สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างต้นแบบระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรสโคปี

นางสาวสุจิตรา สงฆ์เจริญ
นางสาวอัปสรศรี มากจันทร์

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 43941
วัน, เดือน, ปี 18 ต.ค. 2545
.b.....
.i.....

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์
คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A Prototype of Photoluminescence Spectroscopy Measurement System

Miss Sujitra Songcharoen

Miss Absornsri Markchan

A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the

Requirement for the Degree of Bachelor of Science

Department of Applied Physics

Faculty of Science

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	การสร้างต้นแบบระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรสโคปี
โดย	นางสาวสุจิตรา สงฆ์เจริญ 41054074
	นางสาวอัปสรศรี มากจันทร์ 41054083
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว
	รศ.สุวรรณ คูสำราญ
	อาจารย์วิษณุ เพชรภา

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้นับโครงงานพิเศษนี้ เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

.....
(ผศ.วิชาญ เตชิตธีระ) หัวหน้าภาควิชา

คณะกรรมการโครงงานพิเศษ

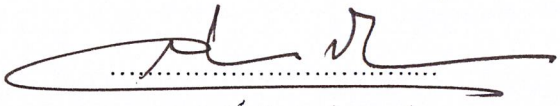
.....
ผศ.วิชาญ เตชิตธีระ ประธานกรรมการ

.....
รศ.สุวรรณ คูสำราญ กรรมการ

.....
ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว กรรมการ

.....
อ.วิษณุ เพชรภา กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กรรมการ

อ.สุรศักดิ์ พิพัฒน์ศาสตร์

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ การสร้างต้นแบบระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรสโคปี
นักศึกษา นางสาวสุจิตรา สงฆ์เจริญ 41054074
นางสาวอัปสรศรี มากจันทร์ 41054083
อาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว
รศ.สุวรรณ คูสำราญ
อาจารย์วิษณุ เพชรภา
ภาควิชา ฟิสิกส์ประยุกต์
ปีการศึกษา 2544

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้ เป็นการศึกษาถึงหลักการของการใช้แสงเพื่อกระตุ้นให้เกิดการเปล่งแสง หรือที่เรียกว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ รวมทั้งรายละเอียดของเทคนิคและอุปกรณ์ในการสร้างระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ เพื่อนำมาวิเคราะห์สมบัติของสารกึ่งตัวนำ ตลอดจนผลกระทบของอุณหภูมิที่มีต่อสมบัติของสารกึ่งตัวนำเหล่านี้ โดยกระทำที่อุณหภูมิห้อง ซึ่งเราสามารถนำกราฟที่ได้จากระบบวัดนี้มาวิเคราะห์ถึงสมบัติของสารซึ่งได้แก่ โครงสร้างของแถบพลังงานไปจนถึงจุดบกพร่องที่เกิดในโครงผลึก เพื่อนำมาพัฒนาคุณภาพของสารกึ่งตัวนำให้ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Special Project Title	A Prototype of Photoluminescence Spectroscopy Measurement System	
Name	Miss Sujitra	Songcharoen
	Miss Absornsri	Markchan
Special Project Advisor	Asst.Prof.Dr.Jiti	Nukaew
	Assoc.Prof.Suwan	Kusamran
	Mr.Wisanu	Petcharapa
Department	Applied Physics	
Academic Year	2001	

ABSTRACT

This project is established to study luminescence caused by excitation from the photon absorption or so called Photoluminescence. The prototype of photoluminescence experiment was arranged in order to measure the luminescent signal of semiconductor. Analyzed results from experimental data can review important properties of semiconductor such as band-gap energy and defect in crystalline which guide to grow better quality semiconductor.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงงานพิเศษนี้ประสบกับปัญหาและอุปสรรคต่าง ๆ มากมาย และการแก้ปัญหาเหล่านี้จะไม่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ ถ้าหากขาดบุคคลเหล่านี้

ผศ.ดร.จิติ หนูแก้ว	ผู้ที่ให้โอกาสดีๆ และแนะนำแนวทางในการดำเนินโครงงาน
อาจารย์วิษณุ เพชรภา	ผู้ให้คำปรึกษาในการทำงาน
น.ส.กรรณิกา อุประโคตร	ผู้ที่ให้คำปรึกษาและแนวทางการแก้ไขปัญหามาโดยตลอด
พี่ ๆ ชาว QOS Lab ทุกท่าน	ที่ให้เอื้อเฟื้อเวลา อุปกรณ์-สถานที่ และความช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน
คุณ อาโมทย์	ที่อุปการะกล้องดิจิตอลถ่ายภาพอุปกรณ์การทำงาน
น.ส.ลลิตา	เอื้อเฟื้อคอมพิวเตอร์ในการทำงาน
น.ส.วิชชุลดาและน.ส.อริยา	เอื้อเฟื้อที่พักระหว่างการทำงาน
เพื่อน ๆ ทุกคน	สำหรับกำลังใจและทุก ๆ ความช่วยเหลือ

สุดท้ายของกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ ที่เข้าใจและคอยเป็นกำลังใจ รวมทั้งทุนการศึกษาตลอดจนโอกาสดี ๆ ที่ทำให้มีวันนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญรูป	จ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงานพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานพิเศษ	2
1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ	3
2.1 ลูมิเนสเซนซ์	3
2.2 โฟโตลูมิเนสเซนซ์	4
บทที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย	11
3.1 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์	11
3.2 ขั้นตอนการวัดการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำโดยระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกสโคปี	16
บทที่ 4 ผลการทดลอง	18
บทที่ 5 วิเคราะห์ผลการทดลอง	21
5.1 การวิเคราะห์ผลการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำ	21
5.2 การแก้ไขปัญหาในการทดลอง	22
5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบวัด	22
ภาคผนวก ก	
ภาคผนวก ข	
ภาคผนวก ค	
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะแบบเปล่งแสงของพาหะอิสระ ระหว่างแถบคอนดักชั่นและแถบวาเลนซ์	5
รูปที่ 2.2 การเปล่งแสงที่เกิดจากการทรานซิชั่นของอิเล็กตรอนอิสระ กับระดับพลังงานของสารเจือ	5
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของศูนย์กลาง ชนิด F ใน KCl	6
รูปที่ 2.4 การแสดงเอกซิตอนซึ่งถูกจับที่ระดับโดเนอร์	8
รูปที่ 2.5 สเปกตรัมการเปล่งแสงของเบานด์เอกซิตอนของ GaP : S	8
รูปที่ 2.6 การเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างคู่โดเนอร์ และแอกเซ็ปเตอร์	10
รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์	11
รูปที่ 3.2 He-Ne Laser และ He-Cd Laser	12
รูปที่ 3.3 ไดอะแกรม และรูปของโมโนโครมิเตอร์	12
รูปที่ 3.4 แสดงรูปของ chopper ที่ใช้ตัดแสง	13
รูปที่ 3.5 สัญญาณเมื่อผ่านตัวตัดแสง	13
รูปที่ 3.6 แสดงแท่นยึดสารกึ่งตัวนำ	14
รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อคอินรุ่น SR510	14
รูปที่ 3.8 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อคอินในระบบวัด	15
รูปที่ 3.9 ไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบวัด	15
รูปที่ 3.10 แสดงหน้าจอของโปรแกรมเพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์	16
รูปที่ 3.11 แสดงหน้าจอของโปรแกรมในการบันทึกรูปกราฟ	17
รูปที่ 3.12 หน้าจอของโปรแกรมที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า พลังงานโฟตอนกับความเข้มแสง	17
รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ GaAsP	18
รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ InP	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ ZnSe ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 100^0 C 19

รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ ZnSe ที่ความหนา500 nm ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 25^0 C 19

รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ ZnSe ที่ความหนา 1 μm ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 25^0 C 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของโครงงานพิเศษ

ในการพัฒนาและประยุกต์ทำสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่มีคุณภาพสูง โดยการปลูกผลึกเป็นแผ่นฟิล์มบางเพื่อทำโครงสร้างสารกึ่งตัวนำ ในปัจจุบันได้มีการศึกษากันอย่างกว้างขวางเพื่อผลิตเป็นสิ่งประดิษฐ์ใหม่ในด้านอุตสาหกรรม เช่น การผลิตแสงเลเซอร์จากสารกึ่งตัวนำ, LED เป็นต้น

การตรวจสอบคุณสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำนั้นเพื่อป้อนกลับสู่การปลูกผลึกให้มีคุณภาพที่ดีขึ้น ซึ่งมีหลายวิธีขึ้นอยู่กับคุณสมบัติที่ต้องการตรวจสอบ ซึ่งในโครงงานพิเศษนี้ได้ศึกษาสมบัติของการเปล่งแสง (luminescence) ของสารกึ่งตัวนำ

การเปล่งแสงนั้นพัฒนามาจากการศึกษาสเปกตรัมของแสงโดยอาศัยหลักการพื้นฐานของการดูดกลืนและการแผ่รังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของสารซึ่งนำไปสู่ความสำเร็จในการศึกษาสมบัติทางควอนตัม เมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างระหว่างการเปล่งแสงกับสเปกตรัมของแสง พบว่าการศึกษาสเปกตรัมนั้นเป็นการศึกษาการดูดกลืนและการแผ่รังสีของแสงที่อุณหภูมิสัมบูรณ์ซึ่งสามารถสังเกตได้เพียงการปล่อยพลังงานความร้อนออกมาเท่านั้นดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำที่สภาวะคงที่มากที่สุด ส่วนในการศึกษาการเปล่งแสงนั้นเราสามารถศึกษาการปล่อยพลังที่มากกว่าพลังงานความร้อน ทำให้สามารถศึกษาเวลาในเปล่งแสง ปัจจัยที่มีผลต่อการเปล่งแสงที่เพิ่มขึ้นและลดลง

นอกจากนั้นการเปล่งแสงโดยการกระตุ้นให้พลังงานเพิ่มขึ้นนั้นมีหลายวิธี แต่ละวิธีนั้นขึ้นอยู่กับสิ่งที่ใช้ในการกระตุ้น ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แสงในการกระตุ้นด้วยแสงที่เรียกว่า โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ซึ่งการศึกษาโดยวิธีนี้ในปัจจุบันได้รับการยอมรับว่าสามารถศึกษาโครงสร้างแถบพลังงานในสารกึ่งตัวนำและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งนี้ระบบนี้มีประโยชน์อย่างมากในการตรวจสอบคุณภาพของการปลูกผลึกในโครงสร้างระดับไมโครเมตรและนาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงงานพิเศษ

1.2.1. เพื่อสร้างระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนต์

1.2.2. เพื่อศึกษาสมบัติการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำ

1.3 ประโยชน์ที่ได้รับ

1.3.1 ทำให้ทราบถึงหลักการของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่ประยุกต์ใช้ในระบบวัดนี้

1.3.2 ทำให้ได้ระบบต้นแบบของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่สามารถใช้งานได้จริงในห้องปฏิบัติการวิจัยสารกึ่งตัวนำ

1.3.3 สามารถนำระบบวัดนี้ไปใช้วิเคราะห์หาสมบัติการเปล่งแสงของสารเพื่อการป้อนกลับสู่การปลูกผลึกที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2
ทฤษฎีและหลักการ

2.1 ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence)

ลูมิเนสเซนซ์ (luminescence) เป็นชื่อเรียกปรากฏการณ์ที่เกี่ยวข้องกับการเปล่งแสงทั้งหมด นอกเหนือจากการเปล่งแสงชนิดการแผ่รังสีความร้อน (thermal radiation) การเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนซ์เกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่สถานะที่ระดับพลังงานต่ำกว่า ลูมิเนสเซนซ์สังเกตได้ทั้งในวัสดุก๊าซ ของเหลว และของแข็งและทั้งวัสดุชนิดอนินทรีย์และอินทรีย์ วิธีการกระตุ้นให้พลังงานแก่วัสดุก็มีได้หลายวิธีเช่น การส่องแสง การยิงลำอิเล็กตรอน การยิงลำไอออน การเพิ่มความกดดัน การเพิ่มความร้อน การทำให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี การป้อนสนามไฟฟ้า และการฉีดกระแสไฟฟ้า ฯลฯ เป็นต้น เรามีชื่อเรียกชนิดของลูมิเนสเซนซ์โดยแบ่งตามวิธีการกระตุ้นเหล่านี้ดังนี้

ชนิดของลูมิเนสเซนซ์	**วิธีการกระตุ้น**
(ก) โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photo-luminescence) (นิยมย่อว่า PL)	แสง
- ชนิดสโตกส์ (Stokes type)	
- ชนิดแอนติสโตกส์ (Anti-Stokes type)	
(ข) อิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (Electro-luminescence) (นิยมย่อว่า EL)	ไฟฟ้า
- อินทรินซิกอิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (Intrinsic EL)	
- ไดโอดเปล่งแสง (Carrier Injection EL (LED))	
(ค) แคโทดลูมิเนสเซนซ์ (Cathode-luminescence)	อิเล็กตรอน
(ง) เทอร์โมลูมิเนสเซนซ์ (Thermo-luminescence)	ความร้อน
(จ) ไทรโบลูมิเนสเซนซ์ (Tribo-luminscence)	การเสียดสี
(ฉ) เคมิคัลลูมิเนสเซนซ์ (Chemical-luminescence)	ปฏิกิริยาเคมี
(ช) เอกซ์เรย์ลูมิเนสเซนซ์ (X-ray-luminescence)	รังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นำได้เป็นอย่างดี ส่วนแบบ (ง) และ (จ) นั้น พบในวัสดุไดอิเล็คตริกที่มีช่องว่างพลังงานกว้างมาก ๆ และทำให้สามารถวิเคราะห์ระดับพลังงานของจุดบกพร่องที่เกิดในผลึกต่าง ๆ ได้ และ (ฉ) แบบสุดท้ายนั้นจะพบมากในวัสดุพวกอนินทรีย์

ตัวอย่างกรณีของหลอดไฟฟ้าฟลูออเรสเซนซ์ ทำงานโดยเริ่มจากปรอทที่บรรจุอยู่ภายในหลอดถูกสนามไฟฟ้ากระตุ้นให้เกิดการดิสชาร์จ (discharge) ทำให้เกิดรังสีอัลตราไวโอเลต จากนั้นรังสีอัลตราไวโอเลตจะไปกระตุ้นสารเรืองแสงที่เคลือบอยู่บริเวณผิวด้านในของหลอดทำให้เกิดแสงสว่างที่ตามนุษย์มองเห็น กรณีจอภาพโทรทัศน์ชนิด CRT (cathode ray tube) สว่างได้เพราะสารเรืองแสงชนิดฟอสเฟอร์ (phosphors) ถูกกระตุ้นด้วยลำอิเล็กตรอนที่ถูกยิงออกมาจากปืนอิเล็กตรอน (electron gun) กรณีไดโอดเปล่งแสง (LED) นั้นเปล่งแสงได้เพราะมีกระแสไฟฟ้าฉีดเข้าไป ปรากฏ-การณ์ลูมิเนสเซนซ์เหล่านี้มีความสำคัญมากต่อประสาทตาของมนุษย์ ทำให้ตามนุษย์มองเห็นสิ่งต่างๆ ได้ ทำให้มนุษย์สามารถรับรู้และอ่านข้อมูลจากหน่วยแสดงผล (display) ได้ด้วยตา และทำให้มนุษย์สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้อย่างมีความสุข

2.2 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence)

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) คือ ปรากฏการณ์การเปล่งแสงอันเนื่องจากการกระตุ้นพาหะด้วยวิธีการส่องแสง (excitation by light) แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ดังนี้

(1) Stoke type luminescence เกิดขึ้นจากพลังงานโฟตอนในการเปล่งแสงบางส่วนมีการสูญเสียไปเป็นพลังงานความร้อนทำให้มีค่าน้อยกว่าพลังงานโฟตอนในการกระตุ้นด้วยแสง

(2) Anti-Stoke type luminescence เกิดขึ้นได้เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟนอนจากโครงผลึก (ดูดกลืนโฟนอน) หรืออิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนจากแสงหลาย ๆ ขั้นตอนและเปล่งแสงเพียงครั้งเดียว ทำให้พลังงานในการเปล่งแสงมีค่ามากกว่าพลังงานโฟตอนในการกระตุ้นด้วยแสง

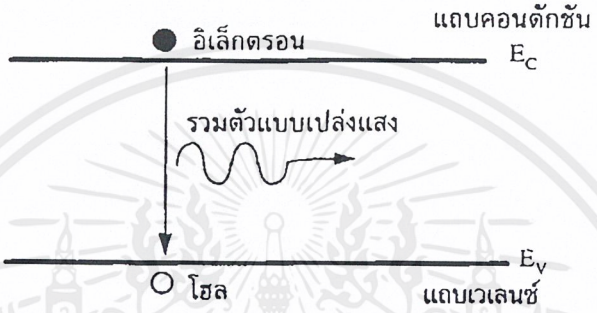
กลไกการเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนซ์

กลไกการเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนซ์ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากระดับพลังงานสูงลงมาสู่ระดับพลังงานต่ำ และสามารถแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

(I) การเปล่งแสงที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันรวมตัวโดยตรงกับโฮลในแถบเวเลนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

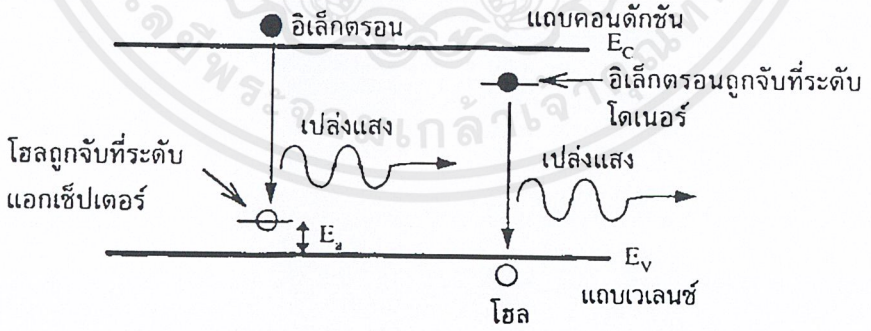
เป็นการเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (band-to-band transition) กล่าวคือ เป็นการรวมตัวกันโดยตรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบคอนดักชันตกลงมารวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ถ้าวัสดุสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct band gap) แสงที่เปล่งออกมาจะมีพลังงานโฟตอนเท่ากับขนาดของช่องว่างพลังงาน



รูปที่ 2.1 การเปลี่ยนสถานะแบบเปล่งแสงของพาหะอิสระระหว่างแถบคอนดักชันและแถบวาเลนซ์

(II) การเปล่งแสงที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันรวมตัวกับโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับแอกเซ็ปเตอร์หรืออิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับโดเนอร์รวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบเวเลนซ์

กล่าวคือ เกิดจากการทรานซิชันของอิเล็กตรอนอิสระกับระดับพลังงานของสารเจือ (free carrier-impurity level transition) ตัวอย่างแสดงในรูปที่ 2.2



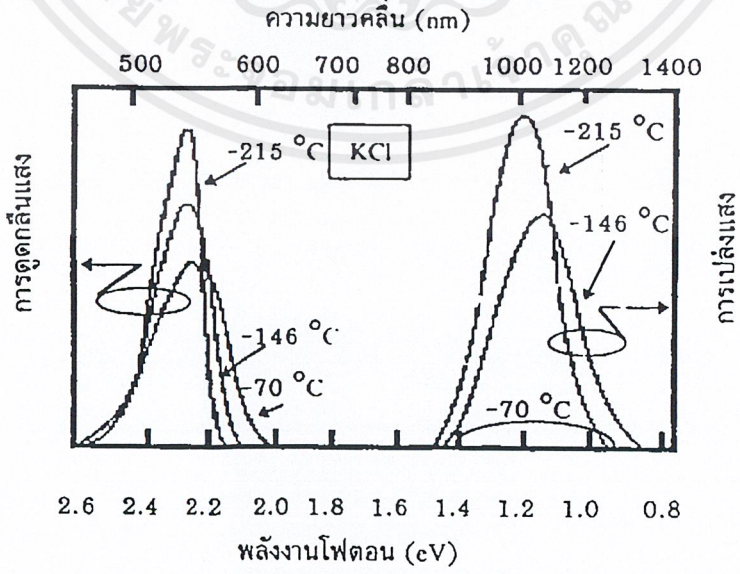
รูปที่ 2.2 การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนอิสระและโฮลถูกจับอยู่ที่ระดับแอกเซ็ปเตอร์ (กรณีซ้าย) และการเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับโดเนอร์และโฮลอิสระ (กรณีขวา)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(III) การเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนชนิดระหว่างระดับโลคอไลซ์

กล่าวคือ เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับโลคอไลซ์ (localized states-to-localized states) ตัวอย่างเช่น การเปล่งแสงจากศูนย์กลางชนิดเอฟ (F-centers) ในวัสดุชนิดอัลคาไลแฮไลด์ (alkali halide) ซึ่งผลึกของวัสดุชนิดนี้เมื่อถูกอบให้ร้อนภายในบรรยากาศของโลหะตระกูลอัลคาไล (เช่น Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) จะทำให้อะตอมของโลหะอัลคาไลแพร่ซึมเข้าไปในเนื้อผลึกอัลคาไลแฮไลด์และทำให้เนื้อผลึกนั้นมีจำนวนอะตอมแฮไลด์ (เช่น F, Cl, Br, I, At) ที่ไม่สมดุลกับอะตอมอัลคาไล นั่นคือ เปรียบเสมือนกับเกิดช่องว่างที่ขาดอะตอมแฮไลด์จากนั้นเพื่อให้สภาพทางไฟฟ้าเป็นกลาง อิเล็กตรอนจะวิ่งไปจับอยู่ที่ช่องว่างของแฮไลด์นั้นซึ่งเปรียบเหมือนว่าช่องว่างนั้นเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนถูกแรงคูลอมบ์ดึงดูดไว้คล้ายกับแบบจำลองของอะตอมของไฮโดรเจน และอิเล็กตรอนเหล่านั้นมีสถานะอยู่ที่ระดับพื้น (ground states) ต่อจากนั้นเมื่อมีแสงส่องเข้าสู่ผลึกชนิดนี้ แสงนั้นจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากสถานะพื้นให้ขึ้นไปสู่สถานะกระตุ้น (excited states) จึงเกิดการดูดกลืนแสงขึ้น และทำให้ผลึกนั้นมีสีตามความยาวคลื่นของแสงที่ถูกดูดกลืน เราเรียกการเกิดจุดบกพร่อง (defects) ของโครงผลึกเช่นนี้ว่าเป็นการเกิด**ศูนย์กลางสี** (color centers) หรือ **ศูนย์กลางเอฟ** (F-centers)

รูปที่ 2.3 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของผลึก KCl จากรูป พบว่าพลังงานโฟตอนของการเปล่งแสงจะมีค่าน้อยกว่าพลังงานโฟตอนของการดูดกลืนแสง เราเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สโตกส์ชิฟ (Stokes shift) พลังงานโฟตอนส่วนที่ขาดไปนั้นถูกเปลี่ยนไปเป็นพลังงานความร้อนให้กับโครงผลึก (lattice) ตามกฎของ Franck-Condon



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมการดูดกลืนแสงและการเปล่งแสงของศูนย์กลางชนิด F ใน KCl

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(IV) การเปล่งแสงจากเอกซิตอน (Exciton)

เอกซิตอน คือ คู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้น แต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นนั้นยังมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้พาหะทั้งคู่แยกออกจากกันเป็นอิสระได้ กล่าวคือ ยังมีแรงคูลอมป์ดึงดูดให้อิเล็กตรอนและโฮลจับอยู่กันเป็นคู่ ๆ และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและของโฮลยังอยู่ภายในช่องว่างพลังงานต้องห้าม เอกซิตอนมี 2 ชนิด ตามระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล ถ้าระยะห่างระหว่างอิเล็คตรอนมีค่าใกล้เคียง ค่าคงที่ผลึก (lattice constant) เราเรียกว่าเป็นแบบเฟรนเคล(Frenkel) ถ้าระยะห่างระหว่างอิเล็กตรอนและโฮลมีค่ามากกว่าค่าคงที่โครงผลึกหลายเท่าถึงหลายสิบเท่า เราเรียกว่าเป็นแบบแวนเนียร์ (Wannier)

