเกิดขึ้นและเป็นสิ่งที่น่าสนใจในการพัฒนางานวิจัยนี้ต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi , Si และ Ge
2. ศึกษาโครงสร้างผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3
3. ตรวจสอบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi , Si และ Ge และศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการเรืองแสง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. เตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi , Si และ Ge ในปริมาณที่แตกต่างกัน
2. ตรวจสอบโครงสร้างผลึกของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ (X-Ray Diffractometer)
3. ตรวจสอบการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Si และ Ge ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
4. วิเคราะห์ผลและสรุปผลการวิจัย

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

แบ่งออกเป็น 6 ขั้นตอน ดังนี้

1. จัดสรรตารางการแบ่งเวลาของขั้นตอนในการวิจัย
2. นำเอกสารอ้างอิงที่ได้จากการค้นคว้ามาใช้เป็นข้อมูลและใช้เปรียบเทียบในการทำการวิจัย
3. ศึกษาอุปกรณ์ที่ต้องใช้ในงานวิจัย เช่น
 - เตาอุณหภูมิสูง
 - เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์
 - เครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
4. ทำการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้
 - อัดเม็ดสารตัวอย่างของ InBO_3 บริสุทธิ์เพื่อใช้เป็นตัวอย่างอ้างอิง
 - อัดเม็ดสารตัวอย่างที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Si และ Ge ในปริมาณ 1 กรัม
5. ทำการตรวจสอบสมบัติของสารประกอบเซรามิกส์ที่ได้ดังต่อไปนี้
 - ตรวจสอบโครงสร้างผลึกเชิงจุลภาคโดยใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์
 - ตรวจสอบสมบัติเรืองแสงของ InBO_3 ด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Si และ Ge ในปริมาณที่ต่างกันด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
 - ตรวจสอบสมบัติการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Si และ Ge ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ ที่อุณหภูมิต่างๆ กัน
6. วิเคราะห์ผลที่ได้จากการวิจัย และสรุปผลการวิจัย

ตารางที่ 1.1 แสดงผลระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินงาน	ระยะเวลาในการดำเนินงานวิจัย									
	มี.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.
1	----->									
2		----->								
3			----->							
4				----->						
5					----->					
6						----->				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงหลักการทํางานและวิธีการใช้อุปกรณ์ต่างๆที่ใช้ในงานวิจัย เช่น เตาอุณหภูมิสูง เครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ เครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ เป็นต้น
2. ทราบถึงวิธีการและขั้นตอนในการเตรียมผงเซรามิกส์
3. ทราบถึงโครงสร้างของ InBO_3
4. ทราบถึงผลของชนิดของสารเจือ และปริมาณของสารเจือที่มีต่อสมบัติทางการเรืองแสงของ InBO_3
5. ทราบถึงผลของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติทางการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Si และ Ge
6. ใช้เป็นพื้นฐานเพื่อนำไปใช้ในการศึกษารวอื่นๆต่อไปและเป็นแรงกระตุ้นในการวิจัยสารเซรามิกส์ชนิดใหม่ๆ

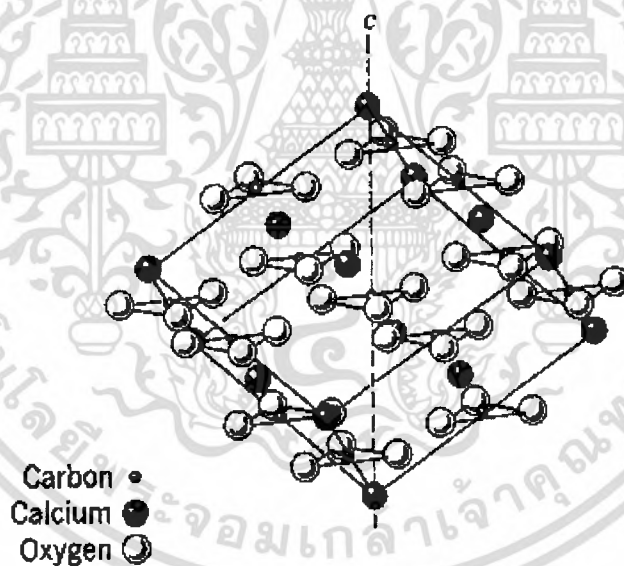
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

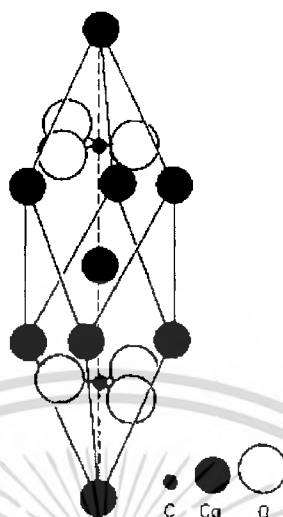
ในโครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 และสมบัติด้านการเรืองแสงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Ge และ Si ซึ่งจะได้อธิบายทฤษฎีและหลักการในส่วนที่มีความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ ซึ่งประกอบไปด้วยลักษณะโครงสร้างของโครงผลึกแบบแคลไซต์ การศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์และหลักการเกี่ยวกับการเรืองแสงของสารซึ่งเป็นวัตถุประสงค์หลักของโครงการพิเศษนี้

2.1 โครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ (Calcite structure) [10-12]



รูปที่ 2.1 แสดงโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ของ CaCO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 แสดงหนึ่งหน่วยเซลล์ของ โครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ของ $CaCO_3$

ในรูปที่ 2.1 ถ้าพิจารณาตามแนวแกน c จากบนลงล่าง จะพบไอออน Ca^{2+} ที่ปลายของ รอมบอฮีดรอนที่แสดงให้เห็น จากนั้นจะพบกลุ่ม CO_3^{2-} ที่จุดศูนย์กลางของรอมบอฮีดรอนและจะ พบไอออน Ca^{2+} อีกครั้งที่ตำแหน่งสุดท้าย ไอออน Ca^{2+} ตัวแรกใน 3 ตัว ที่เหมือนกันนี้จะมี ลักษณะเช่นเดียวกับไอออน Ca^{2+} ตัวบนของหนึ่งหน่วยเซลล์ที่แสดงในรูปที่ 2.2 กลุ่ม CO_3^{2-} ที่จุด ศูนย์กลางของรอมบอฮีดรอนมีลักษณะเช่นเดียวกันกับกลุ่ม CO_3^{2-} ด้านบนในรูปที่ 2.2 ไอออน Ca^{2+} ตัวที่ 2 ใน 3 ตัวที่เหมือนกันที่ตำแหน่งต่ำกว่าด้านล่างของรอมบอฮีดรอนมีลักษณะ เช่นเดียวกับไอออน Ca^{2+} ตำแหน่งตรงกลางในรูปที่ 2.2

หนึ่งหน่วยเซลล์ของโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ของ $CaCO_3$ ซึ่งเป็นรอมบอฮีดรอน ที่ยืดออก โดยประกอบด้วยกลุ่ม CO_3^{2-} ที่จัดเรียงตัวต่างกัน 2 กลุ่ม โดยกลุ่มหนึ่งมีตำแหน่ง อยู่บนไอออน Ca^{2+} ตัวกลางและอีกกลุ่มอยู่ด้านล่างไอออน Ca^{2+} ตัวกลาง หนึ่งหน่วยเซลล์นี้ ประกอบด้วยอะตอม Ca^{2+} 2 อะตอม $[(8 \times 1/8) + 1]$ และกลุ่ม CO_3^{2-} 2 กลุ่ม ดังนั้นหนึ่งหน่วยเซลล์นี้ ประกอบด้วย $CaCO_3$ 2 ชุด

นอกเหนือจากสารประกอบคาร์บอเนตที่มีโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ สารประกอบ บอเรตก็มีโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์เช่นกัน ซึ่งได้แสดงข้อมูลของโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ ของสารประกอบบอเรต ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลของโครงสร้างผลึกแบบแคลไซต์ของสารประกอบบอเรต
(MBO₃) [6-8]

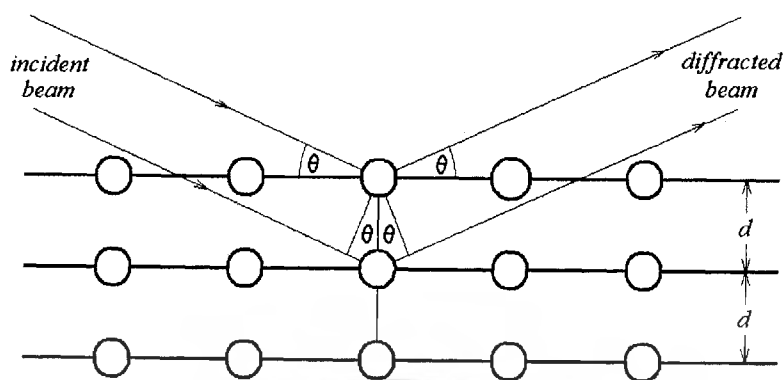
M	Electron configuration	Host cation radius (Å)	Cell parameters		
			a (Å)	c (Å)	c/a
Ga	3d ¹⁰ 4s ² 4p ¹	0.645	4.568	14.182	3.11
Sc	3d ¹ 4s ²	0.745	4.759	15.321	3.22
In	4d ¹⁰ 5s ² 5p ¹	0.800	4.823	15.456	3.21
Lu	4f ⁴ 5d ¹ 6s ²	0.861	4.915	16.211	3.30

2.2 การศึกษาโครงสร้างผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [1,13-15]

การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์โดยวิธี $\theta - 2\theta$ ดิฟแฟรคโตมิเตอร์ เป็นวิธีที่ใช้ในการจำแนกลักษณะโครงสร้างของผลึก ซึ่งอาศัยรังสีเอ็กซ์ที่มีความยาวคลื่นค่าเดียวจากแหล่งกำเนิดตกกระทบกับสารตัวอย่างซึ่งอาจเป็นผลึกเดี่ยวหรือผลึกพหุพันธ์ก็ได้ ซึ่งสารตัวอย่างจะหมุนเป็นมุม θ ในขณะที่อุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณรังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปเป็นมุม 2θ และเมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านโครงสร้างของผลึกออกมาจะเกิดการแทรกสอดแบบหักล้างและแบบเสริม โดยแบรกก์ได้เสนอว่าผลึกมีการจัดเรียงตัวเป็นระนาบของอะตอมซึ่งสามารถสะท้อนคลื่นที่ตกกระทบโดยมีมุมตกกระทบเท่ากับมุมสะท้อน ทั้งนี้รังสีเอ็กซ์จะแทรกสอดกันแบบเสริมมากที่สุดเมื่อมีการกระเจิงออกจากแต่ละระนาบด้วยความแตกต่างของทางเดินคลื่น (path difference) เป็นจำนวนเท่าระนาบของความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์ซึ่งเรียกว่า กฎของแบรกก์ ดังสมการ

$$n\lambda = 2d_{hkl} \sin \theta \quad (1)$$

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



รูปที่ 2.3 แสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์บนระนาบของผลึกที่เป็นไปตามกฎของแบรกก์

โดยในระนาบที่รังสีเอ็กซ์ตกกระทบแล้วกระเจิงออกมาโดยสอดคล้องกับกฎของแบรกก์ จะเรียกว่าระนาบแบรกก์และมุมที่รังสีสะท้อนทำกับระนาบที่ขนานกับรังสีตกกระทบเรียกว่ามุมเลี้ยวเบนซึ่งมีค่าเป็นสองเท่าของมุมสะท้อน

2.3 รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ [1,13-15]

รูปแบบของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์แสดงให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของรังสีเอ็กซ์กับมุมเลี้ยวเบน ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของธาตุหรือสารแต่ละประเภท จากการเลี้ยวเบนและการแทรกสอดแบบเสริม จะทำให้ความเข้มของรังสีเอ็กซ์มีค่ามาก ซึ่งจะสังเกตได้จากตำแหน่งพิกัดในรูปแบบการเลี้ยวเบน และพิกัดเหล่านี้จะปรากฏที่มุมเลี้ยวเบนเดิมสำหรับธาตุหรือสารประกอบชนิดเดียวกัน และจะมีตำแหน่งของพิกัดที่มุมของการเลี้ยวเบนต่างกันสำหรับธาตุหรือสารประกอบต่างชนิดกัน การวิเคราะห์โครงสร้างของผลึกทำได้โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนของสารตัวอย่างกับไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผลึก ซึ่งเป็นฐานข้อมูลเกี่ยวกับรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของธาตุหรือสารประกอบต่างๆ โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนจากไฟล์มาตรฐานนั้นทำได้โดยการเปรียบเทียบตำแหน่งของระนาบที่ทำให้เกิดการเลี้ยวเบนออกมา โดยการระบุระนาบจะใช้สัญลักษณ์ (hkl) ซึ่งมีชื่อเรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ ซึ่งดัชนีมิลเลอร์จะเป็นส่วนกลับของจุดที่ระนาบตัดแกนผลึก

2.4 ลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) [1,16]

ลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) เป็นชื่อเรียกปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเรืองแสงทั้งหมด นอกเหนือจากการเรืองแสงชนิดการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) และชนิดการแผ่รังสีเซอเรนคอฟ (cerenkov radiation) การเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์เกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่สถานะระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ลูมิเนสเซนซ์สังเกตได้ทั้งในวัสดุก๊าซ ของเหลว และของแข็งและทั้งวัสดุชนิดอินทรีย์และอินทรีย์ วิธีการกระตุ้นให้พลังงานแก่วัสดุมีได้หลายวิธี เช่น การส่องแสง การยิงลำอิเล็กตรอน การยิงลำไอออน การเพิ่มความกดดัน การเพิ่มความร้อน การทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี การป้อนสนามไฟฟ้า และการผ่านกระแสไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งแสดงชนิดของลูมิเนสเซนซ์โดยแบ่งตามวิธีการกระตุ้น ดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 แสดงชนิดของลูมิเนสเซนซ์ตามวิธีการกระตุ้น

ชนิดของลูมิเนสเซนซ์	วิธีการกระตุ้น
โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence : PL) - ชนิดสโตกส์ (stokes type) - ชนิดแอนติสโตกส์ (anti-stokes type)	แสง
อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence : EL) - อินทรินซิกอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (intrinsic EL) - ไดโอดเรืองแสง (carrier Injunction EL : LED)	ไฟฟ้า
คาโทดลูมิเนสเซนซ์ (cathode-luminescence)	อิเล็กตรอน
เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (thermo-luminescence)	ความร้อน
ไตรโบลูมิเนสเซนซ์ (tribo-luminescence)	การเสียดสี
เคมีคัลลูมิเนสเซนซ์ (chemical-luminescence)	ปฏิกิริยาเคมี
เอ็กซ์เรย์ลูมิเนสเซนซ์ (x-ray-luminescence)	รังสีเอ็กซ์

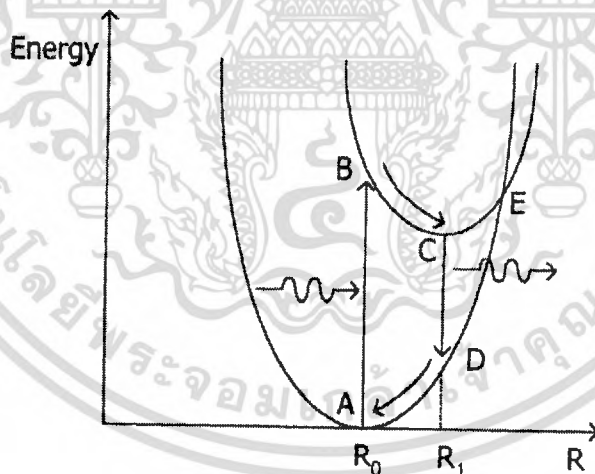
ในกรณีของหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนต์จะทำงาน โดยเริ่มจากปรอทที่บรรจุอยู่ภายใน หลอดจะถูกกระตุ้นโดยสนามไฟฟ้าให้เกิดการคายประจุ (discharge) ทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเล็ต จากนั้นรังสีอัลตราไวโอเล็ตจะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่เคลือบอยู่บริเวณผิวด้านในของหลอดทำให้เกิดแสงสว่างที่ตามนุษย์มองเห็นได้ แยกกรณีจอภาพโทรทัศน์ชนิด CRT (cathode ray tube) สว่าง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้เพราะสารเรืองแสงชนิดฟอสฟอรัส (phosphors) ถูกกระตุ้นด้วยลำอิเล็กตรอนที่ถูกยิงออกมาจากปืนอิเล็กตรอน (electron gun) กรณีไดโอดเรืองแสง (LED) นั้นเรืองแสงได้เพราะมีกระแสไฟฟ้าผ่านเข้าไป ปฏิกิริยาการเรืองแสงเหล่านี้มีความสำคัญมากต่อประสิทธิภาพของมนุษย์ทำให้ตาของมนุษย์มองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ ทำให้มนุษย์สามารถรับรู้และอ่านข้อมูลจากหน่วยแสดงผลได้ด้วยตา และทำให้มนุษย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้อย่างมีความสุข

2.5 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) [1,17-20]

โฟโตลูมิเนสเซนซ์แบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ

1. ฟลูออเรสเซนซ์ จะเกิดการเรืองแสงในขณะที่มีการกระตุ้น กลไกคือจะมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) สั้นๆ น้อยกว่าหรือเท่ากับ 10^{-8} วินาที
2. ฟอสฟอรัสเซนซ์ จะเกิดการเรืองแสงภายหลังที่มีการกระตุ้นจึงมีค่าชีวิตของพาหะ (life time) นานกว่าแบบฟลูออเรสเซนซ์ คืออาจมีค่าประมาณ 10^{-3} วินาที หรืออาจเป็นชั่วโมง

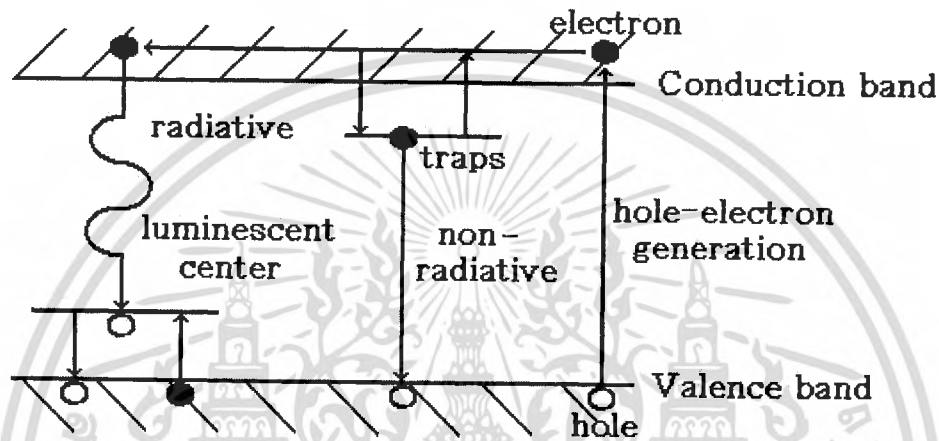


รูปที่ 2.4 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน

จากรูปที่ 2.4 อิเล็กตรอนที่อยู่ตำแหน่ง A เมื่อดูดกลืนพลังงานโฟตอนจะถูกกระตุ้นจนไปอยู่ที่ตำแหน่ง B และหลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานไปอยู่ที่ตำแหน่งใหม่ (R_1) และอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากตำแหน่ง B ไปยัง C ได้ปล่อยโฟนอน (non-radiative) ออกไป หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากจุด C ไปยัง D และเรืองแสง (radiative)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะมีโฟตอนเกิดขึ้นและที่ตำแหน่ง D ไอออนรอบ ๆ จะรีแลกเซชันเพื่อกลับไปยังตำแหน่ง R_0 ที่ตำแหน่ง C เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่ทำให้การเรืองแสงหายไป (quenching temperature) อิเล็กตรอนจะไปอยู่ที่ตำแหน่ง E ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนในสถานะกระตุ้น (excited state) สามารถกลับมาที่สถานะพื้น (ground state) ได้เลย โดยพลังงานค่าเดิมจะไม่มี การเรืองแสงออกมา (non-radiative)