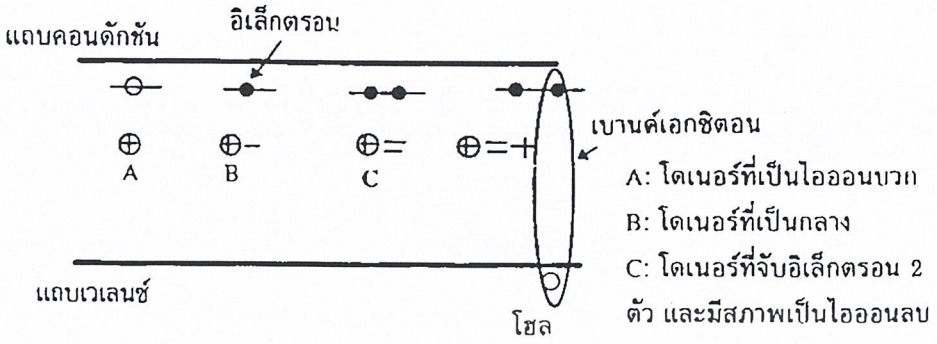
- เอกซิตอนชนิดอิสระ (Free exciton) การเปล่งแสงจากเอกซิตอนชนิดอิสระนี้มีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานต้องห้ามเล็กน้อย
- เอกซิตอนชนิดเบานด์ (Bound exciton) เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในเอกซิตอนชนิดนี้อยู่ใกล้กันมาก ดังนั้นพลังงานโฟตอนของแสงที่ถูกเปล่งพลังงานออกมาจากการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอนและโฮลจึงมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานต้องห้ามมาก

ต่อไปจะกล่าวถึงการเปล่งแสงจากเอกซิตอนในลักษณะต่างๆ

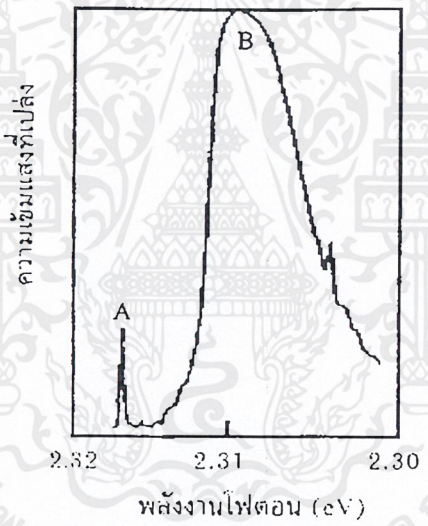
1) การเปล่งแสงจากเอกซิตอนที่ถูกจับด้วยโดเนอร์

ตัวอย่างเช่น การโดปสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP (ตระกูล III-V) ด้วยอะตอม S (ตระกูล VI) จะทำให้อะตอม S เข้าไปแทนที่อะตอม P และอะตอม S ปล่อยให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปในแถบคอนดักชัน อะตอม S จะเปลี่ยนสภาพกลายเป็นไอออนบวก ถ้ากำหนดให้สัญลักษณ์ “⊕” แทนไอออนบวกและสัญลักษณ์ “⊕-” แทนโดเนอร์ S ที่เป็นกลาง ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนอีกหนึ่งตัวมาจับโดเนอร์กลางนี้จะทำให้โดเนอร์กลางเปลี่ยนสภาพเป็นไอออนลบซึ่งสามารถแทนไอออนลบได้ด้วยสัญลักษณ์ “⊕ =” รูปที่ 2.4 แสดงลักษณะของการเกิดเอกซิตอนดังกล่าว ในสภาพเช่นนี้ ถ้าบังเอิญมีโฮลวิ่งเข้ามาใกล้ไอออนลบนี้ โฮลจะถูกแรงคูลอมบ์จากไอออนลบดึงดูดไว้และทำให้เกิดเป็นเบานด์เอกซิตอน ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ด้านริมขวา และ ถ้าคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้มีการรวมตัวกันก็จะเกิดการเปล่งแสงออกมา รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างสเปกตรัมการเปล่งแสงจากเบานด์ เอกซิตอนใน GaP:S

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.4 การแสดงเอกซิตอนซึ่งถูกจับที่ระดับโดเนอร์



รูปที่ 2.5 สเปกตรัมการเปล่งแสงของเบานด์เอกซิตอนของ GaP : S

2) การเปล่งแสงจากเอกซิตอนที่ถูกจับด้วยไอโซอิเล็กทรอนิกส์แทร็ป (Isoelectronic trap)

ตามปกติการโดปสารกึ่งตัวนำให้เป็นชนิด n หรือ p ทำได้โดยการเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์มากกว่าหรือน้อยกว่าสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้เกิดระดับโดเนอร์ หรือ แอกเซ็ปเตอร์ แต่ในกรณีที่เราเติมสารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับสารกึ่งตัวนำพอดี สารเจือปนนั้นจะมีพฤติกรรมที่แตกต่างไปจากโดเนอร์ หรือ แอกเซ็ปเตอร์ทั่ว ๆ ไป สารเจือปนที่มีวาเลนซ์เท่ากับสารกึ่งตัวนำจะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

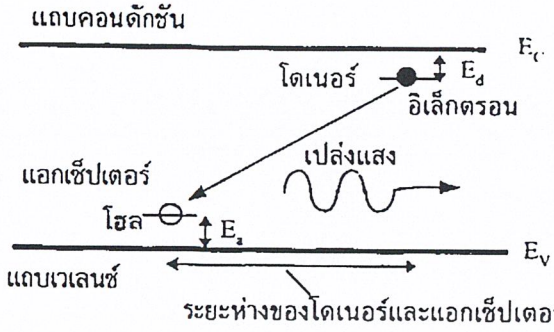
สร้างระดับพลังงานในช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ และเป็นตัวคอยกับดัก (trap) พาหะชั่วคราวได้ และมีชื่อเรียกว่า Isoelectronic trap มีความสำคัญมากในการประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสง

พิจารณาตัวอย่างการเติมอะตอมไนโตรเจน N (ตระกูล V) เข้าสู่ GaP ในกรณีนี้อะตอม N จะเข้าไปแทนที่อะตอม P แต่เนื่องจากทั้งอะตอม N และอะตอม P เป็นธาตุตระกูล V เหมือนกัน เพราะฉะนั้นสภาพไฟฟ้าจึงเป็นกลางเหมือนเดิม กล่าวคือ อะตอม N ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นโดเนอร์หรือแอกเซ็ปเตอร์แต่อย่างใด แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากอะตอม N มีคุณสมบัติในการดึงดูดอิเล็กตรอนได้ดีกว่าอะตอม P (เรียกว่า อะตอม N มีค่า electronegativity สูง) ดังนั้นถ้ามีอิเล็กตรอนในผลึกวิ่งวนมาใกล้อะตอม N ก็จะทำให้อะตอม N จับอิเล็กตรอนไว้ได้ดี ในสภาพเช่นนี้เรากล่าวว่า อะตอม N นั้นกำลังสร้างไอโซอิเล็กทรอนิกส์แทร็ป แทร็ปชนิดนี้มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ ดังนั้นจึงสามารถมีแรงดึงดูดโฮลซึ่งมีประจุบวกให้เข้ามาใกล้ได้ดี จึงส่งผลให้เกิดเป็นเอกซิตอนขึ้นมา และอิเล็กตรอนและโฮลในเอกซิตอนชนิดนี้สามารถรวมตัวกันได้ง่ายจึงทำให้ประสิทธิภาพของการเปล่งแสงสูงมาก ในกลไกการ trap อิเล็กตรอนของ N นั้นนอกจากอาศัยค่าที่สูงของ electronegativity แล้ว ยังอาจมีสาเหตุมาจากการเกิดจุดบกพร่องของผลึกรอบอะตอม N ก็ได้ ซึ่งสิ่งสำคัญที่สุดที่จะต้องเข้าใจ คือว่าพลังงานศักย์ (potential) ของอะตอม N ที่ trap อิเล็กตรอนไว้นั้นมีขอบเขตอาณาบริเวณเพียงระยะทางสั้น ๆ (short range) รอบ ๆ อะตอม N เท่านั้น (แตกต่างจากแรงคูลอมบ์ของโดเนอร์ซึ่งมีกระจายทั่วผลึก) ตัวอย่างในกรณีผลึกสารประกอบกึ่งตัวนำชนิด GaP ซึ่งตามปกติเดิมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพลังงานช่องว่างแบบไม่ตรง (indirect bamd gap) จึงมีประสิทธิภาพของการเปล่งแสงไม่ดีนัก แต่ถ้าเราเติมอะตอม N เข้าไปในผลึก GaP นี้จะสามารถสร้างไอโซอิเล็กทรอนิกส์แทร็ปขึ้นในผลึกได้และเกิดเอกซิตอนและทำให้การรวมตัวของพาหะมีประสิทธิภาพสูงขึ้นมาก เปรียบเสมือนว่าผลึก GaP กลายสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพลังงานช่องว่างแบบตรง (direct band gap) จึงมีการนำ GaP ไปประดิษฐ์เป็นไดโอดเปล่งแสงอย่างแพร่หลาย และสามารถเปล่งแสงสีแดงที่สว่างมาก ๆ ได้

(V) การเปล่งแสงจากคู่ของโดเนอร์และแอกเซ็ปเตอร์ (DA pair)