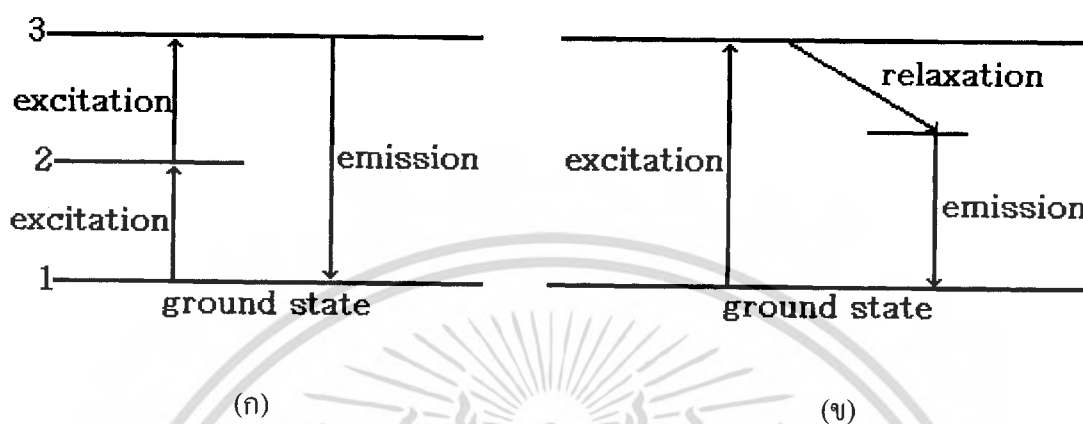


รูปที่ 2.5 แสดงกระบวนการการรวมตัวของพาหะที่ทำให้เกิดการเรืองแสงและไม่เรืองแสง

จากรูปที่ 2.5 เมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้น อิเล็กตรอนจะเกิดการเลื่อนไปจากตำแหน่งเดิม หากอิเล็กตรอนนี้ถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอน (trap) และย้ายสถานะพลังงานไปยังแถบวาเลนซ์จะเป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการเรืองแสง (non-radiative) แต่ถ้าอิเล็กตรอนนี้ย้ายสถานะพลังงานผ่านที่ศูนย์กลางเรืองแสง (luminescent center) จะเกิดการเรืองแสงออกมา แต่โดยทั่วไปในสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนมักจะถูกจับไว้ในกับดักอิเล็กตรอนมากกว่าจึงทำให้สารกึ่งตัวนำไม่ค่อยเกิดการเรืองแสง

จากปรากฏการณ์การเรืองแสงแบบปกติ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาในการเรืองแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น แต่ในปรากฏการณ์ แอนติ-สโตคส์ พลังงานที่ถูกปลดปล่อยออกมาจะมีค่าสูงกว่าพลังงานกระตุ้น เนื่องจากอะตอมของธาตุบางชนิดมีระดับพลังงานที่ตรงกึ่งกลางพอดี เมื่อใช้พลังงานกระตุ้นที่มีค่าเท่ากับระดับพลังงาน 1 ไป 2 นั้นจะเปรียบเสมือนว่าให้พลังงานกระตุ้นจากระดับพลังงาน 2 ไป 3 ด้วย ดังนั้นในที่สุดอิเล็กตรอนจะย้ายสถานะพลังงานจากระดับพลังงาน 1 ไป 3 เมื่อให้พลังงานกระตุ้นภายในครั้งเดียว และจากนั้นจะย้ายสถานะพลังงานจาก

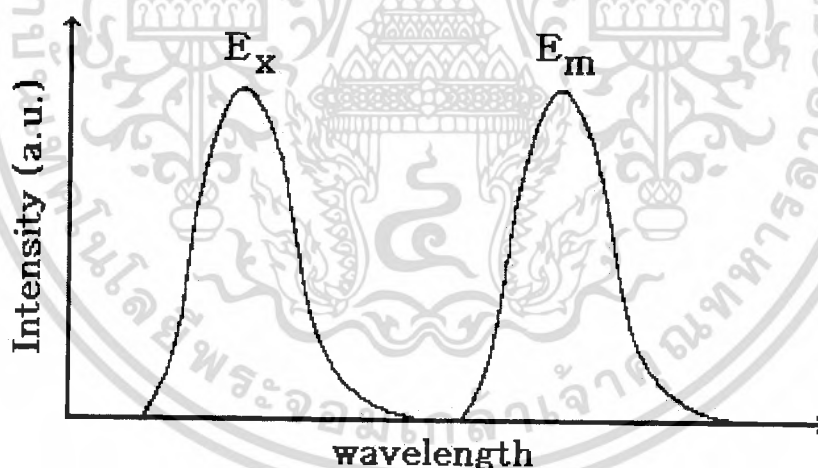
ระดับพลังงาน 3 มายังระดับพลังงาน 1 โดยปลดปล่อยพลังงานออกมา ดังนั้นพลังงานโฟตอนที่ปลดปล่อยออกมาจึงมีค่ามากกว่าพลังงานโฟตอนกระตุ้นที่ใส่เข้าไปดังรูปที่ 2.6 (ก)



รูปที่ 2.6 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอน

(ก) แอนติ-สโตกส์ (anti-stokes)

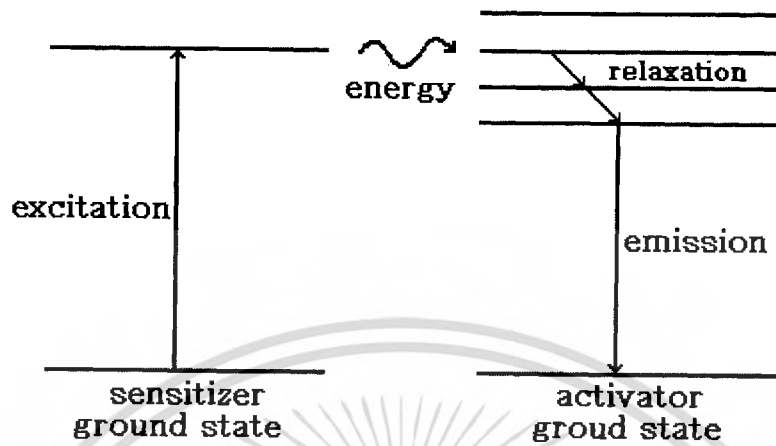
(ข) ปรัชการณณ์การเรืองแสงแบบปกติ



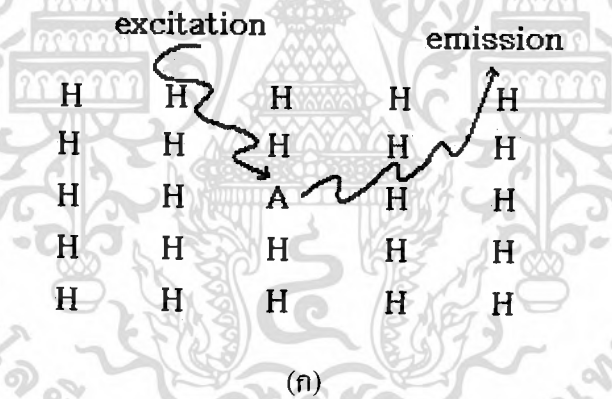
รูปที่ 2.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงที่เปล่งออกมากับความยาวคลื่น

จากรูปที่ 2.7 จะเห็นว่าพลังงานของการเรืองแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานกระตุ้น โดยเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลื่อนไปของสโตกส์ (stokes shift) พลังงานที่หายไปจะถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนให้กับโครงผลึก (lattice) โดยที่ E_x และ E_m คือ แถบพลังงานการกระตุ้นและแถบพลังงานของการเรืองแสงตามลำดับ

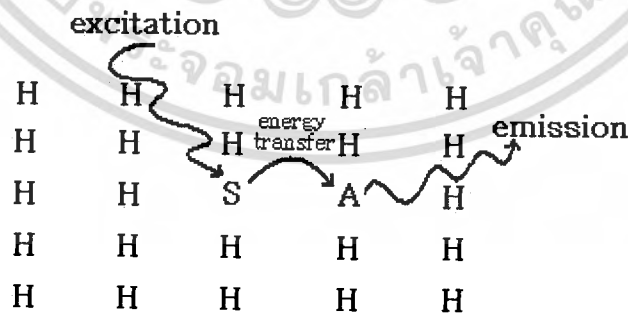
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงโดยการเจือสาร 2 ชนิด จะมีเซนซีไทซ์เซอร์เป็นตัวดูดกลืนแสง และแอคทีเวเตอร์เป็นตัวปลดปล่อยแสงโดยรับพลังงานมาจากเซนซีไทซ์เซอร์



(ก)



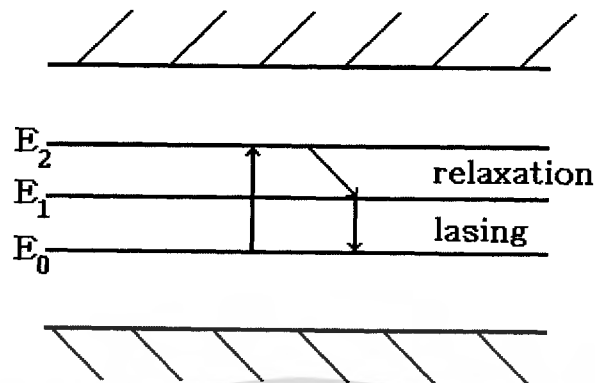
(ข)

รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงกระบวนการเรืองแสงของพาหะ

(ก) แสดงถึงตัวแอคทีเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H)

(ข) แสดงทั้งเซนซีไทซ์เซอร์ (S) และแอคทีเวเตอร์ (A) ในโครงผลึกเจ้าบ้าน (H)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการเรืองแสงในระดับพลังงานของสารเจือที่มีระดับพลังงานภายในช่องว่างแถบพลังงานหลายค่า

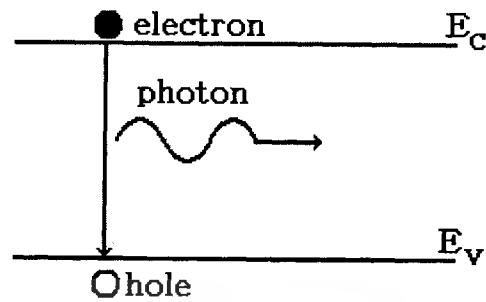
เมื่อไอออนถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานขึ้นไปในระดับพลังงานสูงสุดของสารเจือ จากนั้นจะเกิดการผ่อนคลาย (relaxation) หลังจากนั้นจะเกิดการเรืองแสง (lasing) ตกกลับลงมาที่ระดับพลังงานต่ำที่สุดของสารเจือ และจะเรืองแสงในตัวของมันเองออกมา

2.6 กลไกการเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์ [1,16]

กลไกการเรืองแสงแบบลูมิเนสเซนซ์เกิดจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ โดยสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้

2.6.1 การเรืองแสงที่เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวโดยตรงกับโฮลในแถบวาเลนซ์ [1,16]

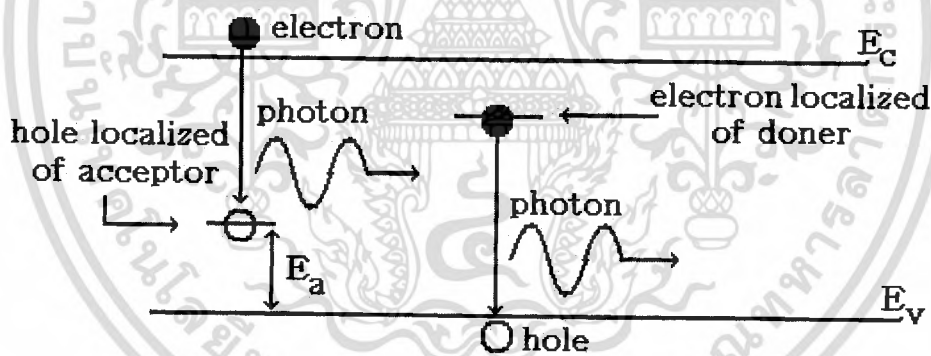
เป็นการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (band-to-band transition) กล่าวคือเป็นการรวมตัวกัน โดยตรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบนำตกลงมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ถ้าสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดช่องว่างแถบพลังงานแบบตรง (direct band gap) แสงที่เปล่งออกมาจะมีพลังงานโฟตอนเท่ากับขนาดของช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการย้ายสถานะพลังงานแบบมีการเรืองแสงของพาหะอิสระระหว่างแถบนำและแถบเวเลนซ์

2.6.2 การเรืองแสงเนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่ในระดับพลังงานย่อยร่วมกัน [1,16]

เกิดจากอิเล็กตรอนในแถบนำรวมตัวกับโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ หรืออิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ในระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้รวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบวาเลนซ์ โดยการย้ายสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนดังกล่าวได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 แสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับ (กรณีซ้าย) และการเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้และโฮลอิสระ (กรณีขวา)

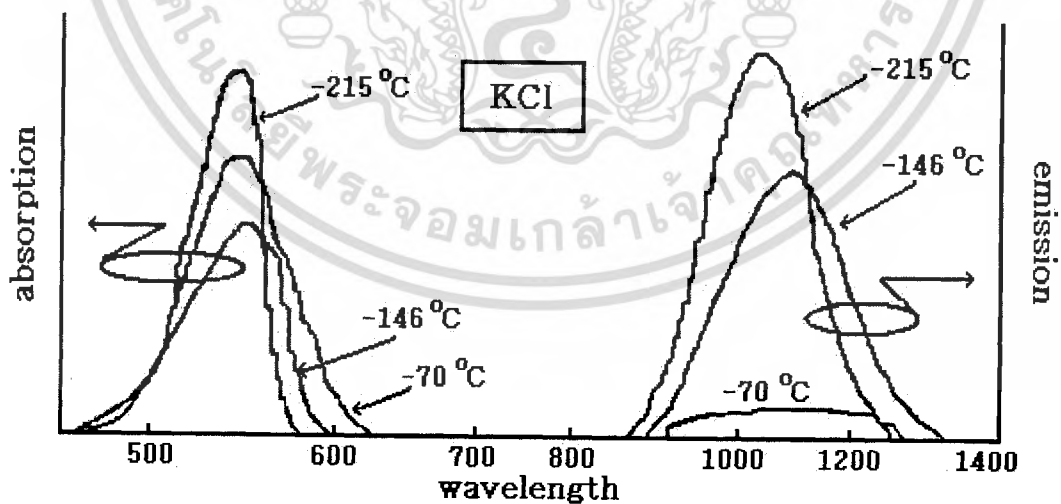
2.6.3 การเรืองแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับโลคอลไลซ์ [1,16]

เกิดจากการย้ายสถานะของอิเล็กตรอนที่มีสถานะพลังงานแบบโลคอลไลซ์ (localized states-to-localized states) ตัวอย่างเช่น การเรืองแสงจากศูนย์กลางชนิด F (F-centers) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในวัสดุชนิดอัลคาไลน์แฮไลด์ ซึ่งผลึกของวัสดุชนิดนี้เมื่อถูกอบให้ร้อนภายในบรรยากาศของโลหะตระกูลอัลคาไลน์ (เช่น Li, Na, K, Rb, Cs และ Fr) จะทำให้อะตอมของโลหะอัลคาไลน์แพร่ซึมเข้าไปในเนื้อผลึกอัลคาไลน์แฮไลด์และทำให้ในเนื้อผลึกนั้นมีจำนวนอะตอมชนิดแฮไลด์ (เช่น F, Cl, Br, I และ At) ที่ไม่สมดุลกับอะตอมอัลคาไลน์ นั่นคือเปรียบเสมือนกับเกิดช่องว่างที่ขาดอะตอมแฮไลด์ จากนั้นเพื่อให้สภาพทางไฟฟ้าเป็นกลางอิเล็กตรอนจะวิ่งไปจับอยู่ที่ช่องว่างของแฮไลด์เปรียบเสมือนว่าช่องว่างนั้นเป็นไอออนบวก และอิเล็กตรอนจะถูกแรงดึงดูดบีบอัดไว้คล้ายกับแบบจำลองของอะตอมไฮโดรเจน และอิเล็กตรอนเหล่านั้นมีสถานะพลังงานอยู่ที่สถานะพื้น ต่อจากนั้นเมื่อฉายแสงส่องเข้าสู่ผลึก แสงนั้นจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนย้ายสถานะจากสถานะพื้นให้ขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้นจึงเกิดการดูดกลืนแสงขึ้น หลังจากนั้นเมื่ออิเล็กตรอนย้ายสถานะพลังงานกลับคืนสู่สถานะพื้นจะมีการเรืองแสงที่มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงที่ตามองเห็นออกมา จึงทำให้ผลึกนั้นมีสีตามความยาวคลื่นของแสงที่ถูกเปล่งออกมา เราเรียกการเกิดข้อบกพร่องของโครงสร้างผลึกเช่นนี้ว่าเป็นการเกิดศูนย์กลางสี (color centers) หรือ ศูนย์กลางเอฟ ซึ่งย่อมาจากผู้ค้นพบคือ ฟาร์บี-เซนเทอม

รูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและการเรืองแสงของผลึก KCl จากรูปจะพบว่าพลังงานโฟตอนของการเรืองแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานโฟตอนของการดูดกลืนแสง เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า การเลื่อนไปของสโตกส์ พลังงานโฟตอนส่วนที่ขาดไปนั้นถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนให้กับโครงสร้างผลึกตามกฎของแฟรง-คอนดอน



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเรืองแสงของศูนย์กลางชนิด F ใน KCl

2.6.4 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอน [1,16]

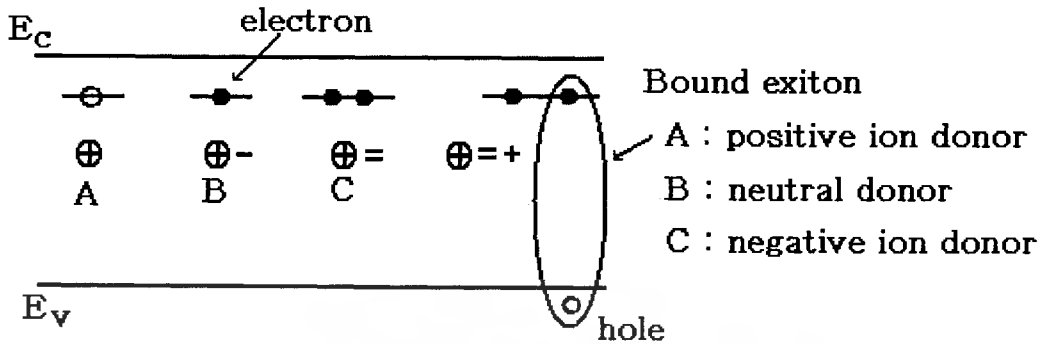
เอ็กซิตอน คือ คู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้น แต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นนั้น ยังมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้พาหะทั้งคู่แยกออกจากกันเป็นอิสระได้ กล่าวคือ ยังมีแรงคูลอมบ์ดึงดูดให้อิเล็กตรอนและโฮลจับกันอยู่เป็นคู่ๆ และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและโฮลยังอยู่ภายในช่องว่างพลังงานเมื่ออิเล็กตรอนและโฮลดังกล่าวเกิดการรวมกันจะปลดปล่อยพลังงานออกมาโดยเอ็กซิตอนมี 2 ชนิด คือ

- เอ็กซิตอนชนิดที่เป็นอิสระ (free exciton) การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนชนิดอิสระนี้มีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานเล็กน้อย
- เอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว (bound exciton) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในเอ็กซิตอนชนิดนี้อยู่ใกล้กันมาก ดังนั้นพลังงานโฟตอนของแสงที่ถูกเปล่งออกมาจากการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานมาก

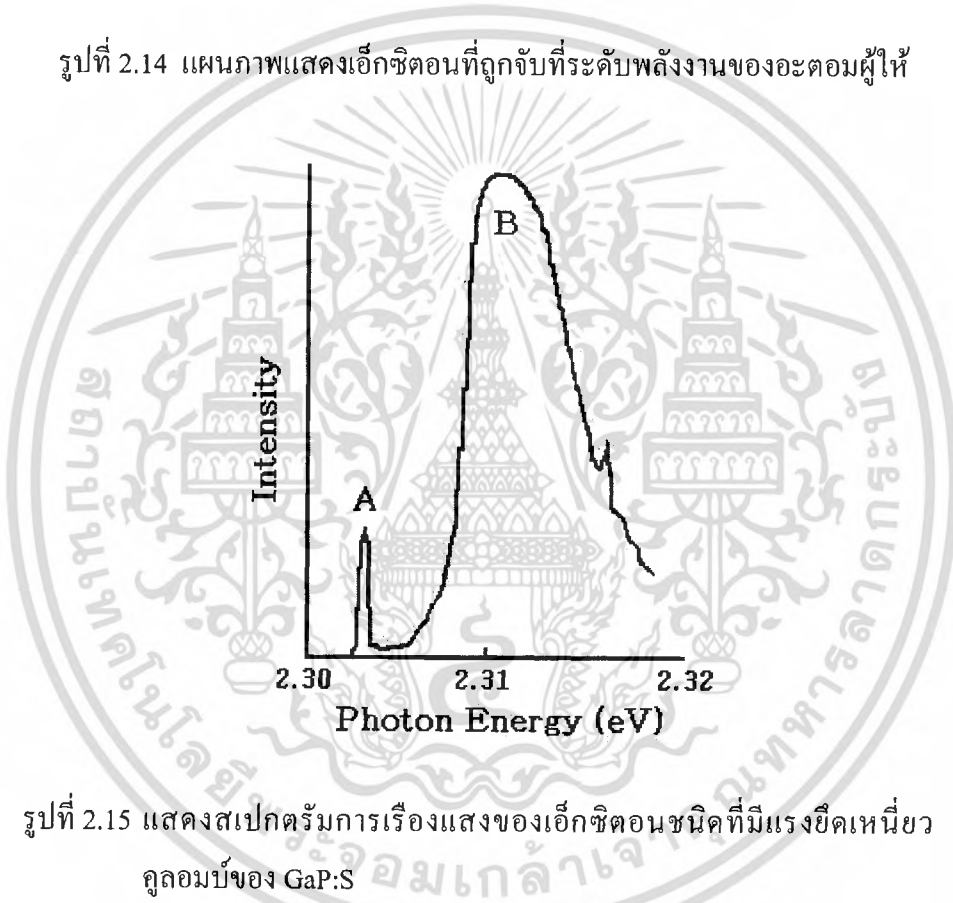
2.7 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนในลักษณะต่างๆ [1,16]

2.7.1 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้ [1,16]

การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับโดยอะตอมผู้ให้ ตัวอย่างเช่น การเจือสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP ด้วยอะตอม S จะทำให้อะตอม S เข้าไปแทนที่อะตอม P และอะตอม S จะทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้ ในสภาพที่อะตอม S จับอิเล็กตรอนไว้นั้นอะตอม S ยังมีสภาพไฟฟ้าเป็นกลาง แต่ถ้าอะตอม S ปลดปล่อยให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำ อะตอม S จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอออนบวก ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ “ + ” แทนไอออนบวกและสัญลักษณ์ “ + - ” แทนสภาพ S ที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวมาจับที่อะตอมผู้ให้ที่เป็นกลางนี้จะทำให้อะตอมผู้ให้ที่เป็นกลางเปลี่ยนสภาพไปเป็นไอออนลบ ซึ่งสามารถแทนไอออนลบได้ด้วยสัญลักษณ์ “ + = ” รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะของการเกิดเอ็กซิตอนลักษณะดังกล่าว ในสภาพเช่นนี้ถ้าบังเอิญมีโฮลวิ่งเข้ามาใกล้ไอออนลบนี้โฮลจะถูกแรงคูลอมบ์จากไอออนลบดึงดูดไว้และทำให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวดังแสดงในรูปที่ 2.14 ด้านริมขวาและถ้าคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้มีการรวมตัวกันก็จะเกิดการเรืองแสงออกมา โดยรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการเรืองแสงจากเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยวใน GaP:S



รูปที่ 2.14 แผนภาพแสดงเอ็กซิตอนที่ถูกจับที่ระดับพลังงานของอะตอมผู้ให้



รูปที่ 2.15 แสดงสเปกตรัมการเรืองแสงของเอ็กซิตอนชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว
 คูლობ์ของ GaP:S

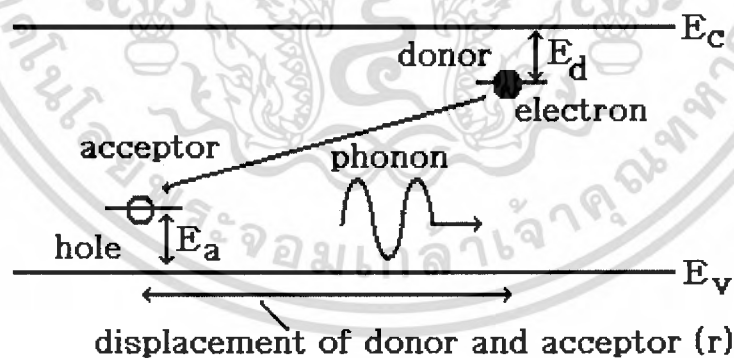
2.7.2 การเรืองแสงจากเอ็กซิตอนที่ถูกจับด้วยกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์
 (isoelectronic trap) [1,16]

พิจารณาตัวอย่างการเติมอะตอม N เข้าสู่ GaP ในกรณีนี้อะตอม N จะเข้าไปแทนที่อะตอม P แต่เนื่องจากทั้งอะตอม N และอะตอม P เป็นธาตุในหมู่ 5 เหมือนกัน เพราะฉะนั้นสภาพไฟฟ้าจึงเป็นกลางเหมือนเดิม กล่าวคืออะตอม N ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นอะตอมผู้ให้หรืออะตอมผู้รับแต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอะตอม N มีสมบัติในการดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าอะตอม P ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนในผลึกวิ่งวนมาใกล้อะตอม N ก็จะทำให้อะตอม N จับอิเล็กตรอนไว้ได้ดี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสภาพเช่นนี้กล่าวได้ว่าอะตอม N นั้นกำลังสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ กับดักชนิดนี้มีสภาพประจุไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถมีแรงดึงดูดโฮลซึ่งมีประจุบวกให้เข้ามาใกล้ได้ดี จึงส่งผลให้เกิดเป็นเอ็กซิตอนขึ้นมา อิเล็กตรอนและโฮลในเอ็กซิตอนชนิดนี้สามารถรวมตัวกันได้ง่าย จึงทำให้ประสิทธิภาพของการเรืองแสงมีค่าสูงมาก ตัวอย่างในกรณีผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP ซึ่งปกติเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีแถบพลังงานช่องว่างแบบไม่ตรง จึงมีประสิทธิภาพของการเรืองแสงไม่ดีนักแต่ถ้าเติมอะตอม N เข้าไปในผลึก GaP นี้จะสามารถสร้างกับดักไอโซอิเล็กทรอนิกส์ขึ้นในผลึกได้และเกิดเอ็กซิตอน และทำให้การรวมตัวของพาหะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก เปรียบเสมือนว่าผลึก GaP กลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดที่มีแถบพลังงานแบบตรง จึงได้มีการนำ GaP ไปประดิษฐ์เป็นไดโอดเรืองแสงอย่างแพร่หลาย และสามารถเรืองแสงสีแดงที่สว่างมากๆ ได้ดี

2.8 การเรืองแสงจากคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ (DA pair) [1,16]

การเรืองแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้ให้และโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับพลังงานผู้รับ โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพดีมาก รูปที่ 2.16 แสดงกลไกการรวมตัวของพาหะชนิดนี้ ตัวอย่างได้แก่การเจือ GaP ด้วย S ที่เป็นอะตอมผู้ให้และ C ที่เป็นอะตอมผู้รับพร้อมๆกัน



รูปที่ 2.16 แผนภาพแสดงการเรืองแสงที่เกิดจากการย้ายสถานะพลังงานระหว่างคู่ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ

สมบัติของการเรืองแสงชนิดนี้มีลักษณะเด่นหลายข้อซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

- ความน่าจะเป็นของการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล $W(r)$ ขึ้นกับระยะห่าง (r) ของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับ ถ้าระยะห่างของอะตอมผู้ให้และอะตอมผู้รับมีค่าน้อย จะมีการเรืองแสง ดังนี้

$$W(r) = W_{\max} e^{-\frac{r}{R_d}} \quad (2)$$

โดย W_{\max} คือ ค่าคงที่
 R_d คือ ค่ารัศมีของวงโคจรอิเล็กตรอนรอบอะตอมผู้ให้

- พลังงานโฟตอนของการเรืองแสง มีค่า

$$h\nu = E_g - (E_a + E_d) + \frac{q^2}{\epsilon_r} \quad (3)$$

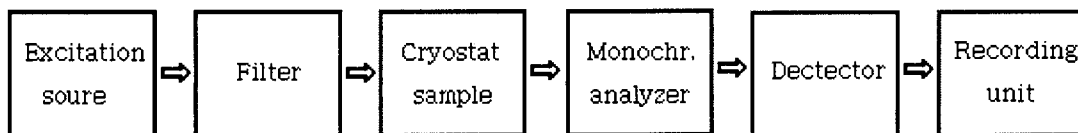
โดย E_g คือ ช่องว่างของแถบพลังงาน
 E_a, E_d คือ ระดับพลังงานของอะตอมผู้รับและอะตอมผู้ให้ ตามลำดับ
 q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
 ϵ_r คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของวัสดุ

- ถ้าเพิ่มความเข้มของแสงที่ใช้กระตุ้นจะทำให้สเปกตรัมของการเรืองแสงเลื่อนตำแหน่งไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากขึ้น
- หลังจากตัดแสงที่ใช้กระตุ้นออก และเมื่อเวลาผ่านไปสเปกตรัมของการเรืองแสงจะเลื่อนตำแหน่งไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยลง

2.9 หลักการติดตั้งโฟโตลูมิเนสเซนซ์ [1]

พื้นฐานการติดตั้งอุปกรณ์วัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์จะเป็นไปตามโคอะแกรมในรูปที่ 2.17 แหล่งกำเนิดโฟตอนที่ใช้กระตุ้นการเกิดลูมิเนสเซนซ์อาจเป็นเลเซอร์ หรือหลอดไฟโดยที่อาจจะเป็นสเปกตรัมต่อเนื่องหรือพัลส์ก็ได้ ก่อนที่จะใช้โฟตอนเหล่านี้ไปกระตุ้นสารตัวอย่างต้องใส่ฟิลเตอร์กรองแสงเพื่อเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการก่อน ปกติชิ้นสารตัวอย่างมักจะเก็บในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำ ๆ ขณะทำการวัดเพื่อลดปัญหาการเกิดโฟนอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 แสดงแผนภาพการติดตั้งระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

แสงที่เปล่งออกมาจากชิ้นตัวอย่างจะถูกแยกสเปกตรัมโดยโมโนโครเมเตอร์ (monochromator) ก่อนที่จะวัดโดยหัววัดสัญญาณแล้วแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและส่งต่อไปยังภาคแสดงการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์แบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือ

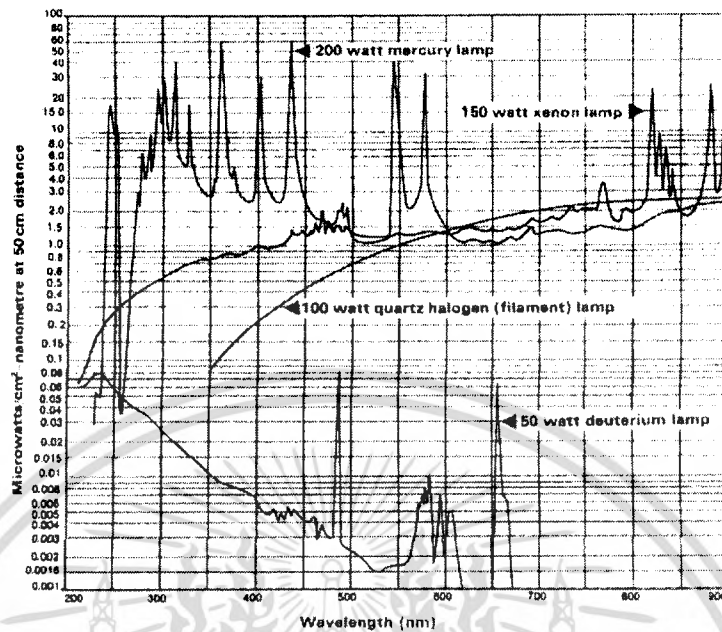
1. กำหนดค่าความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้ในการกระตุ้นคงที่แล้วทำการสแกนช่วงความยาวคลื่นโฟตอนที่สารตัวอย่างเปล่งออกมา โดยปกติพลังงานโฟตอนที่ถูกปลดปล่อยออกมามักจะมีพลังงานน้อยกว่าพลังงานโฟตอนกระตุ้นซึ่งเป็นไปตามกฎของสโตกส์
2. กำหนดให้หัววัดเลือกวัดความยาวคลื่น โฟตอนคงที่ค่าหนึ่งแล้วทำการสแกนความยาวคลื่นโฟตอนที่ใช้กระตุ้น
3. กำหนดให้ความยาวคลื่นของโฟตอนที่ใช้กระตุ้นและที่ปลดปล่อยออกมาคงที่ และทำการวัดสเปกตรัมการเกิดลูมิเนสเซนซ์ เทียบกับเวลาเมื่อโฟตอนที่ใช้กระตุ้นเป็นพัลส์เดี่ยว

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

2.9.1 พลังงานกระตุ้น [1]

การเลือกแหล่งกำเนิดโฟตอนเพื่อใช้เป็นพลังงานกระตุ้นนั้นขึ้นกับว่าเราต้องการวัดลูมิเนสเซนซ์ในรูปแบบไหน เช่น เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดโฟตอนอาพันธ์มีลำแสงขนานและเลเซอร์บางชนิดเป็นพัลส์สัญญาณค่อนข้างสั้น เหมาะกับการวัดในรูปแบบที่ 1 และ 3 การใช้เลเซอร์ทำให้มีสัญญาณรบกวนต่ำแต่มีข้อเสียคือ การปรับเลือกช่วงความยาวคลื่นทำได้ยากการใช้หลอดไฟสุญญากาศก็จะทำให้แก้ปัญหาตรงนี้ได้เนื่องจากมีช่วงความยาวคลื่นกว้าง (broadband) จึงเหมาะกับการวัดในรูปแบบที่ 2 ซึ่งหลอดไฟมีให้เลือกใช้หลายชนิดและหลายความเข้มดังแสดงสเปกตรัมในรูปที่ 2.18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 สเปกตรัมของการแผ่รังสีของหลอดไฟแต่ละชนิด ระยะห่าง 50 ซม.

2.9.2 การควบคุมอุณหภูมิ [1]

ชิ้นสารตัวอย่างส่วนมากถูกนำมาใส่ไว้ในไครโอสแตท (cryostat) เพื่อให้สามารถควบคุมอุณหภูมิการวัดได้โดยปกติการวัดทำในอุณหภูมิต่ำบางครั้งอาจต่ำถึง 1 K ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องป้อนฮีเลียมเหลวหรือไนโตรเจนเหลวหมุนเวียนผ่านระบบอย่างต่อเนื่องเพื่อดึงพลังงานความร้อนออกไปยังตัวแลกเปลี่ยนความร้อน โดยทั่วไปใช้คอมเพรสเซอร์ซึ่งติดตั้งอยู่ภายนอก (ไครโอเจนิค) อีกทีภายในไครโอสแตท ชิ้นสารตัวอย่างจะถูกยึดติดกับแท่งโลหะ (cold finger) พลังงานความร้อนจะถูกถ่ายเทผ่านโลหะแท่งนี้ นอกจากนี้ภายในไครโอสแตทยังมีสภาพเป็นสุญญากาศประมาณ 10^{-2} torr เพื่อป้องกันการควบแน่นของไอน้ำบนชิ้นสารตัวอย่างและป้องกันความร้อนภายนอกถ่ายเทเข้าสู่ระบบภายใน ตัวไครโอสแตทนี้จะมีช่อง (window) ทางเข้าและออกของโฟตอนที่ใช้กระตุ่นและปลดปล่อยออกมาจากชิ้นตัวอย่าง

ตารางที่ 2.3 สารที่ใช้ทำความเย็นภายในตัวโครโอจีนิคที่ความดัน 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	87.9
$Q(\text{kgm}^{-3})$	59	125	71	1024	804	1399
$C_p \text{ at } T_{\text{boil}}(\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1})$		4.4	9.3	1.8	2.0	1.1
$V_{\text{gas}} / V_{\text{liquid}}$	438	699	788	1338	644	78.5
$I_v(\text{kJkg}^{-1})$	7	21	488	87	199	16.3

2.9.3 หัววัดสัญญาณและหน่วยประมวลผล [1]

การเปลี่ยนพลังงานโฟตอนที่สารตัวอย่างปลดปล่อยออกมาไปเป็นสัญญาณไฟฟ้า นั้นมีปัจจัยทางฟิสิกส์หลายอย่างที่มีผลต่อการวัดสมบัติที่สำคัญของหัววัด (detector) ทั่วไปได้แก่

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

หลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube) เป็นหัววัดที่มีการตอบสนองต่อโฟตอนในช่วงความยาวคลื่นกว้างมากประกอบด้วยโฟโตแคโทด (photo cathode) ไดโนด (dynode) แอโนด (anode) โดยส่วนโฟโตแคโทดจะเป็นตัวรับแสงหรือโฟตอน เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตริก ขึ้นโดยโฟโตอิเล็กตรอนจะถูกเร่งไปยังขั้วไดโนดที่หนึ่งซึ่งจะทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจากการชน แล้วถูกเร่งต่อไปยังไดโนดที่สองและสามทำให้เกิดอิเล็กตรอนเพิ่มขึ้นเป็นทวีคูณปกติค่าอัตราขยายกระแส (gain) จะอยู่ที่ 10^7 ถึง 10^{10} เท่า และความไวในการเปลี่ยนพลังงานโฟตอนเป็นสัญญาณไฟฟ้าอยู่ที่ 10^{-9} วัตต์ สัญญาณทั้งหมดที่ได้จะถูกส่งต่อไปยังหน่วยประมวลผลซึ่งโดยมากมักจะเป็นคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์และแสดงผลออกมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.10 การแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง (photoionization) [1,16]

เป็นกระบวนการทางกายภาพที่เกิดจากโฟตอนเคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอม ไอออน หรือ โมเลกุล ผลที่ได้คือ การหลุดออกมาของอิเล็กตรอนหนึ่งตัวซึ่งการหลุดออกมาของอิเล็กตรอน เป็นที่รู้จักกันในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอน และมีพลังงานจลน์เท่ากับค่าของพลังงานโฟตอนลบ ด้วยพลังงานยึดเหนี่ยวของอิเล็กตรอน โฟตอนที่มีพลังงานน้อยกว่าพลังงานยึดเหนี่ยวของ อิเล็กตรอนจะเกิดการกระตุ้นแต่ไม่เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กตรอนเมื่อเคลื่อนที่เข้าชนกับของ อะตอมหรือไอออน ตัวอย่างเช่น การทำให้อะตอมของไฮโดรเจนแตกตัวเป็นไอออนโฟตอนต้องมี พลังงานมากกว่า 13.6 eV ซึ่งสอดคล้องกับความยาวคลื่น 91 นาโนเมตรสำหรับโฟตอนที่มีพลังงาน มากกว่านี้พลังงานของการปล่อยโฟโตอิเล็กตรอนสามารถหาได้ดังสมการที่ (4)

$$\frac{1}{2}mv^2 = h\nu - 13.6eV \quad (4)$$

โดย h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ และ
 ν คือ เป็นค่าความถี่ของโฟตอน

ไม่ใช่ทุกโฟตอนที่เคลื่อนที่เข้าชนกับอะตอมหรือไอออนแล้วจะเกิดการแตกตัวเป็นไอออน เนื่องจากแสง ความน่าจะเป็นที่จะเกิดการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง นั้นเกี่ยวข้องกับ ภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนเนื่องจากแสง ซึ่งขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของโฟตอนและ ไอออนหรืออะตอมที่เราสนใจ สำหรับพลังงานโฟตอนที่ต่ำกว่าค่าที่ทำให้เกิดการแตกตัวเป็น ไอออน จะได้ว่าภาคตัดขวางของการแตกตัวเป็นไอออนมีค่าเป็นศูนย์และถ้ามีค่ามากกว่า พลังงานกระตุ้น ภาคตัดขวางจะลดแบบผกผันกับค่าพลังงานโฟตอนยกกำลังสาม

2.11 รัสเซลล์-ซาวนด์เคอร์ คัปปลิง (Russell-Saunders coupling) [20]