การเปล่งแสงที่เกิดจากการรวมตัวของอิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ที่ระดับโดเนอร์และโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับแอกเซ็ปเตอร์โดยทั่วไปมีประสิทธิภาพดีมาก รูปที่ 2.6 แสดงกลไกการรวมตัวของพาหะชนิดนี้ ตัวอย่าง ได้แก่ การโดป GaP ด้วย S (โดเนอร์) และ C (แอกเซ็ปเตอร์) พร้อม ๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 การเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างคู่โดเนอร์และแอกเซ็ปเตอร์

คุณสมบัติของการเปล่งแสงชนิดนี้มีลักษณะเด่นหลายข้อ ซึ่งพอสรุปได้ดังนี้

1) ความน่าจะเป็นของการรวมตัวของอิเล็กตรอนและโฮล W(r) ขึ้นกับระยะห่างของโดเนอร์และแอกเซ็ปเตอร์ (r) โดยที่ถ้า r มีค่าน้อย การเปล่งแสงก็จะดีดังนี้

$$W(r) = W_{max} e^{-r/Rd}$$

โดยที่ W_{max} : ค่าคงตัว

R_d : ค่าครึ่งหนึ่งของรัศมีโบร์ ของวงจรโคจรอิเล็กตรอนรอบโดเนอร์

2) พลังงานโฟตอนของการเปล่งแสง มีค่า

$$hv = E_g - (E_a + E_d) + (q^2/r\mathcal{E}_r)$$

โดยที่ E_g : ช่องว่างพลังงานของวัสดุให้อาศัย

E_a , E_g : ระดับพลังงานของแอกเซ็ปเตอร์และโดเนอร์ตามลำดับ

q : ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

$\mathcal{E}_r$: ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของวัสดุให้อาศัย

3) ถ้าเพิ่มความเข้มของแสงที่ใช้กระตุ้น จะทำให้สเปกตรัมของการเปล่งแสง เคลื่อนตัวไปทางพลังงานโฟตอนมากขึ้น

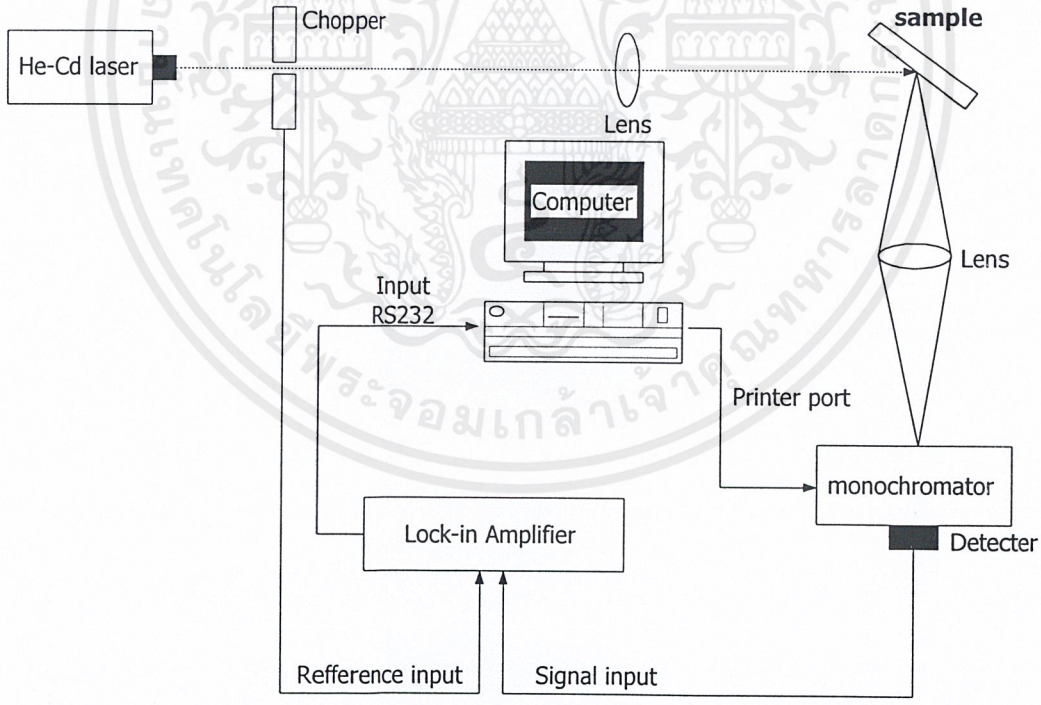
4) หลังจากตัดแสงที่ใช้กระตุ้นออก และเมื่อเวลาผ่านพ้นไป สเปกตรัมของการเปล่งแสงจะเคลื่อนตัวไปทางพลังงานโฟตอนที่มีค่าน้อยลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3
ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.1 ระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

องค์ประกอบของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ประกอบไปด้วย แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ตัวตัดแสง, ตัวตรวจจับสัญญาณ, เลนส์, แท่งยึดสาร, เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน สเตปปิงมอเตอร์ และไมโครคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆดังนี้



รูปที่ 3.1 ไดอะแกรมของระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.1.แหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ (Laser source)

ทำหน้าที่กระตุ้นให้เกิดกระบวนการเจนเนอเรท และกระบวนการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยในระบบวัดมีการทดลองโดยใช้ He-Cd Laser ความยาวคลื่น 442 นาโนเมตร กำลัง 50 มิลลิวัตต์ และ He-Ne Laser ความยาวคลื่น 632.8 นาโนเมตร กำลัง 15 มิลลิวัตต์

รูปที่ 3.2 He-Ne Laser และ He-Cd Laser

3.1.2.โมโนโครเมเตอร์ (monochromator)

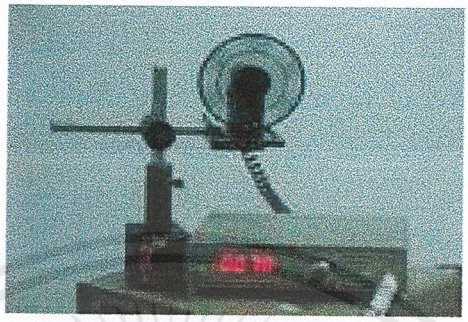
ทำหน้าที่แยกแสงที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยไดอะแกรมของโมโนโครเมเตอร์แสดงในรูปที่ 3.2 หลักการคือเมื่อแสงเข้ามาทางสลิท(slit) จะสะท้อนไปยังเกรตติง(grating)เกรตติงจะให้แสงที่ความยาวคลื่นต่างๆตามการกระทบบนเกรตติงและแสงจากเกรตติงจะสะท้อนกลับไปยังคอลลิเมติงสะท้อนกระจกออกไปยังสลิทต่อไป

รูปที่ 3.3 ไดอะแกรม และรูปของโมโนโครมิเตอร์

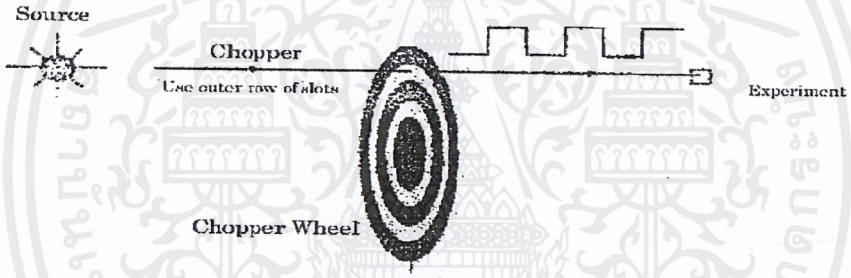
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.3.ตัวตัดแสง(Chopper)

ทำหน้าที่ตัดแสงของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงเลเซอร์ในลักษณะของสัญญาณพัลซ์โดยสัญญาณที่ผ่านตัวตัดแสงเป็นสัญญาณ a.c. ดังแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงรูปของ chopper ที่ใช้ตัดแสง



รูปที่ 3.5 สัญญาณเมื่อผ่านตัวตัดแสง

3.1.4.ตัวตรวจจับสัญญาณ(Detector)

ทำหน้าที่เปลี่ยนความเข้มแสงให้อยู่ในรูปของกระแสและแรงดัน โดยที่ Si-detector ให้สัญญาณในรูปของแรงดันโดยในระบบวัดมีการใช้ตัวตรวจจับสัญญาณดังต่อไปนี้

Si-detector ที่ความยาวคลื่น 350-1100 นาโนเมตร

3.1.5.เลนส์

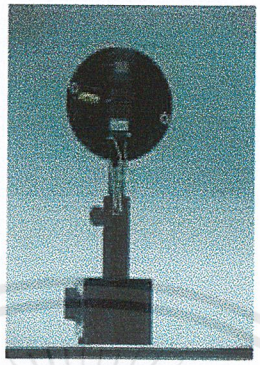
ทำหน้าที่ให้ความเข้มแสงที่จุดความยาวโฟกัสของเลนส์ โดยความยาวโฟกัสพิจารณาจากระยะทางและความเหมาะสมของระบบวัดโดยในระบบวัดมีการใช้เลนส์ต่างๆดังต่อไปนี้

- ความยาวโฟกัส 100มิลลิเมตร
- ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1.6.แท่นยึดสาร

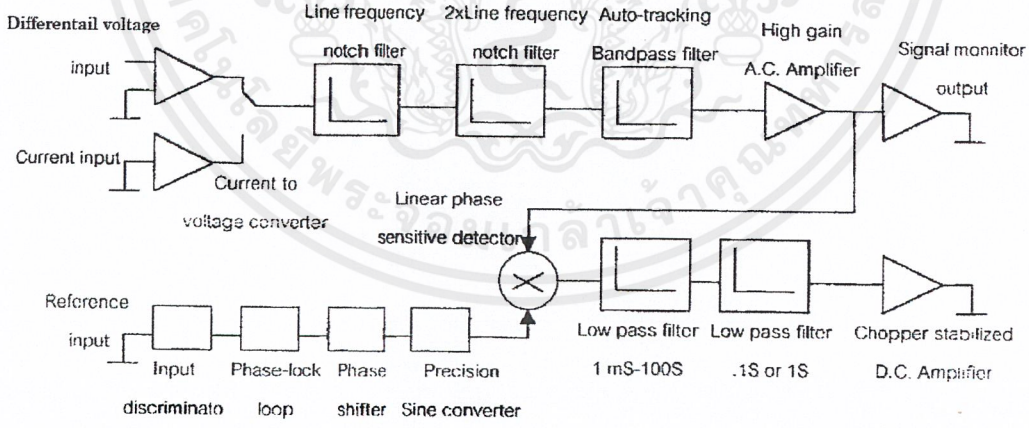
ทำหน้าที่ยึดสารกึ่งตัวนำและปรับมุมของการสะท้อนไปยังตัวตรวจจับสัญญาณ



รูปที่ 3.6 แสดงแท่นยึดสารกึ่งตัวนำ

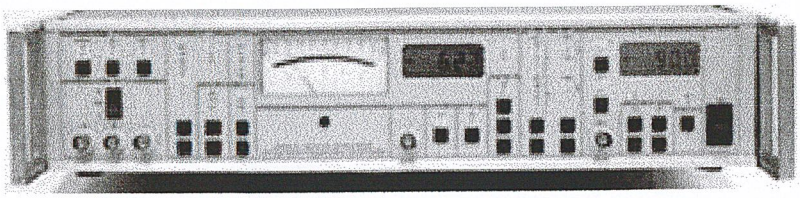
3.1.7.เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอิน(Lock in Amplifier)

ทำหน้าที่ขยายสัญญาณโดยสัญญาณที่ป้อนเข้า(signal input) จะถูกเปรียบเทียบกับสัญญาณอ้างอิง(reference input) ในรูปของสัญญาณ$\cos\phi$ ซึ่งไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อคอินดังแสดงในรูปที่ 3.6 และภาพของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อกอินตามรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ไดอะแกรมของเครื่องขยายสัญญาณแบบล็อคอินรุ่น SR510

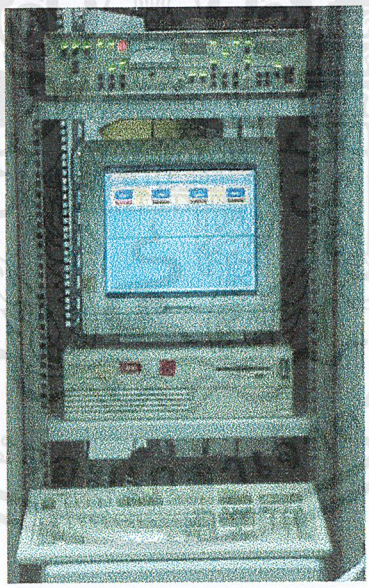
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่องขยายสัญญาณแบบล็อคอินในระบบวัด

3.1.8.ไมโครคอมพิวเตอร์(Microcomputer)

ทำหน้าที่ควบคุมสเตปปิงมอเตอร์ (Stepping motor) โดยควบคุมการหมุนเกรตติงภายในโมโนโครเมเตอร์ทำหน้าให้แสงความยาวคลื่นต่างๆ และรับข้อมูลจากเครื่องขยายสัญญาณแบบ
ล็อกอินโดยผ่านทาง RS-232 เพื่อทำการเก็บข้อมูลในรูปของค่าความเข้มแสงซึ่งชุดไมโครคอมพิวเตอร์ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.9 ไมโครคอมพิวเตอร์ที่ใช้ควบคุมการทำงานของระบบวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 ขั้นตอนการวัดการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำโดยระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรสโคปี

1. จัดอุปกรณ์ต่างๆที่ใช้วัดโฟโตลูมิเนสส์เซนซ์ตาม diagram ในรูปที่ 3.1

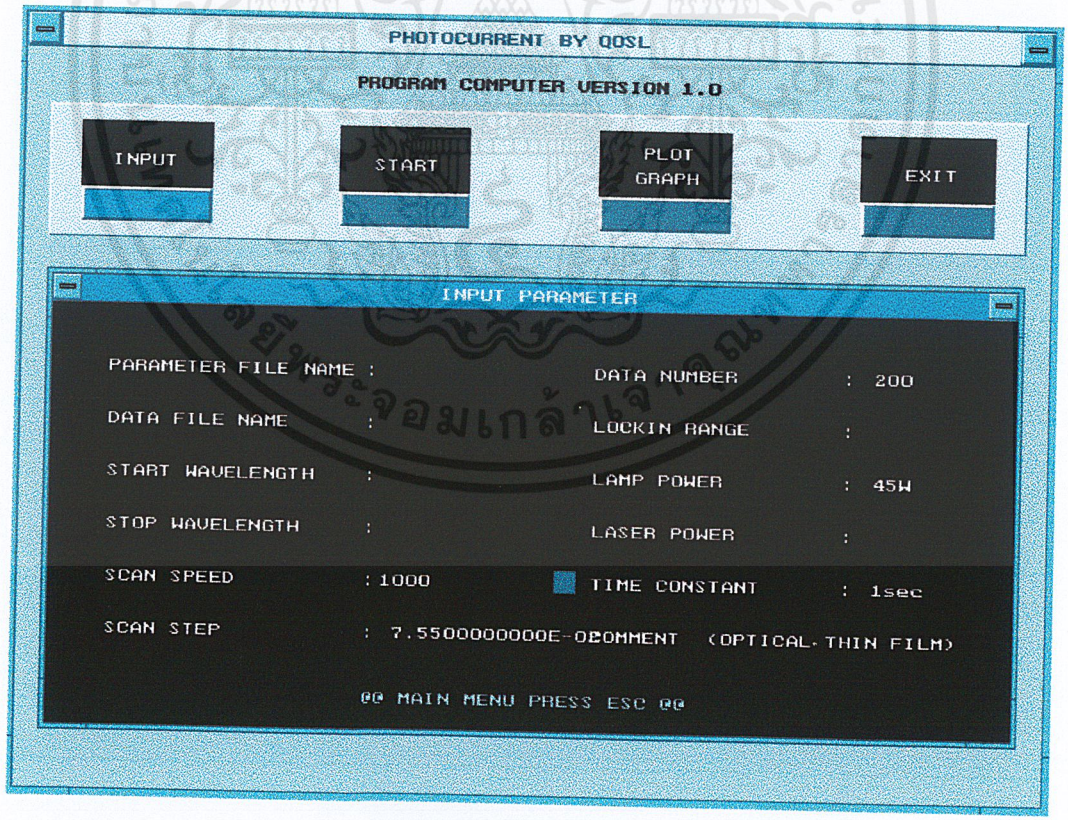
2. เปิด Power Laserให้ลำแสง Laser มีทิศการเดินทางของแสงเป็นไปตามdiagram ในรูปที่ 3.1 และ ทำการset monochromater, detector, lock-in และ คอมพิวเตอร์ให้อยู่ในสภาวะactive