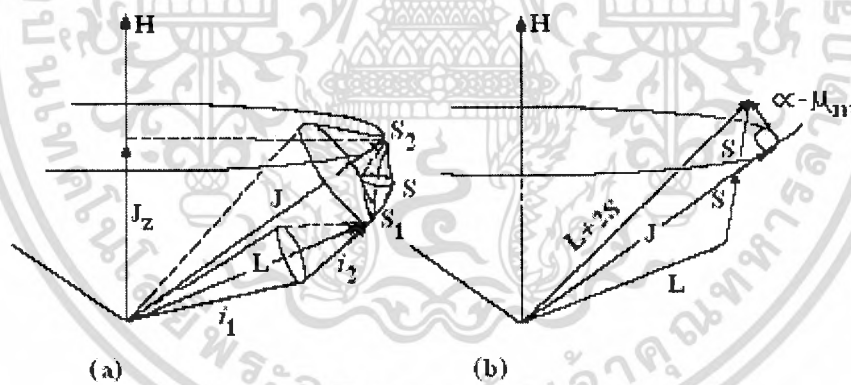
ได้ค้นพบวิธีการที่จะนำอะตอมที่มีโมเมนตัมเชิงมุมที่ต่างกันมาต่อกัน ซึ่งจะเกิดขึ้นเพราะ ในอะตอมที่เบาว่าผลรวมของปฏิกิริยาอะตอมระหว่างอิเล็กตรอนในวงโคจรที่ต่างกันด้วยค่า l_i, s (ปฏิกิริยาระหว่างออบิตัลกับออบิตัล) ที่แข็งแรงกว่าปฏิกิริยาระหว่างสปินของอิเล็กตรอนกับ ออบิตัลในแต่ละ l_i ที่มาต่อกับ s_i ดังนั้นเวกเตอร์ลัพธ์ค่าประมาณที่ดีของโมเมนตัมเชิงมุมของ ออบิตัล ต่อกันสร้างเวกเตอร์ลัพธ์ออบิตัล L ในทางเดียวกันถ้าเรานำสปินมาต่อกันจะเกิดปฏิกิริยา การแลกเปลี่ยนสปิน-สปิน และสร้างเวกเตอร์ลัพธ์ S ขึ้นมาตามสมการ

$$L = \sum_{i=1}^p \ell_i \quad S = \sum_{i=1}^p s_i \quad (5)$$

ผลรวมนั้นมากกว่าของอิเล็กตรอนในพีเชลล์ในเชลล์ที่ยังไม่เต็มผลรวมในชั้นที่อิเล็กตรอนในเชลล์เต็มแล้วจะให้ค่าเป็น 0 นอกจากนี้ L และ S เกิดการต่อกันของสปินกับออบิตัล $hL.S$ สร้างเวกเตอร์ลัมโบเมตัมเชิงมุมรวมของตัวดำเนินการ hJ ด้วยขอบเขตค่าผลรวมของควอนตัมมุมเบอร์ของโมเมนตัมเชิงมุม J จะได้จาก

$$J = (L+S), (L+S-1), \dots, |L-S+1|, |L-S| \quad (6)$$

กระบวนการนี้เป็นการต่อของโมเมนตัมเชิงมุมของอิเล็กตรอนที่ต่างกันสมการ(5) เรียกว่า Russel-Saunders (หรือ LS coupling) ในรูปที่ 2.19 แสดงให้เห็นถึงผลลัพธ์สำหรับอิเล็กตรอนสองตัวในอะตอม เนื่องจากสมการเหล่านี้เป็นผลรวมของเวกเตอร์ ดังตัวอย่าง ถ้า $s_1=1/2$ และ $s_2=1/2$ ดังนั้น $L=1$ หรือ 0 และถ้า $\ell_1=2$ และ $\ell_2=2$ (นั่นคืออิเล็กตรอนในดีเชลล์) ดังนั้น $L=4, 3, 2, 1$ หรือ 0



รูปที่ 2.19 แสดงการเชื่อมต่อของ L และ S สำหรับอิเล็กตรอนเดี่ยวชั้น p ชุดคู่ ประกอบด้วยค่าของ j สองค่า

กลุ่มของระดับพลังงานแสดงให้เห็นในสมการ 2 เรียกว่า มัลติเพลต และจำนวนของระบบที่มากนิยามว่าเป็น $2S+1$ ในความเป็นจริงถ้า $L \geq S$ จะได้เป็น $2S+1$ มัลติเพลต แต่ถ้า $L < S$ จะได้เป็น $2L+1$ มัลติเพลต ช่องว่างของมัลติเพลตได้ถูกกำหนดด้วยค่าคงที่สปิน-ออบิตัล λ กำหนดค่าพลังงานปฏิกริยาได้เป็น

$$V_{so} = \lambda L.S \quad (7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left(\frac{\lambda}{2}\right)[J(J+1)-L(L+1)-S(S+1)] \quad (8)$$

สิ่งที่ได้จากการใช้ $J^2 = L^2 + S^2 + 2L.S$ และผลลัพธ์ทางควอนตัมเชิงกลสำหรับค่าไอเกนของทุก ๆ ตัวดำเนินการเวกเตอร์กล่าวคือ $J.J = J(J+1)$, $L.L = L(L+1)$ และ $S.S = S(S+1)$ ก่อนอื่นจะพูดถึงการกำหนดสถานะพื้นและจะพูดถึงพฤติกรรมในสนามแม่เหล็ก

กฎของฮุนด์ [1]

กฎของฮุนด์ ได้ประยุกต์ใช้สำหรับอิเล็กตรอนที่ให้ลักษณะพิเศษของ S , L และ J ที่สถานะพื้นของอะตอม

1. S ที่ใหญ่ที่สุดสอดคล้องกับหลักการกีดกันของเพาลีที่จะอธิบายที่สถานะพื้นนั้น ถ้าอิเล็กตรอนสองตัวในอะตอมมีสถานะออบิทัลเดียวกันอิเล็กตรอนต้องมีสปินที่ตรงข้ามกัน อย่างไรก็ตามแรงผลักรวมของอิเล็กตรอนทั้งสองตัวจะมีค่าต่ำลงถ้าอิเล็กตรอนทั้งสองอยู่ในออบิทัลที่ต่างกัน อิเล็กตรอนทั้งสองตัวสามารถมีสปินแบบขนานหรือทิศตรงข้าม แต่ในการแลกเปลี่ยนนั้นจะเป็นจำนวนเต็ม สำหรับวงโคจรที่ตั้งฉากกันจะเป็นบวกเสมอ พลังงานที่ต่ำกว่าของเหตุการณ์สปินที่ขนานกันกับเหตุการณ์ที่สปินตรงข้ามกัน
2. ค่า L สูงตรงกับ S ในกฎข้อแรกจะอธิบายที่สถานะพื้น กฎข้อนี้จะยากกว่าที่จะอธิบายทางคุณภาพ โดยการคำนวณทางปริมาตรนั้นเป็นที่ต้องการ
3. $J = |L - S|$ เมื่ออิเล็กตรอนเซลล์นั้นน้อยกว่าครึ่งหนึ่ง และจะเท่ากับ $L + S$ เมื่อเซลล์ที่มากกว่าครึ่งหนึ่ง และ $J = S$ เมื่อเท่ากับครึ่งหนึ่งชอบเซลล์เพราะ $L = 0$ ตามกฎข้อ 1

ดังจะเห็นได้จากตัวอย่างในกรณีของ $Ce^{3+} 4f^1$ ที่ $S = 1/2$ และ $l = 3$ (สำหรับอิเล็กตรอนในเซลล์เอฟ) ดังนั้นสำหรับสถานะพื้น : $S = 1/2$; $L = 3$; $J = 5/2$ นี่เป็นสิ่งที่ทำให้ได้สเปกโตรสโคปิกโนเทชั่น $^2F_{5/2}$ ทางซ้ายบนออกถึงมัลติพลิซิติ เป็นสปินดีเจเนอร์ซี $2S + 1$ ทางขวาล่าง เป็นค่า J และอักษร เป็น ระบุค่า L

$$L = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$$

$$S, P, D, F, G, \dots$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นสัญลักษณ์เป็น $^{2S+1}L_J$ ในกรณีอิเล็กตรอนสองตัว $4f^2$ (Pr^{3+}) จากกฎของฮุนด์ จะได้ว่า $S=1$ เนื่องจากสปินของอิเล็กตรอนทั้งสองเหมือนกัน เฉพาะอิเล็กตรอนตัวแรกสามารถมี $m_l=3$ ดังนั้นอิเล็กตรอนตัวที่ 2 จึงมี $m_l=2$ และได้ $L=5$; $J=4$ ดังนั้นจึงได้สถานะเป็น 3H_4 ตารางที่ 2.4 แสดงถึงผลลัพธ์สำหรับอะตอมในเชลล์เอฟและเชลล์ดี

ตารางที่ 2.4 แสดงค่าของอะตอมในเชลล์ดีและเชลล์เอฟ

d – shell ($l=2$)

n	$m_l = 2, 1, 0, -1, -2$					S	$L = \sum m_l $	J		
1	↓					1/2	2	3/2	$^2D_{3/2}$	Ti^{3+}
2	↓	↓				1	3	2	3F_2	V^{3+}
3	↓	↓	↓			3/2	3	3/2	$^4F_{3/2}$	Cr^{3+}
4	↓	↓	↓	↓		2	2	0	5D_0	Cr^{2+}
5	↓	↓	↓	↓	↓	5/2	0	5/2	$^6S_{5/2}$	$\text{Fe}^{3+}, \text{Mn}^{2+}$
6	↓↑	↑	↑	↑	↑	2	2	4	6D_4	Fe^{2+}
7	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	3/2	3	9/2	$^4F_{9/2}$	Co^{2+}
8	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	1	3	4	3F_4	Ni^{2+}
9	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	1/2	2	5/2	$^2D_{5/2}$	Cu^{2+}
10	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	0	0	0	1S_0	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ℓ - shell ($l = 3$)

n	$m_\ell = 3, 2, 1, 0, -1, -2, -3$							S	$L = \Sigma m_\ell $	J	g_ℓ		
0								0	0	0	1S_0	0	La ³⁺
1	↓							1/2	3	5/2	$^2F_{5/2}$	6/7	Ce ³⁺
2	↓	↓						1	5	4	3H_4	4/5	Pr ³⁺
3	↓	↓	↓					3/2	6	9/2	$^4I_{9/2}$	8/11	Nd ³⁺
4	↓	↓	↓	↓				2	6	4	5I_4	3/5	Pm ³⁺
5	↓	↓	↓	↓	↓			5/2	5	5/2	$^6H_{5/2}$	2/7	Sm ³⁺
6	↓	↓	↓	↓	↓	↓		3	3	0	7F_0	-	Eu ³⁺
7	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	7/2	0	7/2	$^8S_{7/2}$	2	Gb ³⁺
8	↓↑	↑	↑	↑	↑	↑	↑	3	3	6	7F_6	3/2	Tb ³⁺
9	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	↑	↑	5/2	5	15/2	$^6H_{15/2}$	4/3	Dg ³⁺
10	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	↑	2	6	8	5I_8	5/4	Ho ³⁺
11	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	↑	3/2	6	16/2	$^4I_{15/2}$	6/5	Er ³⁺
12	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	↑	1	5	6	3H_6	7/6	Tm ³⁺
13	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↑	1/2	3	7/2	$^2F_{7/2}$	8/7	Yb ³⁺
14	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	↓↑	0	0	0	1S_0	0	Lu ³⁺

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.12 การบวกของสปินสองตัว [1,22]

โดยปกติฟังก์ชันเจาะจงที่สมบูรณ์ (complete eigenfunction) มักจะแสดงอยู่ในรูปของผลคูณระหว่างฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียล (spatial eigenfunction) กับฟังก์ชันเจาะจงสปิน (spin eigenfunction) ถ้าประมาณว่า ขณะนี้ยังไม่คิดอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์เชิงมุมของสปินกับโมเมนต์เชิงมุมของวงโคจร (spin-orbit interaction) ดังนั้น m_s ในแนวแกน z ยังไม่เปลี่ยนแปลง ฟังก์ชันเจาะจงของอะตอมที่มีอิเล็กตรอนหนึ่งตัว $\psi_{nlm_l m_s}$ มักจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\psi_{nlm_l m_s} = \psi_{nlm_l} \sigma_{m_s} \quad (9)$$

ถ้าระบบประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว สำหรับฟังก์ชันเจาะจงของอิเล็กตรอนตัวที่ 1 จะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\psi_\alpha(1) = \psi_\alpha(1) \sigma_{m_s}(1) \quad (10)$$

โดยที่เลขควอนตัม α แทนเลขควอนตัม nlm_s และฟังก์ชันเจาะจงที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอิเล็กตรอนตัวที่ 1 และตัวที่ 2 จะเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\begin{aligned} \psi_{\alpha\beta} &= \psi_\alpha(1) \psi_\beta(2) \\ &= \psi_\alpha(1) \psi_\beta(2) \sigma_{m_{s\alpha}}(1) \sigma_{m_{s\beta}}(2) \end{aligned}$$

เพื่อความสะดวกมักจะเขียนอยู่ในรูปที่กระชับดังนี้ คือ

$$\psi_{\alpha\beta} = \psi_{ab} \sigma_{m_{s_a} m_{s_b}} \quad (11)$$

แต่สมการ(11) ยังไม่เป็นฟังก์ชันเจาะจงแบบปฏิสมมาตร (antisymmetric eigenfunction) อย่างไรก็ตามเราสามารถที่จะสร้างฟังก์ชันเจาะจงแบบปฏิสมมาตร โดยการนำผลบวกของฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียลแบบสมมาตร หรือแบบปฏิสมมาตร (symmetric or antisymmetric linear combination of spatial eigenfunctions) คูณกับผลบวกของฟังก์ชันเจาะจงสปินที่มีสมมาตรต่างกับฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียล ซึ่งฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียลแบบสมมาตรจะเขียนได้ดังนี้ คือ

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{ab} + \psi_{ba}) \quad (12)$$

ส่วนฟังก์ชันเจาะจงสเปเชียลแบบปฏิสมมาตร คือ

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{ab} - \psi_{ba}) \quad (13)$$

สำหรับฟังก์ชันเจาะจงสปินของระบบที่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว ซึ่ง m_s จะมีค่าได้เป็น $-1/2$ และ $1/2$ ดังนั้นลักษณะของสปินที่เป็นไปได้มี 4 แบบ คือ

$$\sigma_{+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}} \cdot \sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} \cdot \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}} \cdot \sigma_{-\frac{1}{2}-\frac{1}{2}}$$

และฟังก์ชันเจาะจงสปินจะเป็นแบบสถานะซิงเกิล (singlet) และสถานะซูดสาม (triplet) ดังนี้ คือ

$$\begin{array}{l} \text{สถานะซิงเกิล} \\ \text{สถานะซูดสาม} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}} \right) \\ \left[\begin{array}{l} \sigma_{+\frac{1}{2}+\frac{1}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sigma_{+\frac{1}{2}-\frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}} \right) \\ \sigma_{-\frac{1}{2}+\frac{1}{2}} \end{array} \right] \end{array} \right. \quad (14)$$

ฟังก์ชันเจาะจงสถานะสปินแบบสถานะซิงเกิล จะมีลักษณะไม่สมมาตรเนื่องจากการสลับสัญลักษณ์ 1 และ 2 จะให้ผลต่างไปจากเดิม ส่วนฟังก์ชันเจาะจงที่แสดงสถานะซูดสามจะเป็นฟังก์ชันเจาะจงสปินแบบสมมาตร เนื่องจากการสลับสัญลักษณ์ 1 และ 2 ไม่ทำให้สมการทั้งสามต่างไปจากเดิม ฟังก์ชันเจาะจงของระบบที่มีอิเล็กตรอน 2 ตัวจะแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

ตารางที่ 2.5 แสดงฟังก์ชันเงาของระบบที่ประกอบด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว

สถานะเงา	การปรับแนวสปิน	ฟังก์ชันเงาสปิน	S	M_s	S_1	S_2
ซุดเดี่ยว	$\uparrow\downarrow - \downarrow\uparrow$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sigma_{+\frac{1}{2} \frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2} \frac{1}{2}} \right)$	0	0	1/2	1/2
ซุดสาม	$\uparrow\uparrow$	$\sigma_{+\frac{1}{2} \frac{1}{2}}$	1	1	1/2	1/2
	$\uparrow\downarrow + \downarrow\uparrow$	$\frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sigma_{+\frac{1}{2} \frac{1}{2}} + \sigma_{-\frac{1}{2} \frac{1}{2}} \right)$	1	0	1/2	1/2
	$\downarrow\downarrow$	$\sigma_{-\frac{1}{2} \frac{1}{2}}$	1	-1	1/2	1/2

ฟังก์ชันเงาสมบูรณ์ที่เป็นแบบปฏิสมมาตร ทั้ง 4 ฟังก์ชันของระบบที่ยังไม่พิจารณาอันตรกิริยาระหว่างโมเมนต์วงโคจรและโมเมนต์เชิงมุมจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\psi_A = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{ab} + \psi_{ba}) \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sigma_{+\frac{1}{2} \frac{1}{2}} - \sigma_{-\frac{1}{2} \frac{1}{2}} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{ab} - \psi_{ba}) \sigma_{+\frac{1}{2} \frac{1}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{ab} - \psi_{ba}) \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\sigma_{+\frac{1}{2} \frac{1}{2}} + \sigma_{-\frac{1}{2} \frac{1}{2}} \right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} (\psi_{ab} - \psi_{ba}) \sigma_{-\frac{1}{2} \frac{1}{2}} \end{cases} \quad (15)$$

สมการทั้ง 4 นี้มีสมบัติเป็นสภาพปกติ (normalized) เป็นสภาวะเชิงตั้งฉาก (orthogonality) และมีสภาพซ้อนสถานะ (degeneracy)

สำหรับระบบที่ประกอบไปด้วยอิเล็กตรอน 2 ตัว เวกเตอร์ของโมเมนต์เชิงมุมสปินรวมจะแสดงได้ดังนี้ คือ

$$\vec{S} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งขนาดของ โมเมนตัมเชิงมุมสปินรวมจะมีค่าดังนี้ คือ

$$S = \sqrt{s(s+1)}\hbar$$

$$S_z = m_s \hbar$$

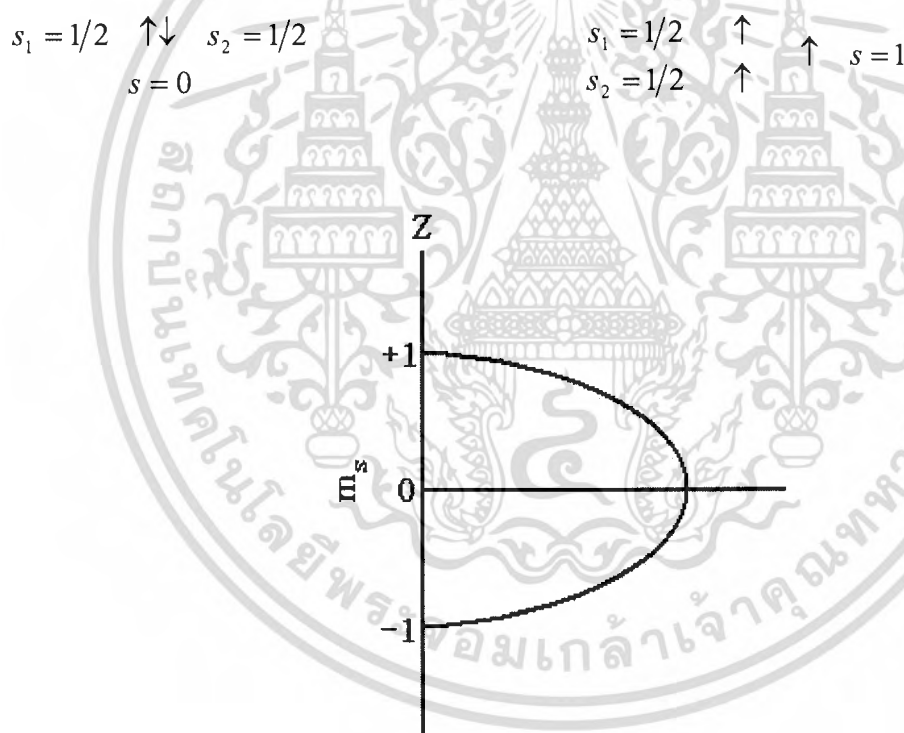
เมื่อ

$$m_s = -s, \dots, +s$$

โดยที่

$$s = 0, 1$$

ถ้ากำหนดให้อิเล็กตรอนทั้งสองตัวมีเวกเตอร์สปินเท่ากับ $s_1 = 1/2$ และ $s_2 = 1/2$ เวกเตอร์
 สปินของสปินทั้งสองในแนวแกน z จะเป็น $s = 0$ และ 1 ตามลำดับดังรูปที่ 2.17 ซึ่งฟังก์ชันเงาของ
 สปินของสถานะชุดเดี่ยวจะสอดคล้องกับ $s = 0$ ส่วนฟังก์ชันเงาของสปินแบบชุดสามจะสอดคล้อง
 กับ $s = 1$



รูปที่ 2.20 แสดงแผนภาพการรวมเวกเตอร์สปินของระบบที่มีอิเล็กตรอน 2 ตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

ในโครงงานพิเศษฉบับนี้ได้ทำการเตรียมผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Si และ Ge เพื่อตรวจสอบสมบัติการเรืองแสงที่เกิดขึ้นตามชนิดและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณความเข้มข้นของสารเจือ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิขณะทำการตรวจสอบการเรืองแสงที่เกิดขึ้น ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

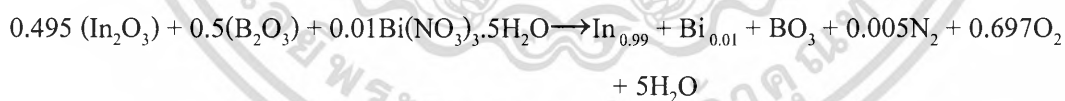
1. การเตรียม InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Si และ Ge
2. การตรวจสอบโครงสร้างผลึกของ InBO_3 และการตรวจสอบการเรืองแสงของสาร InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Si และ Ge

3.1 ขั้นตอนการเตรียมสาร แบ่งออกได้เป็น 4 ส่วนใหญ่ ๆ คือ

3.1.1 ขั้นตอนการคำนวณปริมาณสารที่ใช้ในการทดลอง

สารตั้งต้นที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย In_2O_3 , B_2O_3 , $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, SiO_2 และ GeO_2 โดยในการเตรียม InBO_3 ที่เจือด้วย Bi จะใช้สารตั้งต้นคือ In_2O_3 , B_2O_3 และ $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งแสดงตัวอย่างการคำนวณดังสมการด้านล่าง

ในกรณี InBO_3 เจือด้วย $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (1%) จะได้สมการดังนี้



(เลขอะตอม In = 114.820, O = 15.999, B = 10.811, N = 14.006, Bi = 208.980, H = 1.007)

น้ำหนักโมเลกุลของสารตัวอย่างที่ต้องการเตรียม $0.495 (\text{In}_2\text{O}_3) + 0.5 (\text{B}_2\text{O}_3) + 0.01 \text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$

$$= 0.495(277.683) + 0.5(69.618) + 0.01(485.071)$$

$$= 137.430 + 34.809 + 4.850$$

$$= 177.090 \text{ กรัม/โมล}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณตามสมการต่อไปนี้

ปริมาณของสารตั้งต้นที่เป็นองค์ประกอบ =

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

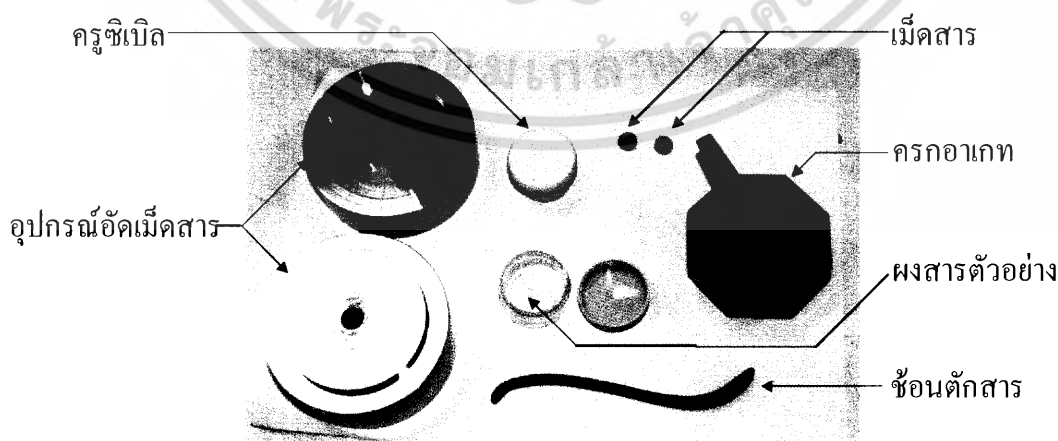
ดังนั้น จะต้องใช้

$$\begin{aligned} \text{In}_2\text{O}_3 &= \frac{(137.430)(1)}{177.090} = 0.773 \text{ กรัม} \\ \text{B}_2\text{O}_3 &= \frac{(34.809)(1)}{177.090} = 0.196 \text{ กรัม} \\ \text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} &= \frac{(4.850)(1)}{177.090} = 0.027 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

จากนั้นทำการชั่งปริมาณสารตามที่ได้คำนวณไว้ข้างต้น

3.1.2 ขั้นตอนการผสมสาร

ในขั้นตอนผสมสารนั้นเริ่มต้นโดยการทำความสะอาดครกอาเกตด้วยน้ำยาทำความสะอาด แล้วนำครกอาเกตมาวางลงบนกระดาษขาวที่สะอาด นำสารที่ชั่งปริมาณแล้วมาผสมในครกอาเกตแล้วบดโดยใช้เวลาประมาณ 1-2 ชั่วโมง ให้สารมีความละเอียดเป็นผง แล้วนำสารที่ทำการบดใส่ไว้ในภาชนะเก็บสารที่ได้เตรียมไว้ หลังจากนั้นทำความสะอาดครกอาเกตด้วยน้ำยาทำความสะอาดแล้วเป่าให้แห้ง โดยได้แสดงอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการผสมสารดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงภาพถ่ายอุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมสาร

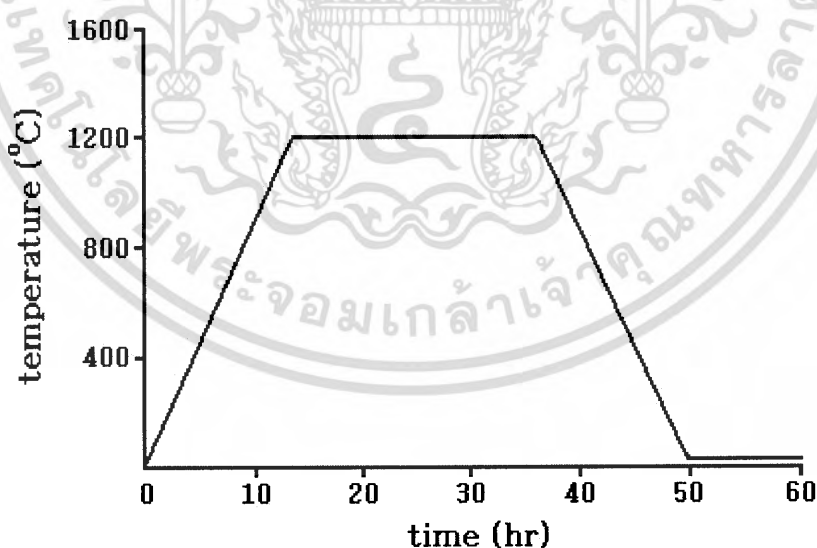
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3 ขั้นตอนการอัดเม็ดสาร

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

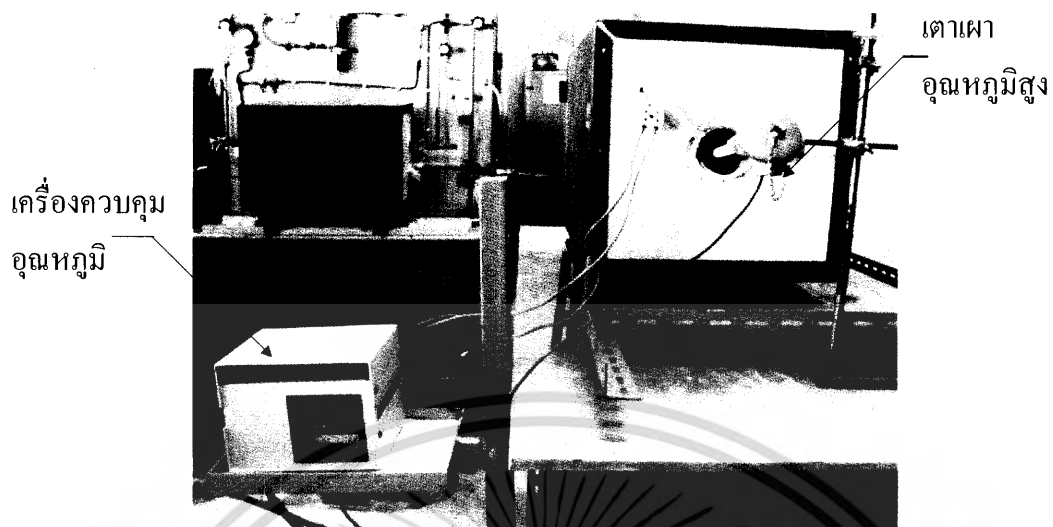
3.1.4 ขั้นตอนการเผาสาร

นำสารที่อัดเม็ดแล้วไปใส่ครุชีเบิลเพื่อที่จะนำไปเข้าเตาเผา (ครุชีเบิลที่ทนความร้อนได้สูงกว่า 1,200 องศาเซลเซียส) ก่อนใส่สารที่อัดเม็ดแล้วเข้าไปในเตาเผาต้องโรยผงซิลิกาชั้นระหว่างแต่ละเม็ดเพื่อป้องกันการทำปฏิกิริยากันระหว่างสารที่ใส่ในครุชีเบิล จากนั้นนำเข้าเตาเผาแล้วตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิโดยให้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง เมื่อถึงที่อุณหภูมิ 1,200 องศาเซลเซียส ให้ปล่อยทิ้งไว้ที่อุณหภูมินี้ประมาณ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นให้ลดอุณหภูมิตลงด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึงอุณหภูมิต้องแล้วปิดเตา ดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร



รูปที่ 3.2 แสดงอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการเผาสาร โดยการตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเตาเผา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 แสดงภาพถ่ายของเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ใช้ในการเผาสารตัวอย่างที่อุณหภูมิ 1200 องศาเซลเซียส พร้อมด้วยเครื่องควบคุมอุณหภูมิ

โดยสามารถเขียนเป็นแผนภาพแสดงขั้นตอนการเตรียมสารตัวอย่างของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi ด้วยปริมาณ 1% ของสารประกอบทั้งหมดได้ดังนี้

ผง In_2O_3 + ผง B_2O_3 + ผง $\text{Bi}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O} = 1$ กรัม

อัดเป็นเม็ดด้วยแรง 5 ตัน / ตารางเมตร

เผาในเตาเผาอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมง จนถึง 1.200 องศาเซลเซียส

ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง

ลดอุณหภูมิด้วยอัตรา 100 องศาเซลเซียสต่อชั่วโมงจนถึงอุณหภูมิห้อง

เซรามิกส์ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการรื้อทักษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการตรวจสอบสาร แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนดังนี้

3.2.1 การตรวจสอบโครงสร้างของผลึกเชิงจุลภาคของผงสารประกอบเชิงเซรามิกส์ InBO_3 ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ในโครงการพิเศษนี้จะใช้วิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของ InBO_3 โดยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ซึ่งจะกล่าวถึงรายละเอียดของการตรวจสอบไว้ในบทที่ 4 โดยลักษณะของสารตัวอย่างที่นำไปตรวจสอบเป็นสารตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นผง โดยนำสารตัวอย่างที่เป็นผงมาบด แล้วนำมาอัดลงบนช่องสี่เหลี่ยมที่ทำมาจากอะลูมิเนียม จากนั้นนำไปทำการตรวจสอบด้วยเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์

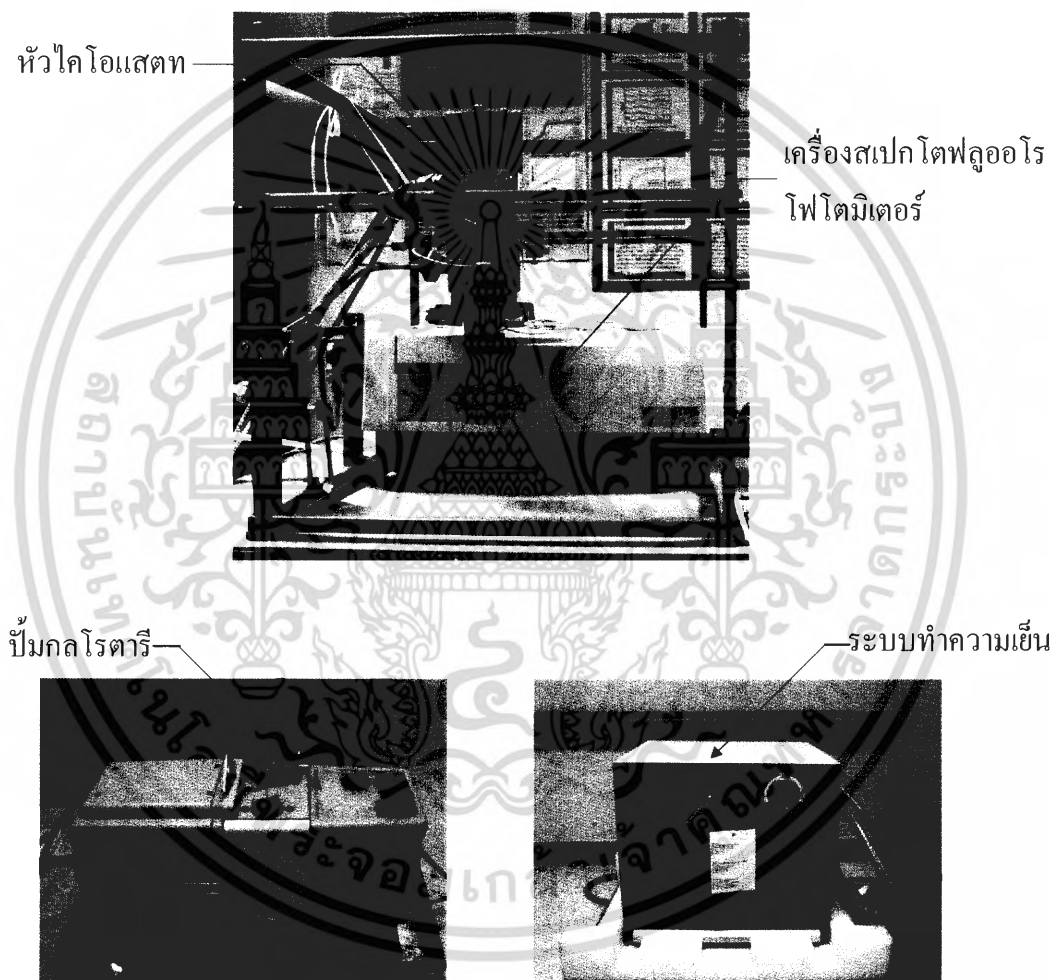


รูปที่ 3.4 แสดงภาพถ่ายของเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโทรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น Advance ซึ่งใช้ในการตรวจสอบโครงสร้างของ InBO_3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การตรวจสอบการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Si และ Ge ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์

ในการตรวจสอบการเรืองแสงของสาร InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Si และ Ge นั้นจะทำการตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ รุ่น RF-5031PC ดังแสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงภาพถ่ายเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ รุ่น RF-5031PC พร้อมด้วยปั๊มกลโรตารีและระบบทำความเย็นโดยเครื่องโคโอสแตทที่ใช้ในการศึกษาสมบัติการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Si และ Ge

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

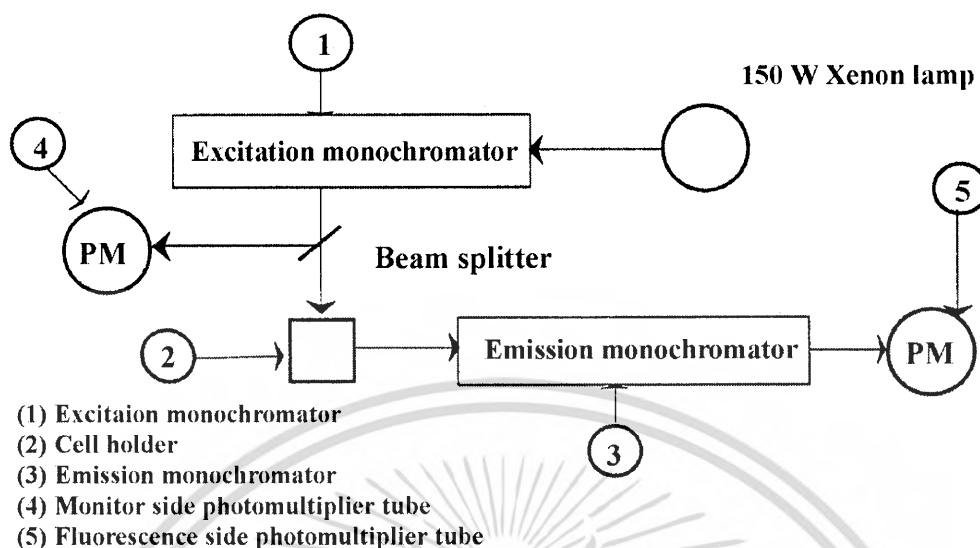
โดยในการวัดการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi , Si และ Ge ด้วยเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ มีขั้นตอนในการวัดดังต่อไปนี้

ในการณีวัดการเรืองแสง InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่อุณหภูมิห้อง มีขั้นตอนดังนี้

- นำสาร InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่เป็นผงบรรจุในช่องสี่เหลี่ยมที่แทนวสารตัวอย่าง
- นำแก้วควอตซ์มาวางปิดทับที่ผงเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการในช่องสี่เหลี่ยมแล้วปิดสก็อตเทปสีดำ
- นำแทนวสารตัวอย่างเข้าเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์
- เปิดเครื่อง แล้วทำการเปิดหลอดไฟที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ
- ปรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด
- ในการหาค่า emission ของสารตัวอย่างนั้นต้องให้ค่า excite ที่มีค่าๆหนึ่ง โดยในการวัดจะทำการปรับสลิตเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจากหลอดซินอน และในกรณีสารตัวอย่างที่นำมาวิจัยนั้นไม่ทราบข้อมูล ให้ปรับพารามิเตอร์เป็น excite mode แล้วให้มีค่า emission 700 nm ขึ้นไปจากนั้นเริ่มทำการวิจัยในระหว่างการวิจัยสังเกตที่สารตัวอย่างด้วยตาเปล่าว่าเห็นการเรืองแสงของสารที่ความยาวคลื่นค่าใด ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เห็นว่ามี การเรืองแสงนั้นคือค่า emission ของสารตัวอย่าง เมื่อทราบค่า emission จะสามารถหาค่า excite ได้

ในการณีวัดการเรืองแสง InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้องได้แสดงแผนภาพการติดตั้งเครื่องมือไว้ในรูปที่ 3.6 โดยใช้หลอดซินอน 150 W เป็นแหล่งกำเนิดแสง แสงจากหลอดซินอนจะผ่านไปยัง excite monochromator เพื่อเลือกค่าความยาวคลื่นในการกระตุ้น โดยแสงในค่าความยาวคลื่นที่ต้องการจะถูกแยกไปตกลงบนผงสารประกอบเกิดการเรืองแสง และแสงที่เรืองออกมาจะผ่านไปยัง emission monochromator เมื่อเลือกค่าความยาวคลื่นในการเรืองแสง และแสงนี้จะเข้าสู่ภาครับแสง (photomultiplier) ของเครื่องสเปกโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์ เพื่อประมวลผลและแสดงผลออกทางจอคอมพิวเตอร์



รูปที่ 3.6 แสดงแผนภาพการติดตั้งเครื่องมือในการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