3. นำสารกึ่งตัวนำที่ต้องการวัดการเปล่งแสงไปวางไว้ที่แท่นยึดสาร

4. เรียก program ในการวัดสารกึ่งตัวนำขึ้นมา แล้วทำการใส่ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ให้สอดคล้องกับระบบที่วัด

5. ทำการ run program ซึ่งจะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มของแสงกับค่าความยาวคลื่นในช่วงที่ต้องการ

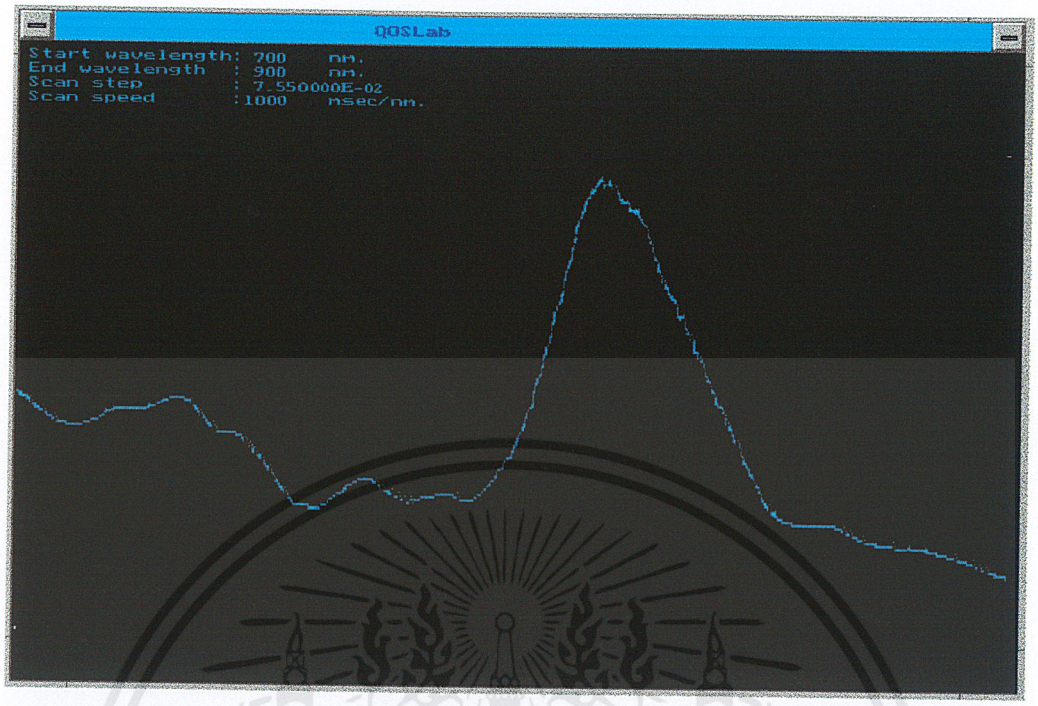
6. นำผลของกราฟที่ได้มาวิเคราะห์ศึกษาผลของการเปล่งแสงของสาร



รูปที่ 3.10 แสดงหน้าจอของโปรแกรมเพื่อใส่ค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



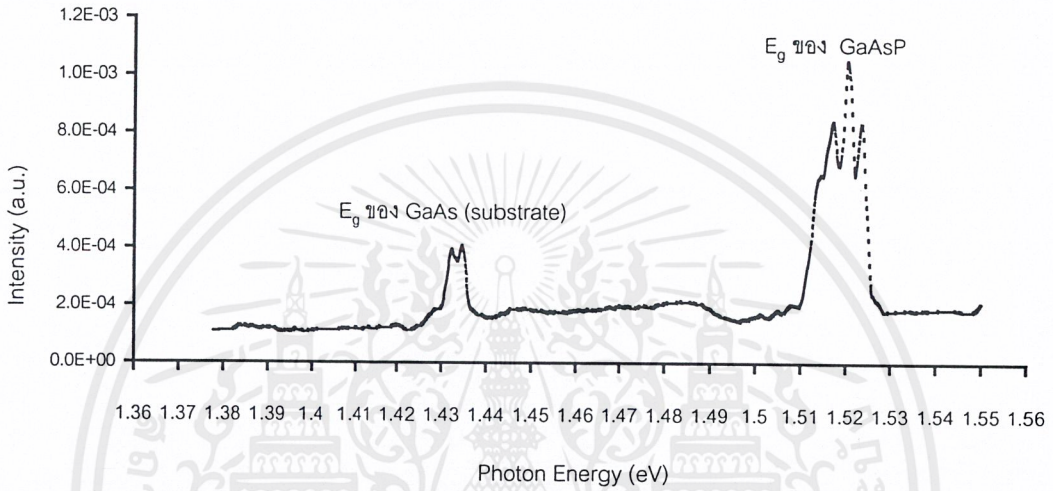
รูปที่ 3.11 แสดงหน้าจอของโปรแกรมในการบันทึกรูปกราฟ

รูปที่ 3.12 หน้าจอของโปรแกรมที่แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานโฟตอนกับความเข้ม แสง

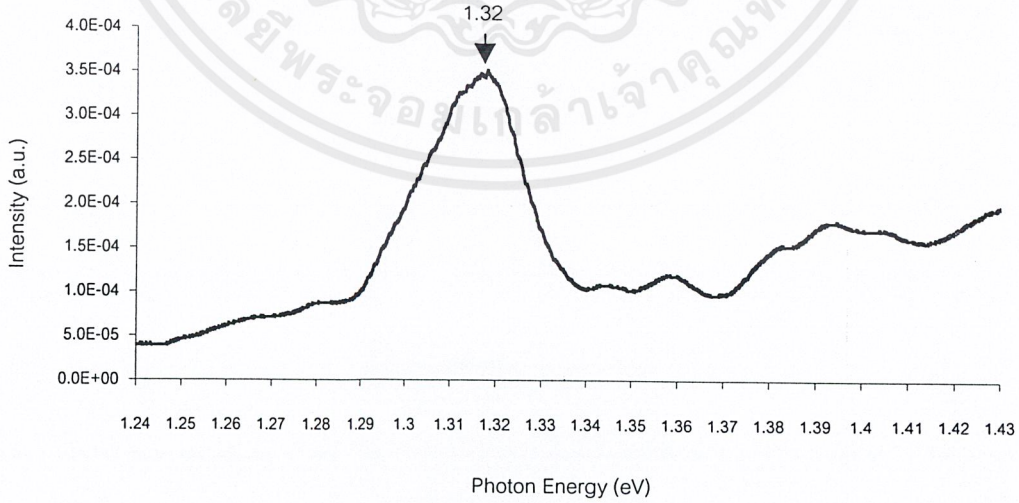
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
43941

บทที่ 4

ผลการทดลอง

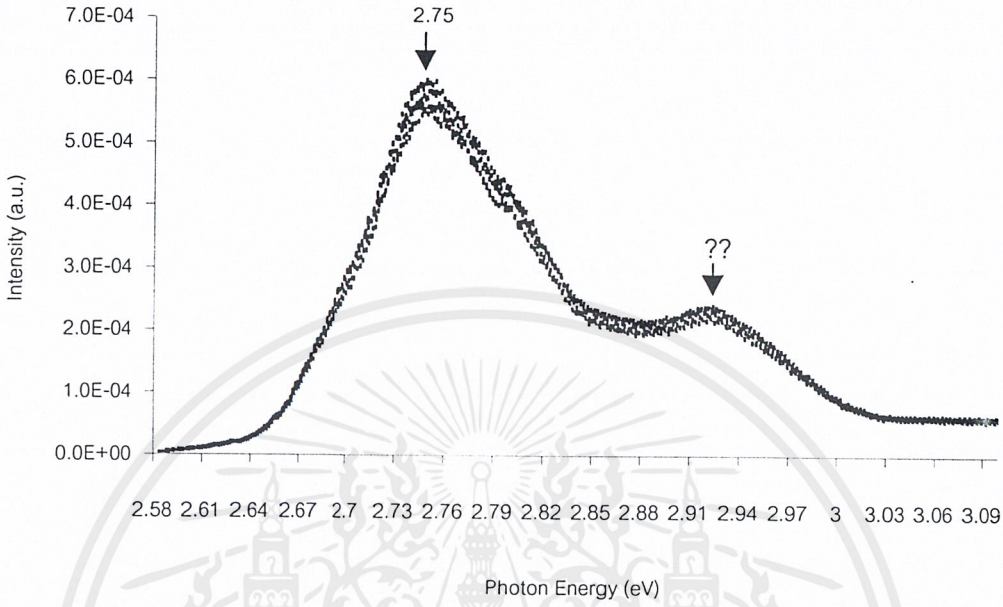


รูปที่ 4.1 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ GaAsP /GaAs พบว่าค่าการเปล่งแสงสูงสุดเป็นค่าของ GaAsP และค่าการเปล่งแสงสูงสุดที่รองลงมาเป็นค่าของ GaAs ที่ใช้ทำฐานรอง