โดยมีขั้นตอนในการเตรียมสารประกอบตัวอย่างดังต่อไปนี้

- นำสาร InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่มีลักษณะเป็นผงบรรจุในแท่นวางสารตัวอย่างที่ช่องสี่เหลี่ยม
- นำแก้วควอตซ์วางประกบที่ผง InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุที่ต้องการที่อยู่ในช่องสี่เหลี่ยมแล้วปิดด้วยสก็อตเทปสีดำ
- นำแท่นวางสารตัวอย่างเข้าหัวโคโอสเตท ซึ่งอยู่ในระบบสุญญากาศ
- ทำให้เป็นสุญญากาศโดยสูบอากาศด้วยปั๊มกลโรตารี เป็นเวลา 1-2 ชั่วโมงจนกว่าความดันมีค่า 10^{-2} ทอร์ เพื่อไม่ให้เกิดความชื้นกับสารที่นำมาทำการวิจัย
- เปิดเครื่องโคโอสเตทเพื่อความเย็นในบริเวณหัวโคโอสเตทแล้วสังเกตอุณหภูมิที่เปลี่ยนแปลงจากเครื่องวัดอุณหภูมิ
- ในการวิจัยเราจะเริ่มอุณหภูมิต่ำสุดที่ 50K แล้วทำการวัดทุกๆ 10K จนถึงที่ 250K ปรับค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการวัด
- ในการหาค่า emission ของสารตัวอย่างนั้นต้องให้ค่าพลังงานกระตุ้น excite ที่มีค่าๆหนึ่ง และปรับสไลดนั้นเพื่อเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงจากหลอดไฮปรอท และในกรณีสารตัวอย่างที่นำมาวิจัยนั้นไม่ทราบข้อมูล ให้ปรับพารามิเตอร์เป็น excite mode แล้วให้ emission มีค่า 700 nm ขึ้นไป จากนั้นเริ่มทำการวิจัย โดยในระหว่างการวิจัยสังเกตที่สารตัวอย่างด้วยตาเปล่าว่าเห็นการเรืองแสงของสารที่ความยาวคลื่นค่าใด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งค่าความยาวคลื่นที่เห็นว่ามีการเรืองแสงนั้นคือค่า emission ของสารตัวอย่าง
เมื่อทราบค่า emission จะสามารถหาค่า excite ได้

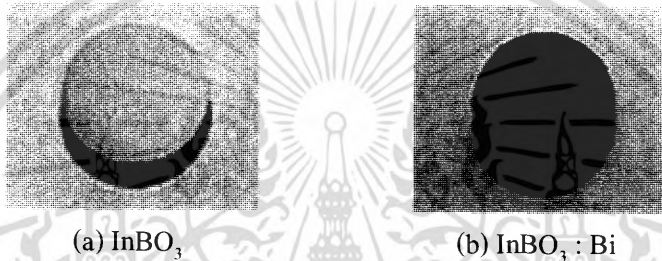


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโครงสร้างผลึกของผงสารประกอบเซรามิกส์ และตรวจสอบสมบัติการเรืองแสงของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Ge และ Si โดยแสดงตัวอย่างของ InBO_3 และ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi ที่มีลักษณะเป็นเม็ดดังรูป 4.1 (a) และ (b)

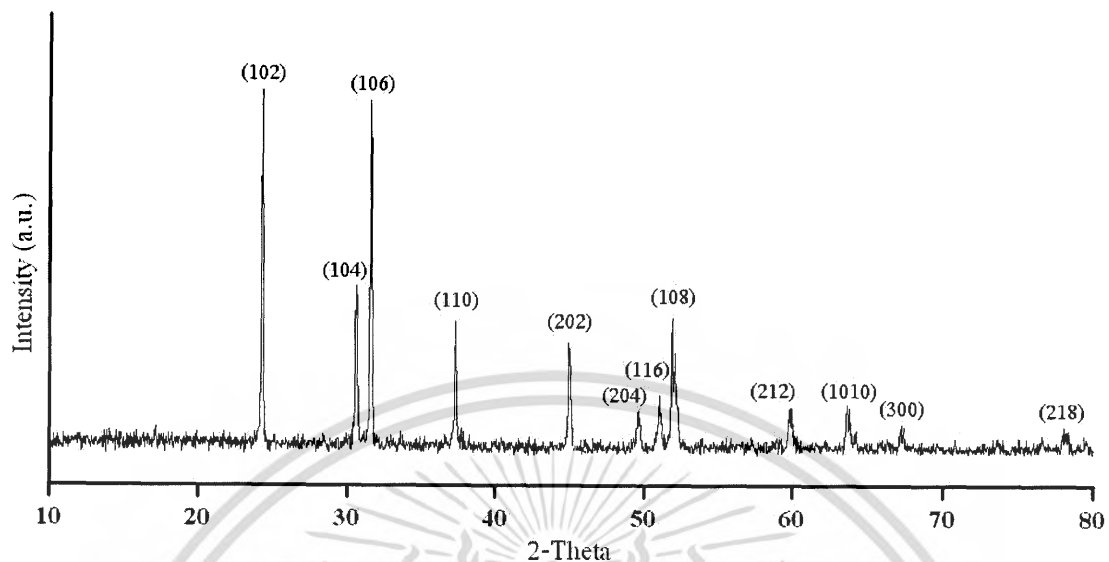


รูปที่ 4.1 (a) แสดงรูป InBO_3 และ (b) แสดงรูป InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi

โดยได้นำผงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เตรียมได้ไปทำการศึกษาโครงสร้างของผลึกด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ และ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi, Ge และ Si ไปทำการศึกษาสมบัติการเรืองแสง

4.1 ผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ด้วยวิธีการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

เนื่องจากเราต้องการศึกษาลักษณะโครงสร้างผลึกของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ดังนั้นจึงได้นำผง InBO_3 ที่เตรียมได้ไปศึกษาการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์เพื่อศึกษาลักษณะและตำแหน่งของพีคที่ปรากฏและนำไปเปรียบเทียบกับไฟล์มาตรฐานเพื่อพิจารณาลักษณะโครงสร้างผลึกของ InBO_3

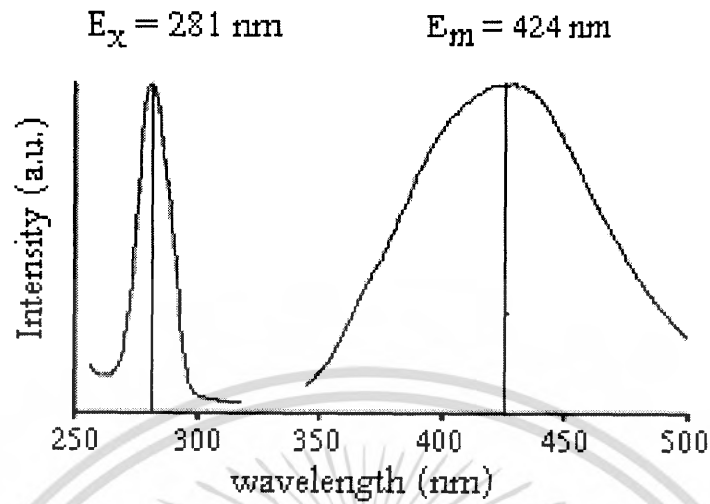


รูปที่ 4.2 แสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่มุม 2-Theta 10-80°

จากรูปที่ 4.2 นั้นแสดงรูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์จากเครื่องเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟรคโตรมิเตอร์ยี่ห้อ Bruker รุ่น D8 Advance ซึ่งรังสีเอ็กซ์มีค่าความยาวคลื่น 1.5406 อังสตรอม ที่มุม 2θ 10°-80° ของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ซึ่งปรากฏว่าผงของสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 จะปรากฏระนาบ(102) ที่ตำแหน่งพิกที่มีมุม 2θ ประมาณ 24.232° ซึ่งเป็นตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดและจะปรากฏระนาบอื่นๆ คือ (104), (006), (110), (202), (204), (116), (108), (212), (1010), (300), (218) ที่มุม 2θ (31.521)°, (34.827)°, (37.265)°, (44.927)°, (49.584)°, (51.911)°, (52.133)°, (59.736)°, (64.179)°, (67.198)°, (78.153)° ตามลำดับและเมื่อเปรียบเทียบตำแหน่งพิกที่ได้กับไฟล์มาตรฐานดังแสดงไว้ในภาคผนวก(ก) จะพบว่าผงสารประกอบเซรามิกส์ที่ได้เป็นของ InBO_3 ที่มีลักษณะโครงสร้างของผลึกเป็นแบบเฮกซะโกนอลซึ่งผงของสารประกอบที่ได้มีความเป็นผลึกที่ดีสังเกตได้จากลักษณะของพิกที่มีความคมชัด

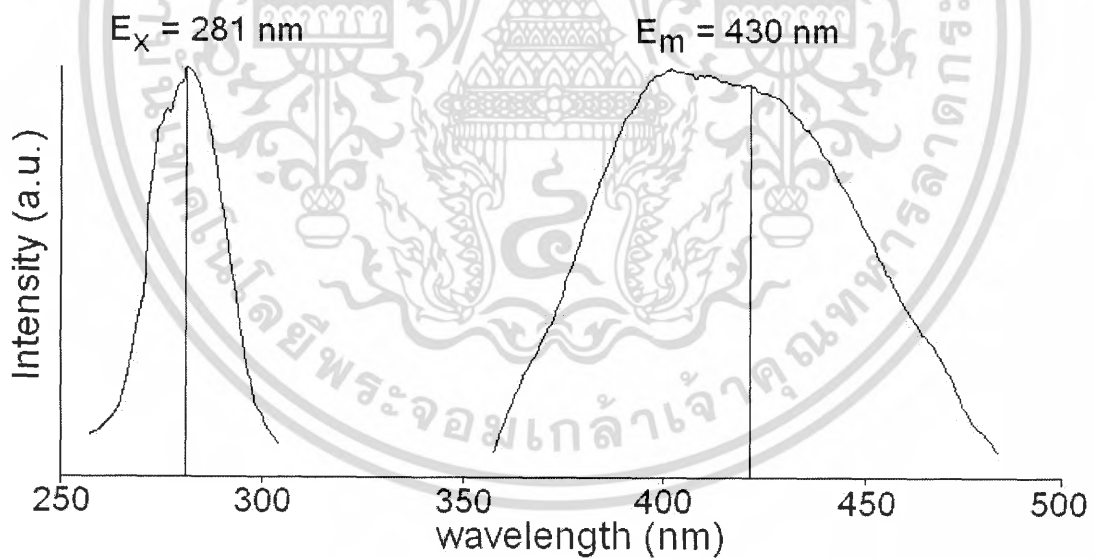
4.2 ผลการศึกษาการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Ge และ Si

ได้มีการศึกษาการเรืองแสงของผงสารประกอบเซรามิกส์ InBO_3 ที่เจือด้วย Bi^{3+} ด้วยปริมาณ 1 , 10 , 20 , 30 และ 40% ของน้ำหนักทั้งหมด และศึกษาการเรืองแสงที่อุณหภูมิ 50K ถึง 250K ซึ่งได้ผลการวิจัยดังต่อไปนี้



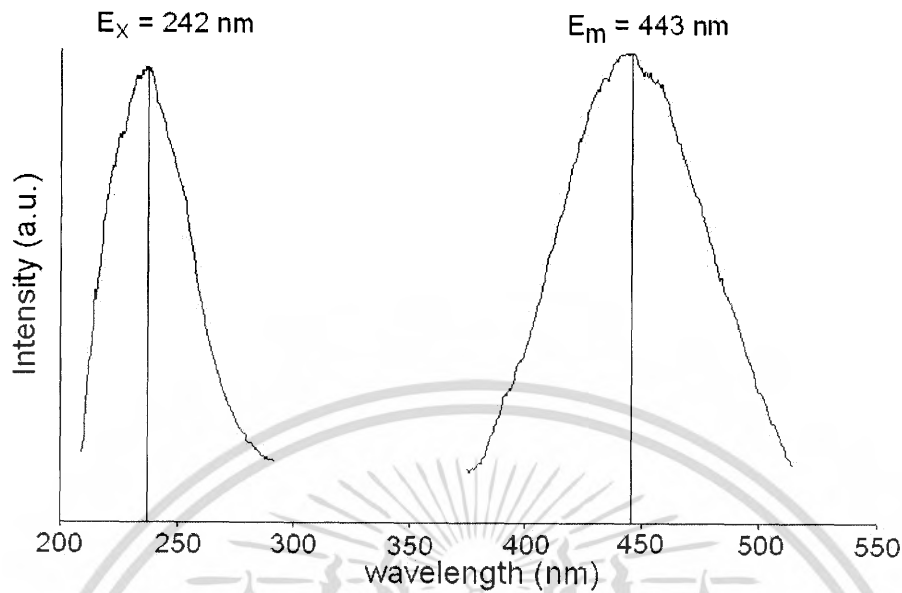
รูปที่ 4.3 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(1\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 281 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 424 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 143 นาโนเมตร



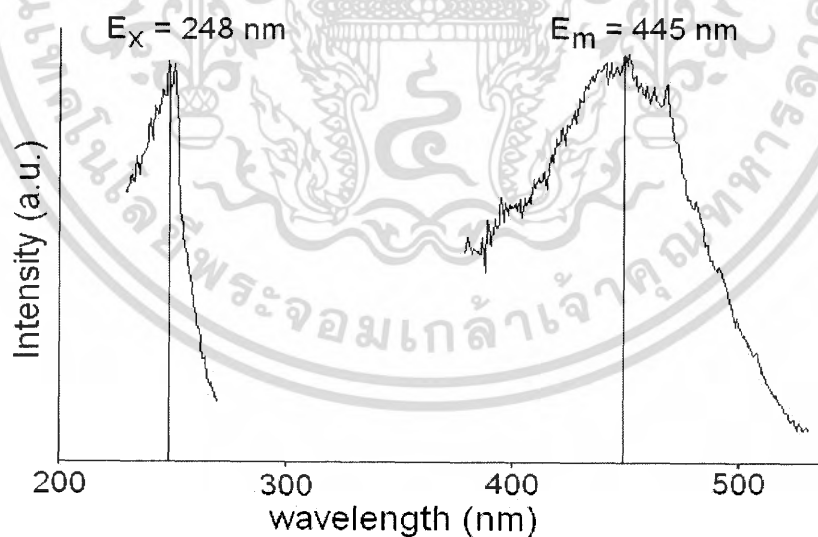
รูปที่ 4.4 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3: \text{Bi}^{3+}(10\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K

จากรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นว่าแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 281 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 430 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 149 นาโนเมตร



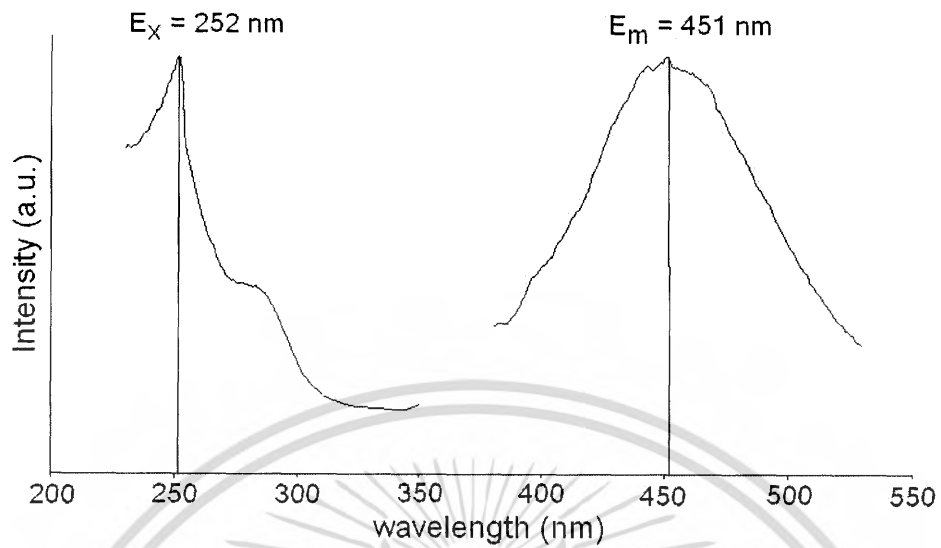
รูปที่ 4.5 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (20%) ที่อุณหภูมิ 50K

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 242 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดค่า 443 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 201 นาโนเมตร



รูปที่ 4.6 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (30%) ที่อุณหภูมิ 50K

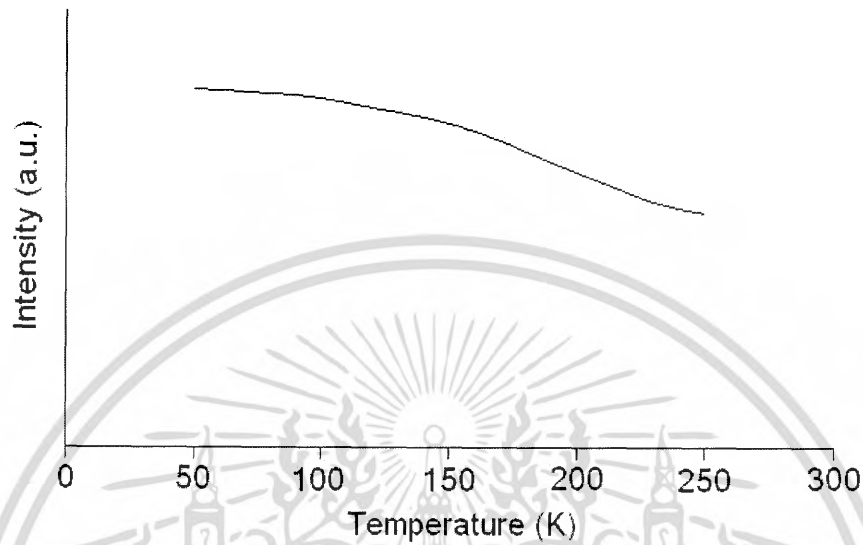
จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 248 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 445 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 157 นาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



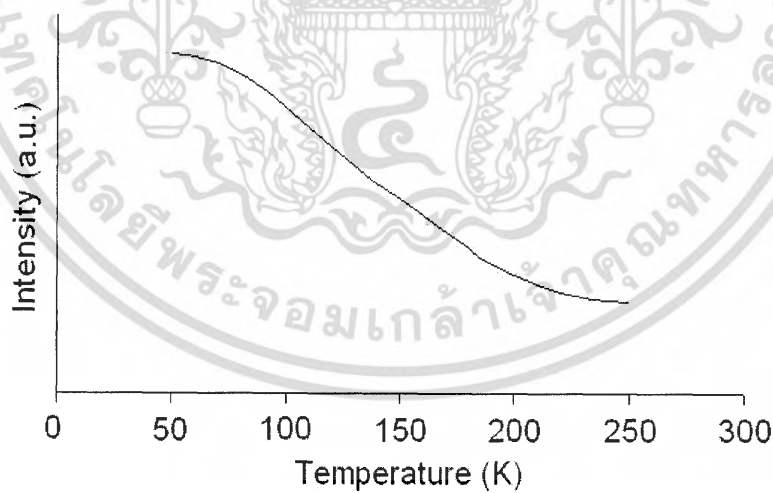
รูปที่ 4.7 แสดงแถบการกระตุ้นและแถบการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}(40\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นว่าแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 252 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 451 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 199 นาโนเมตร

ได้นำค่าความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดมาเขียนเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้
ในขณะที่ทำการทดลองซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้

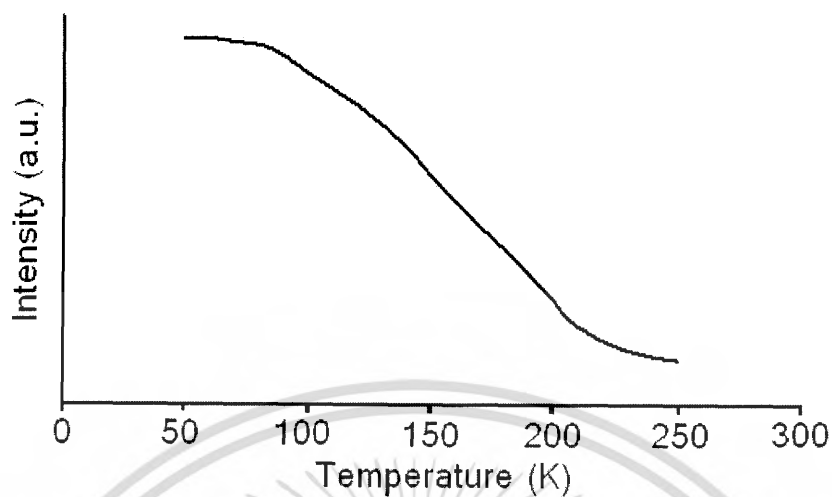


รูปที่ 4.8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ
 $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (1%) กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K

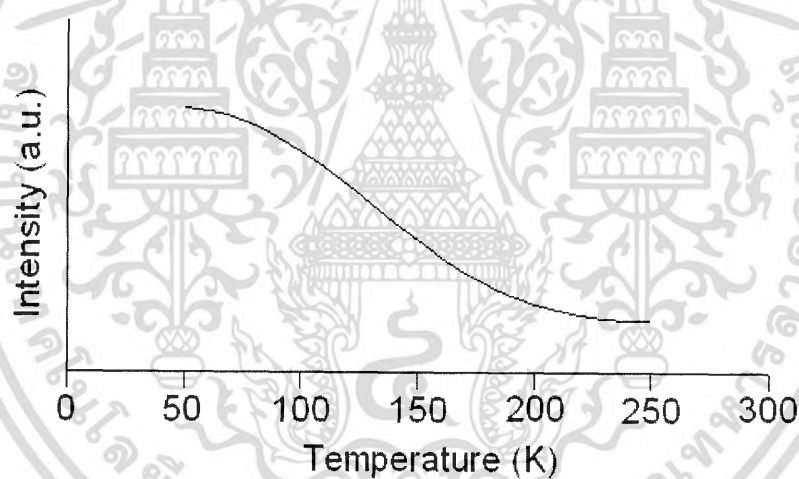


รูปที่ 4.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ
 $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (10%) กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

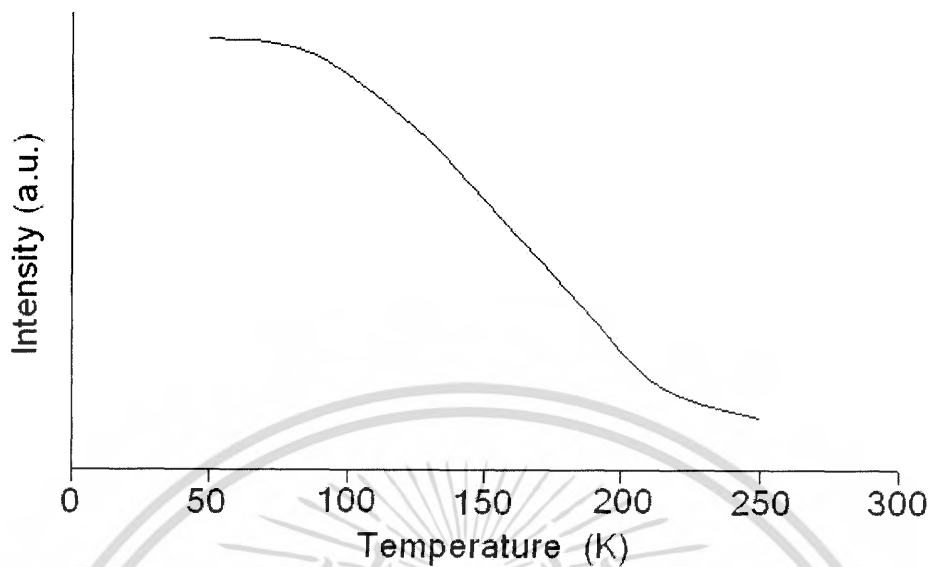


รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (20%) กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K



รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (30%) กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (40%) กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K

จากความสัมพันธ์ของความเข้มของการเรืองแสงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนำมาหาค่าพลังงานกระตุ้น (ΔE) จากสมการ

$$I = \frac{I_0}{\exp\left(\frac{\Delta E}{kT}\right) + 1} \quad (16)$$

$$I \approx I_0 \exp\left(\frac{-\Delta E}{kT}\right)$$

$$\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\left(\frac{\Delta E}{k}\right)\left(\frac{1}{T}\right)$$

$$= \frac{-\Delta E}{1000k} \left(\frac{1000}{T}\right)$$

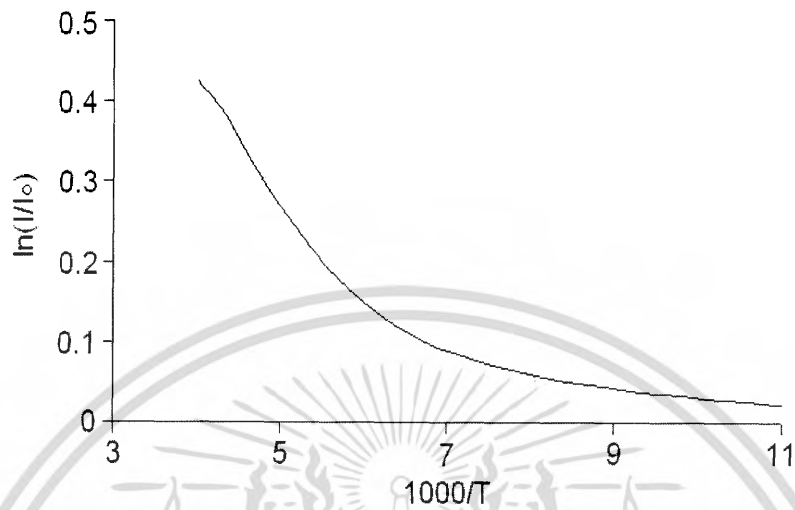
ดังนั้นจะได้ความชัน

$$\text{Slope} = -\left(\frac{\Delta E}{1000k}\right) \quad (17)$$

โดย $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

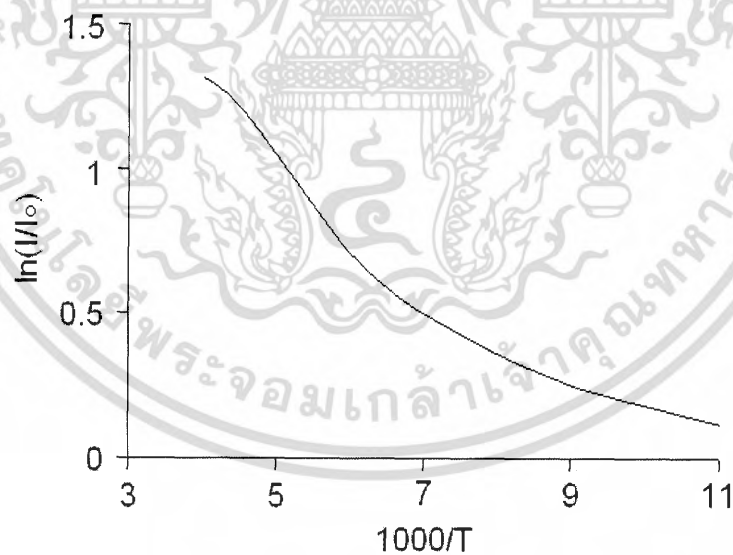
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.13 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}(1\%)$

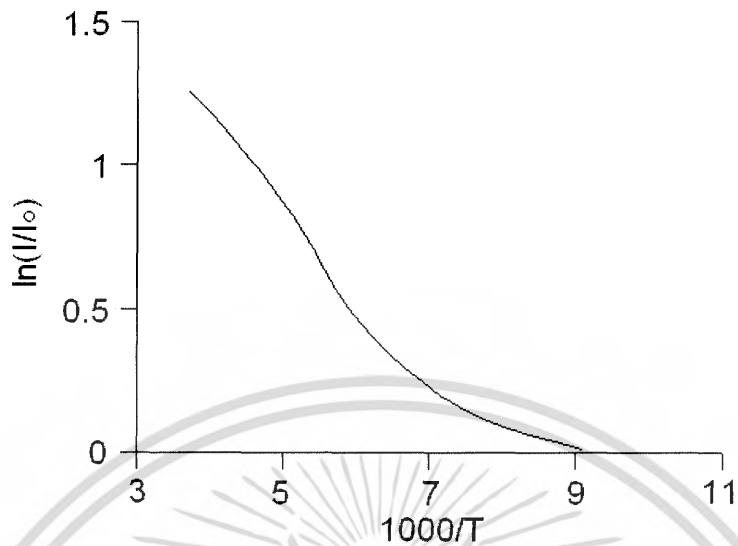
ซึ่งจากสมการ(17) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 12.6 meV



รูปที่ 4.14 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}(10\%)$

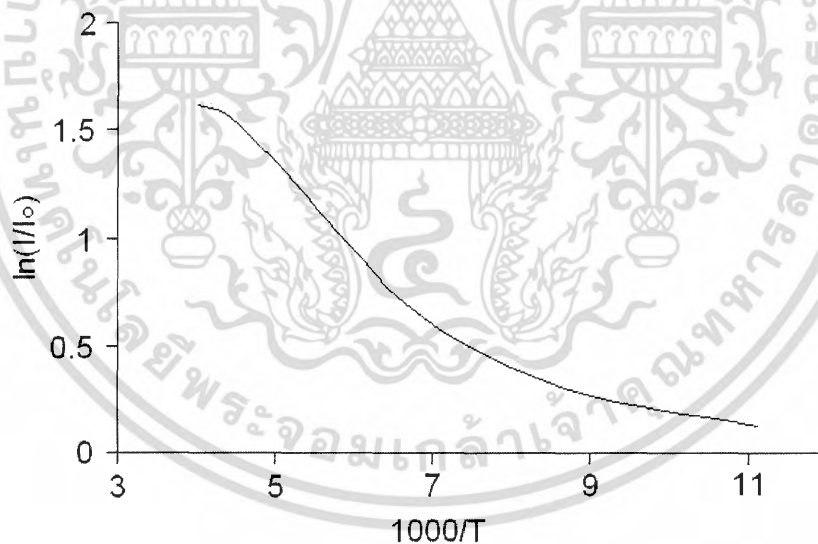
ซึ่งจากสมการ(17) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 29.2 meV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}$ (20%)

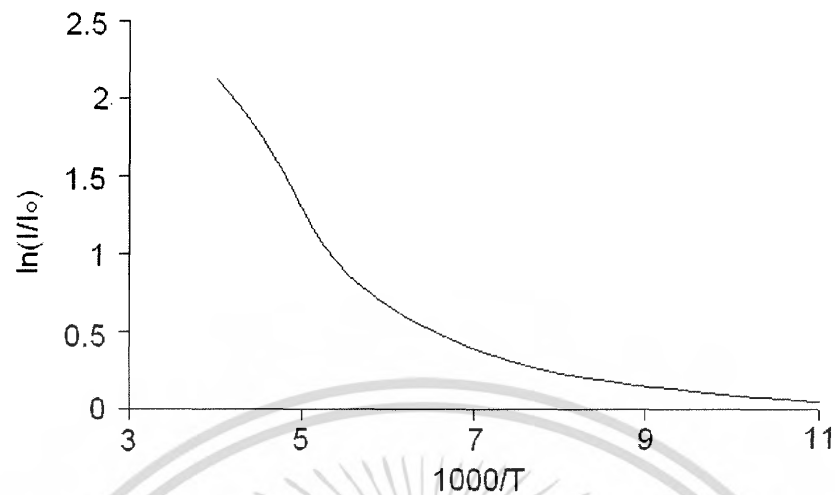
ซึ่งจากสมการ(17) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 29.3 meV



รูปที่ 4.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}$ (30%)

ซึ่งจากสมการ(17) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 33.2 meV

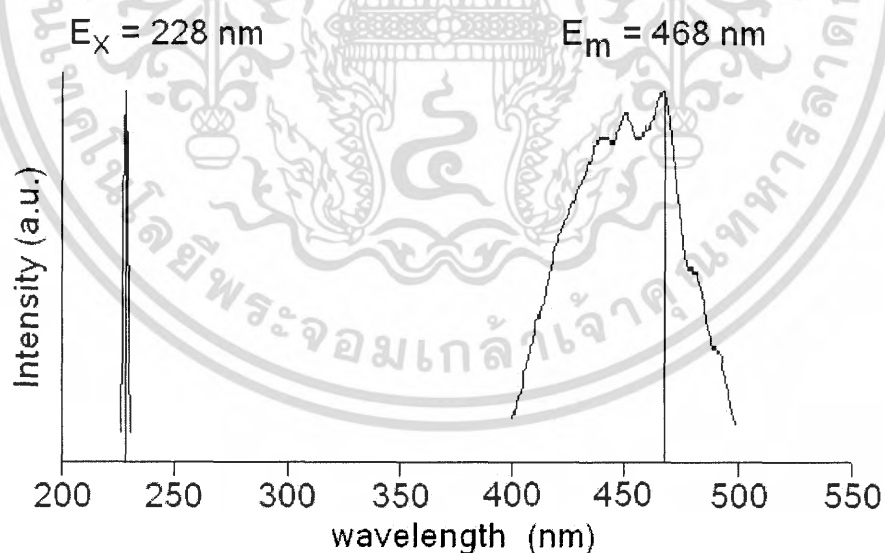
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}(40\%)$

ซึ่งจากสมการ(17) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 56.6 meV

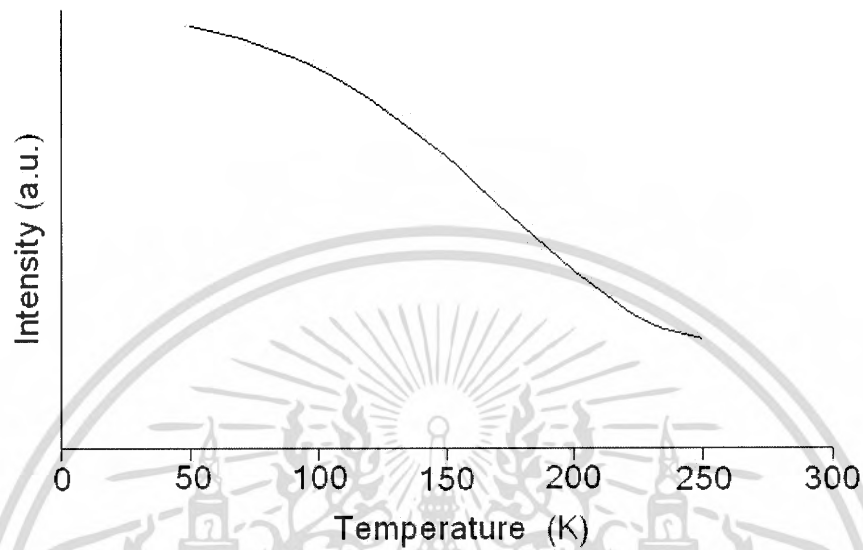
สำหรับในกรณีเจือด้วย Ge และ Si ได้ทำการศึกษาการเรืองแสงด้วยปริมาณการเจือ 1% ของน้ำหนักทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 50K ถึง 250K ซึ่งได้ผลการทดลองดังต่อไปนี้



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

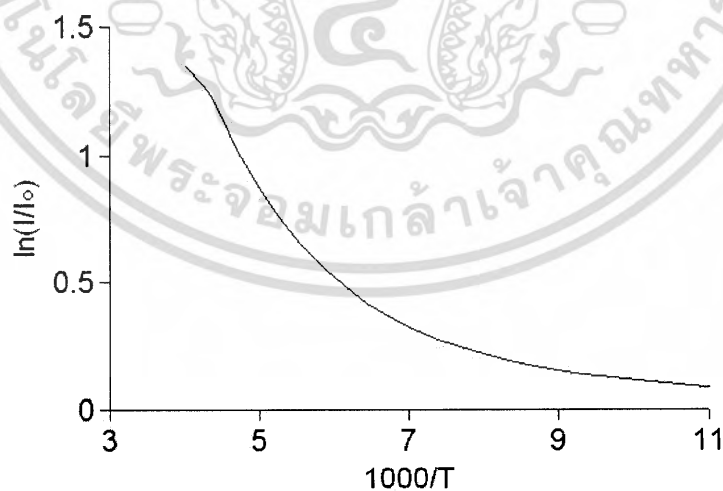
จากรูปที่ 4.18 แสดงให้เห็นว่าแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 228 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 468 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 240 นาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ได้นำค่าความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดมาเขียนเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ขณะทำการทดลองจะ ได้รับความสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}(1\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K

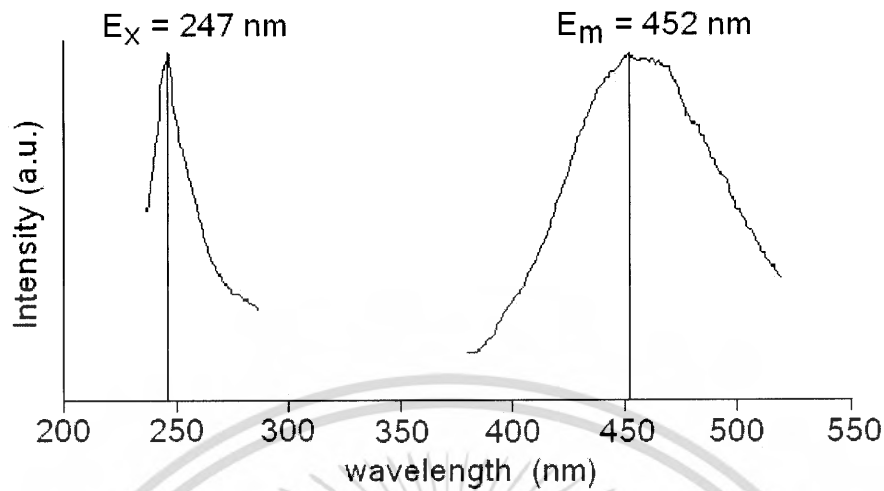
จากความสัมพันธ์ของความเข้มของการเรืองแสงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง มาหาค่าพลังงานกระตุ้น



รูปที่ 4.20 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}(1\%)$

ซึ่งจากสมการ(17) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 38.1 meV

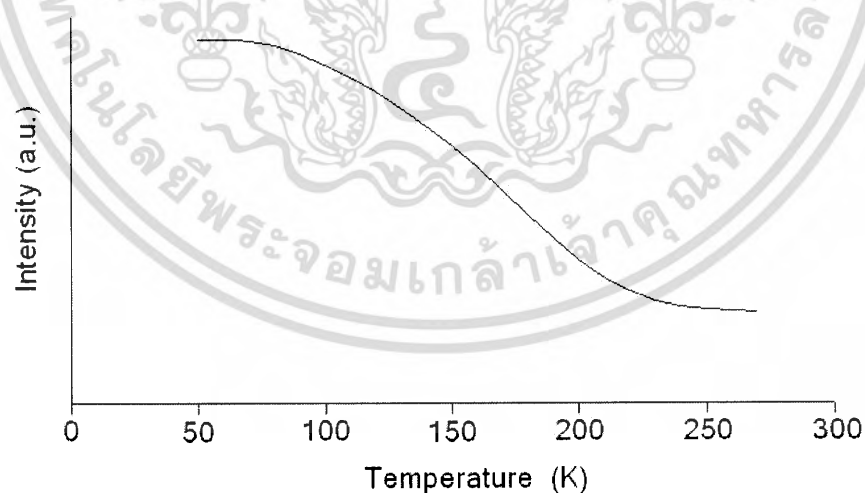
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงแถบการกระตุ้นและการเรืองแสงของ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}(1\%)$ ที่อุณหภูมิ 50K

จากรูปที่ 4.21 แสดงให้เห็นว่าแถบการกระตุ้นสูงสุดมีค่า 247 นาโนเมตร และแถบการเรืองแสงสูงสุดมีค่า 452 นาโนเมตร และมีค่าการเลื่อนไปของสโตกส์ 205 นาโนเมตร

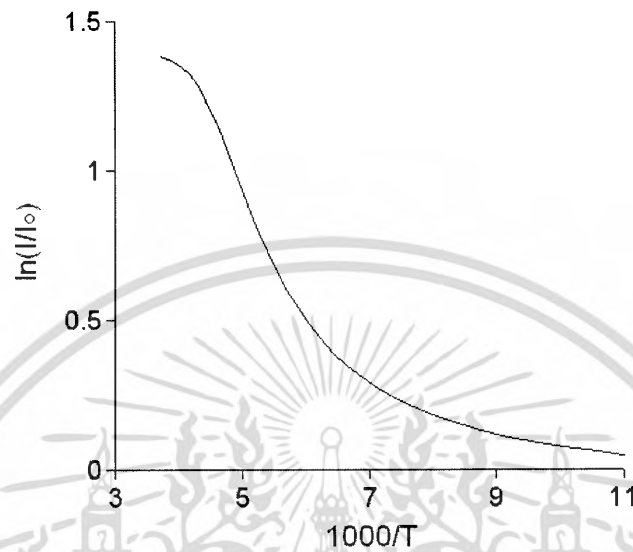
ได้นำค่าความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดมาเขียนเป็นความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ ในขณะที่ทำการทดลองจะได้อุณหภูมิสัมพันธ์ดังต่อไปนี้



รูปที่ 4.22 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มของการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}(1\%)$ กับอุณหภูมิขณะทำการทดลองตั้งแต่ 50K ถึง 250K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของความเข้มของการเรืองแสงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง มาหาค่า พลังงานกระตุ้น



รูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln(I/I_0)$ กับ $\frac{1000}{T}$ ของ $\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}$ (1%)

ซึ่งจากสมการ(17) หาค่าพลังงานกระตุ้นได้ = 39 meV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.1 เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลอง

สารประกอบ เซรามิกส์	แถบการกระตุ้น สูงสุด (nm)	แถบการเรืองแสง สูงสุด (nm)	ค่าการเลื่อนไป ของสโตกส์ (nm)	ค่าพลังงาน กระตุ้น (meV)
$\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (1%)	281	424	143	12.6
$\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (10%)	281	430	149	29.2
$\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (20%)	242	443	201	29.3
$\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (30%)	248	445	157	33.2
$\text{InBO}_3 : \text{Bi}^{3+}$ (40%)	252	451	199	56.6
$\text{InBO}_3 : \text{Ge}^{4+}$ (1%)	228	468	240	38.1
$\text{InBO}_3 : \text{Si}^{4+}$ (1%)	247	452	205	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการทดลองได้ทำการเตรียมสารประกอบเซรามิก InBO_3 และสารประกอบเซรามิก InBO_3 ที่เจืออะตอมของ Bi ในปริมาณการเจือ 1, 10, 20, 30 และ 40% ของปริมาณสารทั้งหมด และสารประกอบเซรามิก InBO_3 ที่เจืออะตอมของ Si และ Ge ในปริมาณการเจือ 1% ของปริมาณสารทั้งหมด โดยวัตถุประสงค์คือทำสารเรืองแสงเพื่อที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับนิวตริโน โซลิตเซตทเลเซอร์ และ คอนเซนเตรเตอร์ในเซลล์แสงอาทิตย์ จากการตรวจสอบลักษณะโครงสร้างของผงสารประกอบ InBO_3 โดยการเปรียบเทียบรูปแบบการเลี้ยวเบนที่ได้กับรูปแบบการเลี้ยวเบนของไฟล์มาตรฐาน ซึ่งพบว่าเป็นโครงสร้างของ InBO_3 ที่มีโครงสร้างแบบเฮกซะโกนอล และมีความเป็นผลึกที่ดี และจากการตรวจสอบการเรืองแสงของ InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi, Si และ Ge โดยเครื่องสเปคโตรฟลูออโรโฟโตมิเตอร์จะพบว่า

ในกรณี InBO_3 ที่เจือด้วยอะตอมของ Bi ด้วยปริมาณการเจือ 1, 10, 20, 30 และ 40% ของปริมาณสารทั้งหมดที่อุณหภูมิ 50K พบว่าจะปรากฏตำแหน่งของแถบการกระตุ้นสูงสุดอยู่ในช่วงความยาวคลื่น 242-281 nm และปรากฏตำแหน่งของแถบการเรืองแสงสูงสุดอยู่ในช่วง 424 – 451 nm โดยค่าแถบการเรืองแสงจะมีค่าเลื่อนไปทางด้านที่มีความยาวคลื่นมากขึ้นเมื่อปริมาณในการเจือเพิ่มขึ้น นอกเหนือจากนี้ความเข้มของแถบการเรืองแสงสูงสุดของ $\text{InBO}_3:\text{Bi}^{3+}$ ที่ 1, 10, 20, 30 และ 40% ของปริมาณสารทั้งหมดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลอง ซึ่งทำให้ทราบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในขณะที่วัดการเรืองแสงมีผลต่อความเข้มของตำแหน่งของการเรืองแสงสูงสุด ทั้งนี้เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงพลังงานความร้อนจะทำให้จุดสมดุลของการสั่นของอะตอมเลื่อนออกจากจุดสมดุลเดิม ส่งผลให้ความเข้มของการเรืองแสงลดต่ำลง และค่าพลังงานการกระตุ้นมีค่า 12.6-56.6 meV

ในกรณี InBO_3 เจือด้วยอะตอมของ Ge^{4+} ด้วยปริมาณการเจือ 1% ที่อุณหภูมิ 50K พบว่าจะปรากฏตำแหน่งแถบการกระตุ้นสูงสุดที่ 228 nm และปรากฏตำแหน่งการเรืองแสงสูงสุดที่ 468 nm และความเข้มของแถบการเรืองแสงสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลอง และมีค่าพลังงานกระตุ้น 38.1 meV

ในกรณี InBO_3 เจือด้วยอะตอมของ Si^{4+} ด้วยปริมาณการเจือ 1% ที่อุณหภูมิ 50K พบว่าจะปรากฏตำแหน่งแถบกระตุ้นสูงสุดที่ 247 nm และจะปรากฏตำแหน่งแถบการเรืองแสงสูงสุด

ที่ 452 nm และความเข้มของแถบการเรืองแสงสูงสุดจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิในขณะที่ทำการทดลอง และมีค่าพลังงานกระตุ้น 39 meV

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในการเตรียมสารประกอบเซรามิกส์ InBO₃ ที่เจือด้วยอะตอมของธาตุ Bi , Ge และ Si พบปัญหาและเทคนิคบางประการที่สามารถนำไปปรับปรุงการทดลองเพื่อให้ได้ผลการทดลองดีขึ้น โดยข้อเสนอแนะมีดังนี้

1. ในการเตรียมเม็ดสาร ถ้าทิ้งไว้นานจะเกิดความชื้นในเนื้อสารเมื่อนำไปทำการอัดเป็นเม็ดก่อนเผาจะทำให้อัดเป็นเม็ดไม่ได้ สามารถแก้ไขได้โดยนำไปเผาอีกครั้งที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที สารที่ได้จะมีความแห้งสามารถนำไปอัดเม็ดได้
2. ในการเผาเม็ดสารนั้นได้เผาเม็ดสารหลายเม็ดในครุชชีเบิลเดียว แต่ต้องทำการ โรย SiO₂ เพื่อกันไม่ให้สารเกิดการทำปฏิกิริยากันระหว่างเม็ดสาร แต่เมื่อทำการตรวจสอบการเรืองแสงของเม็ดสารจะให้เห็นแถบการเรืองแสงของ Si⁴⁺ ด้วย ดังนั้นควรเผาในปริมาณ 1 เม็ดต่อ 1 ครุชชีเบิลจะดีที่สุด
3. ในการวัดการเรืองแสงของสารที่อุณหภูมิต่ำนั้นอุณหภูมิสูงขึ้นอย่างรวดเร็วมากจึงทำให้การวัดผลนั้นคลาดเคลื่อน แก้ไขโดยการใช้ เครื่องควบคุมอุณหภูมิ
4. ควรทำในห้องที่มีดสนิท มิฉะนั้นจะทำให้เกิดการรบกวนของแสงที่ความยาวคลื่นย่านอื่น ทำให้ผลการทดลองคลาดเคลื่อน ไป
5. ในการทดลองควรใช้แหล่งกำเนิดที่มีพลังงานสูงเพื่อตรวจสอบการจับอนุภาคนิวตริโน เช่น รังสีแกมมา เป็นต้น
6. ควรมีการศึกษาเรื่องค่าชีวิตพาหะของสารประกอบเซรามิกส์ชนิดอื่น ๆ ต่อไปเพื่อให้ได้ตัวตรวจจับนิวตริโนที่ดีที่สุด

เอกสารอ้างอิง

1. งามนิตย์ แก้วแดง , ฐิตินัย แก้วแดง , ชัยสิงห์ ภูรักษาเกียรติ , ทิพรรัตน์ วงษ์เจริญ , การเตรียม และ การศึกษาสมบัติของฟิล์มบาง $Cd_{1-x}Zn_xS$ เพื่อประดิษฐ์เป็นเซลล์แสงอาทิตย์ , รายงานวิจัยเสนอต่อ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
2. 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.,1995. Indium disilicate, a new fast scintillator, **Nuclear Instruments and methods in Physics research A** 354., : 527-529.
3. Gaewdang, T., Chaminade, J. P., Garcia, A., Pouchard, M., Hagenmuller, P. and Jacquier, B.,1994. Luminescence of Ce^{3+} in the $In_xSc_{1-x}BO_3(0 \leq x \leq 1)$ solid solution, **J.Phys.Chem-Solids.**, 55: 501-504.
4. Katsuhisa, Tanaka., Noriyuki, Tamura., Kazuyuki, Hirao., and Nachiro, Soga.,1999. Variation of optical properties with crystallization of $InBO_3 : Cr^{3+}$ from sodium indium borosilicate glass, **Materials Chemistry and Physics.**, 59: 82-87.
5. J. P. Chaminade, A. Garcia, M. Pouchard, C. Fouassier, B. Jacquier, D. Perret-Gallix and L. Gonzales-Mestres.,1990., **J. Cryst. Growth.**,99: 799-782.
6. Dotsenko, V. P., Berezovshaya, I. V. and Efrushina, N. P.,1996. Photoionization and luminescence properties of Bi^{3+} in $In_{1-x}Lu_xBO_3$ Solid solutions, **J. Phys. Chem Solids.**, 57: 437-441.
7. Blasse, G.,1984. Luminescence of inorganic solids : Trends and application, **Reviews in inorganic chemistry.**,: 319-376.
8. Blasse, G. and De Mello Donega, C., 1994. The luminescence of bismuth (III) in indium orthoborate, **Solid State Communications.**, 91: 29-31.
9. Blasse, G., Mello-Dogena, C. de, Berezovskaya, I.V. and Dotsenko, V.P., 1994. **Solid State Communications.**, 91: 29.
10. Available from: <http://home.hetnet.nl/~turing/preparation 3dim 4.html>.
11. Available from: <http://www.uwgb.edu/dutchs/PETROLOGY/Calcite%20Structure .HTML>.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. Available from: <http://www.uwgb.edu/dutchs/petrolgy/calcite%20structure.htm>.
13. บัญชา ชนบุญสมบัติ. การศึกษาวัสดุโดยเทคนิคดิฟแฟรกชัน. สำนักพิมพ์ส.ส.ท.สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น), 2544.
14. กรรณิกา อุปโคตร. การปลูกฟิล์มบางซิงค์ซัลไฟด์ โดยระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนในสุญญากาศสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2544.
15. ธีรพร พรหมรส. การออกแบบและลักษณะเฉพาะของหัวดีซีแมกนีตรอนสปีดเตอริง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
16. คุสิต เครื่องาม. สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน. สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.
17. Wilson, J. and Hawkes, J. F. B., 1989. **Optoelectronics An Introduction 2nd ED. Prenticehall, Singapore.**
18. Sze, S. M., 1956. **Physic of Semiconductor Device 2nd ED., John Wiley & Song Inc.**
19. Anthony, R. West., 1989. **Solid state Chemistry and It's Application., John Wiley & Sons Singapore.**
20. สุภาณี ลิ้มสุวรรณ. **กลศาสตร์ควอนตัม, โรงพิมพ์เลียงเชียง. กรุงเทพฯ, 2542.**
21. Duffy, J. A., 1990. **Bounding, Energy levels. And Bands in Inorganic Solids, Longman Group Uk Limited., :2.**
22. Eisberg, R. M., 1961. **Fundamentals of modern physic, John Wiley 2 sons Inc., : 369-373.**
23. Gradus, J Divksen., Arthur, N. J. M. Hoffman., Teus, P Van de Bout., Maurice, P. O. and george Blasse., 1991. **Luminescence Spectra of pure and Doped GaBO₃ and LiGO₂, J.MATER.Chem., : 1001-1005.**
24. Blasse, G., 1991. **X-Ray excited luminescence of oxides with d¹⁰ ions, Materials Chemistry and Physics., : 275-279.**
25. Available from : [http://en.wihipedia.org/wiki/stokes shift](http://en.wihipedia.org/wiki/stokes_shift).
26. Available from : <http://www.mmat.ubc.ca/courses/mmat382/sections/cnc513.doc>.
27. Blasse, G., 1974. **Thermal Quenching of chateristic Luminescence.II , JOURNAL OF SOLID STATE CHEMISTRY., 9: 147-151.**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

28. Kang, H. I., Kim, J. S., Lee, M., Bahng, J. H., Choi, J. C., Park, H. L., Kim, G. C., Kim, T. W., Hwang, Y. H., Mho, S. I., Eom, S. H., Yu, Y. S., Song, H. J. and Kim, W. T., 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: 633-636.
29. Kim, J. S., Park, H. L., Kim, T. W., Hwang, Y. H., Kim, H. K., Mho, S. I. and Han, S. D., 2003. Luminescence enhancement of $\text{ZnGa}_2\text{O}_4 : \text{Mn}^{2+}$ by Ge^{4+} and Li^+ doping, **Solid State Communications**., 126: 515-518.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ไฟล์มาตรฐานของการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

Pattern : 82-1188		Radiation = 1.540598		Quality : calculated		
In(BO ₃)		2th	<i>l</i>	<i>h</i>	<i>k</i>	<i>l</i>
Indium Borate		24.213	100	0	1	2
		31.540	90	1	0	4
		34.840	5	0	0	6
Lattice : Rhombohedral		37.267	32	1	1	0
S.G. : R-3c (167)		41.322	6	1	1	3
a = 4.82170		44.940	25	2	0	2
		49.602	15	0	2	4
c = 15.43800		51.934	35	1	1	6
Z = 6		52.174	21	0	1	8
		58.761	1	2	1	1
ICSD COLLECTION CODE : 075254		59.757	18	1	2	2
TEMPERATURE FACTOR : ATF		63.646	14	2	1	4
REMARKS FROM ICSD : REM TEM 296		64.277	6	1	0	10
		65.852	6	2	0	8
*Calculated from ICSD using POWD-12++,(1997)primary reference:		66.478	<1	1	2	5
*Acta Crystallogr.,Sec.C.,volume50,page 1857,(1994):		66.890	1	1	1	9
Cox,J.R.,Keszler,D.A.		67.203	10	3	0	0
		73.562	3	0	0	12
		73.763	2	2	1	7
Radiation : CuKα1		76.712	4	0	2	10
Lambda : 1.54060		77.982	4	3	0	6
Filter : Not specified		78.175	8	1	2	8
d-sp : Calculated spacings		79.438	3	2	2	0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Pattern : 17-933		Radiation = 1.540598				Quality : Indexed			
InBO ₃		2th	l	h	k	l			
Indium Borate		24.232	100	1	0	2			
		31.521	100	1	0	4			
		34.827	6	0	0	6			
Lattice : Hexagonal		Mol. weight = 173.63	37.265	35	1	1	0		
S.G. : (0)		Volume [CD] = 311.36	41.305	8	1	1	3		
a = 4.82300		Dx = 0.926	44.927	30	2	0	2		
c = 15.45600			49.584	20	2	0	4		
			51.991	358	1	1	6		
			52.133	20	1	0	8		
			59.726	20	2	1	2		
ADDITIONAL DIFFRACTION LINE(S) : Additional weak lines not listed.			63.590	15	2	1	4		
			64.179	6	1	0	10		
			65.807	8	2	0	8		
			67.189	10	3	0	0		
			73.462	2	0	0	12		
*Am,Mineral.,volume 46,page 1030,(1961) primary reference: Levin,Roth,Matin.			76.663	4	2	0	10		
			77.926	4	3	0	69		
			78.153	8	2	1	8		
			79.393	4	2	2	0		
Radiation : CuK α		Filter : Beta							
Lambda : 1.54180		d-sp : Not given							
SS/FOM : F29=14(0.0172,118)									

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ตารางที่ ข.1 แสดงรัศมีไอออนของธาตุต่าง ๆ [21]

ไอออน	การจัดเรียงตัว อิเล็กตรอน	รัศมีไอออน(Å)
Cu^+	$3d^{10}$	0.95
Cu^{2+}	$3d^9$	0.87
Ag^+	$4d^{10}$	1.15
Ti^{3+}	$3d^1$	0.67
Cr^{3+}	$3d^3$	0.62
Mn^{3+}	$3d^4$	0.65
Fe^{3+}	$3d^5$	0.65
Co^{3+}	$3d^6$	0.61
Ni^{3+}	$3d^7$	0.60
B^{3+}	$1s^2$	0.20
Sn^{2+}	$5s^2$	0.96
Sb^{3+}	$5s^2$	2.45
Bi^{3+}	$6s^2$	1.03
Pb^{2+}	$6s^2$	1.19
Si^{4+}	$2p^6$	0.41
Ge^{4+}	$3d^{10}$	0.53
Sn^{4+}	$4d^{10}$	0.71
In^{3+}	$4d^{10}$	0.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

ซินเทอริง (Sintering) [26]

ซินเทอริง โดยปกติแล้วจะเกี่ยวกับการดำเนินการด้วยความร้อนกับมวลสารที่มีการให้อุณหภูมิที่สูงขึ้น โดยทั่ว ๆ ไป $T > 0.5T_m$ [K] ในขอบเขตอุณหภูมิของการเกิดการแพร่สารที่ส่งผ่านมวลจำนวนมาก ความสำเร็จในการซินเทอริงโดยทั่วไปจะมีผลลัพท์ใน dense polycrystalline solid อย่างไรก็ตาม การซินเทอริงสามารถดำเนินการได้เฉพาะส่วน (คือที่จุดเชื่อมต่อของเกรน) ด้วยการไม่ประเมินความเปลี่ยนแปลงในความหนาแน่นเฉลี่ยของมวลสารทั้งหมด

สิ่งที่ได้จากการซินเทอริงเซรามิกส์

กระบวนการทำเซรามิกส์นั้นอยู่บนการทำซินเทอริงกับผงที่อัดแน่นที่มีค่ามากกว่าจุดหลอมเหลว (สมบัติเฉพาะตัวของเหล็ก) สาเหตุจาก

1. เซรามิกหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูง
2. การแข็งตัวของโครงสร้างระดับไมโครนั้นไม่สามารถที่จะเปลี่ยนแปลง plastic deformation
3. ให้ผลเกรนหยาบ ๆ จะทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มของรอยร้าว
4. มีอุณหภูมิในการนำไฟฟ้าที่ต่ำ (<30-50W/mK)

อย่างไรก็ตาม มีเซรามิกส์บางชนิดที่ทนความร้อนสูง เช่น Al_2O_3 , Al_2O_3/ZrO_2 ที่ถูกสร้างผ่านกระบวนการหลอม/หล่อ/solidification

กระบวนการซินเทอริง [26]

กระบวนการซินเทอริง เป็นกระบวนการที่ทำให้สารที่มีลักษณะเป็นผงเพิ่มแรงยึดเกาะกันแน่นระหว่างอนุภาคด้วยการให้ความร้อน โดยจะใช้ในการสร้างเซรามิกส์และพบมากในการใช้ผสมสาร 2 ชนิดที่เป็นผง ทำให้เกิดการแพร่ของสาร 2 ชนิดรวมกันได้

ในตัวเซรามิกส์นั้นจะมีลักษณะเป็นรูพรุน ซึ่งจะทำให้อนุภาคของสารที่จะนำมาเชื่อมกันสามารถผ่านเข้าไปในรูที่พรุนได้ด้วยการให้ความร้อน จนถึงจุดหลอมเหลวของสารที่นำมาเชื่อมเข้าไป ในกรณีที่ความหนาแน่นของเกรนมากนั้นจะต้องมีการลดขนาดทั้งหมดของเซรามิกส์ลง การเคลื่อนที่ของมวลที่เกิดขึ้นระหว่างการซินเทอริงจะเข้าไปรวมกันในการลดจำนวนรูพรุน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการที่สารเกิดการระเหยและความแน่นนั้นจะอาศัยการแพร่ ในขั้นตอนสุดท้ายอะตอมจะเคลื่อนที่ไกลขอบเขตของผลึก โดยจะเข้าไปยังที่กำแพงของรูพรุนซึ่งจะเกิดการแพร่ของมวลอีกครั้ง จากภายในเนื้อสารและทำให้กำแพงรูพรุนตื้นขึ้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

นายก้องภพ สำเร็จ เกิดเมื่อวันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2527 เป็นคนระยองโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนสาธิต มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปทุมวัน และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใน คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2545

นายณัฐวัฒน์ ทুমเมฆ เกิดเมื่อวันที่ 22 สิงหาคม พ.ศ. 2526 เป็นคนอุบลราชธานีโดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนเดชอุดม และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในคณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2545

นายพงศ์ศักดิ์ แสงเพชร เกิดเมื่อวันที่ 11 เมษายน พ.ศ.2527 เป็นคนพระนครศรีอยุธยา โดยกำเนิด สำเร็จการศึกษาระดับเตรียมอุดมศึกษา ณ โรงเรียนธรรมศาสตร์คลองหลวงวิทยาคม และได้เข้ารับการศึกษาระดับอุดมศึกษา ณ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ใน คณะวิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ ในปีการศึกษา 2545