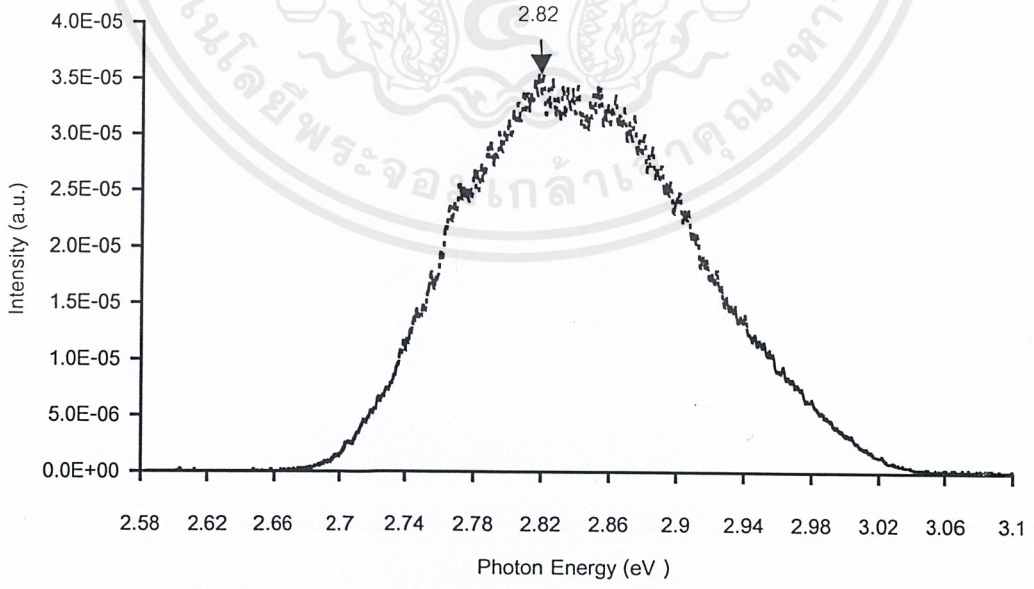


รูปที่ 4.2 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ InP พบว่าการเปล่งแสงมีค่าสูงสุดที่ 1.32 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

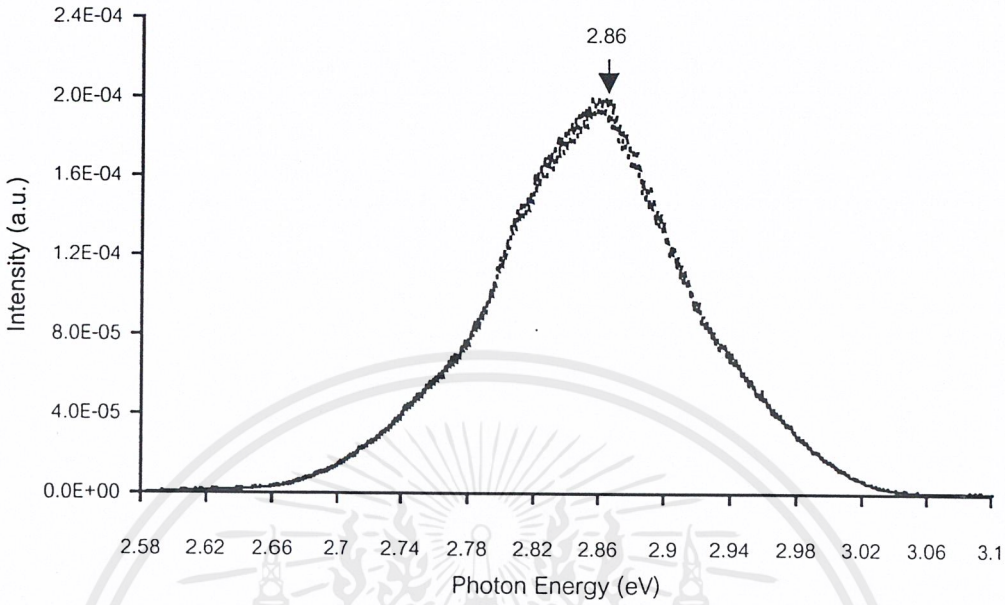


รูปที่ 4.3 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ ZnSe ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 100^0 C พบว่าการเปล่งแสงของสารมีค่าสูงสุดที่ 2.75 eV ซึ่งอยู่ในช่วงแถบพลังงานต้องห้าม และค่าสูงสุดที่รองลงมามีค่า 2.92 eV ไม่อยู่ในช่วงของแถบพลังงานต้องห้าม



รูปที่ 4.4 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ ZnSe ที่ความหนา500 nm ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 25^0 C พบว่าการเปล่งแสงจะมีค่าสูงสุดที่ 2.82 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.5 แสดงสเปกตรัมของการวัดค่า Photoluminescence ของ ZnSe ที่ความหนา 1 μ m ที่อุณหภูมิฐานรองรับ 25^{0}C พบว่าการเปล่งแสงจะมีค่าสูงสุดที่ 2.86 eV

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5
วิเคราะห์ผลการทดลอง

5.1 การวิเคราะห์ผลการเปล่งแสงของสารกึ่งตัวนำ

จากการทดลองเมื่อนำฟิล์มบางต่าง ๆ มาทดลองการวัดในระบบ โฟโตลูมิเนสเซนซ์ สเปกโตรสโคปี ดังนี้

- GaAsP/GaAs
- ZnSe
- InP

โดยในการวัดได้หาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มแสงที่ได้จากการเปล่งแสงของสารกับค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ จากนั้นนำมาแทนค่าในสมการ เพื่อหาค่าพลังงาน จากสูตร

$$E = 1240/\lambda$$

จากผลการทดลองในระบบวัด โฟโตลูมิเนสเซนซ์ สเปกโตรสโคปี และข้อมูลจากค่าแถบพลังงานของสาร สามารถสรุปได้ดังนี้

1. ที่อุณหภูมิห้อง สารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด มีการเปล่งแสงที่แตกต่างกันไปตามสมบัติเฉพาะของสารกึ่งตัวนำนั้น ๆ

2. ค่าพลังงาน ณ ตำแหน่งที่มีค่าความเข้มสูงสุดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาวัด มีความสอดคล้องกับค่า Energy gap ของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด

ดังนั้น อาจเป็นไปได้ว่าค่าสูงสุดของกราฟที่ปรากฏนั้น เกิดขึ้นจาก จุดบกพร่องของผลึก หรือ เป็นฟิล์มบางที่มีการเจือ ไม่บริสุทธิ์ จึงปรากฏค่าแถบพลังงานผู้ให้ แถบพลังงานผู้รับ หรือ ศูนย์กลางการดักจับ จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าระบบวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ สเปกโตรสโคปี สามารถศึกษาสมบัติการเปล่งแสงของสารที่ค่าความยาวคลื่น และ ค่าพลังงานต่าง ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 การแก้ไขปัญหาในการทดลอง

1. ไม่สามารถวัดแผ่นฟิล์มบางที่มีการสะท้อนแสงน้อย ดังนั้นควรนำเลนส์รวมแสงวางไว้หน้า monochromator

2. มีสัญญาณรบกวนขณะทำการวัดซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการสั่นของระบบ ทำให้กราฟที่ได้มีลักษณะไม่ชัดเจน แก้ไขโดยการจัดระบบในที่ที่ไม่มีการรบกวน

3. เนื่องจากไม่สามารถมองเห็นสัญญาณที่ผ่านเข้ามายัง monochromator ทำให้ไม่อาจทราบว่ามีสัญญาณส่งผ่านมาหรือไม่ ดังนั้นจึงควรดูตำแหน่งของตัวตรวจจับที่ทำให้สเปกตรัมของแสงมีค่าสูงสุด และทำการจัดให้อยู่ ณ ตำแหน่งนั้นตลอดการทดลอง

5.3 ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบวัด

ในการวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ คือ ไม่สามารถทำการทดลองได้ที่อุณหภูมิต่ำ เนื่องจากต้องทำการวัดในระบบสุญญากาศสูง ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่สำคัญในการสร้างระบบให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น

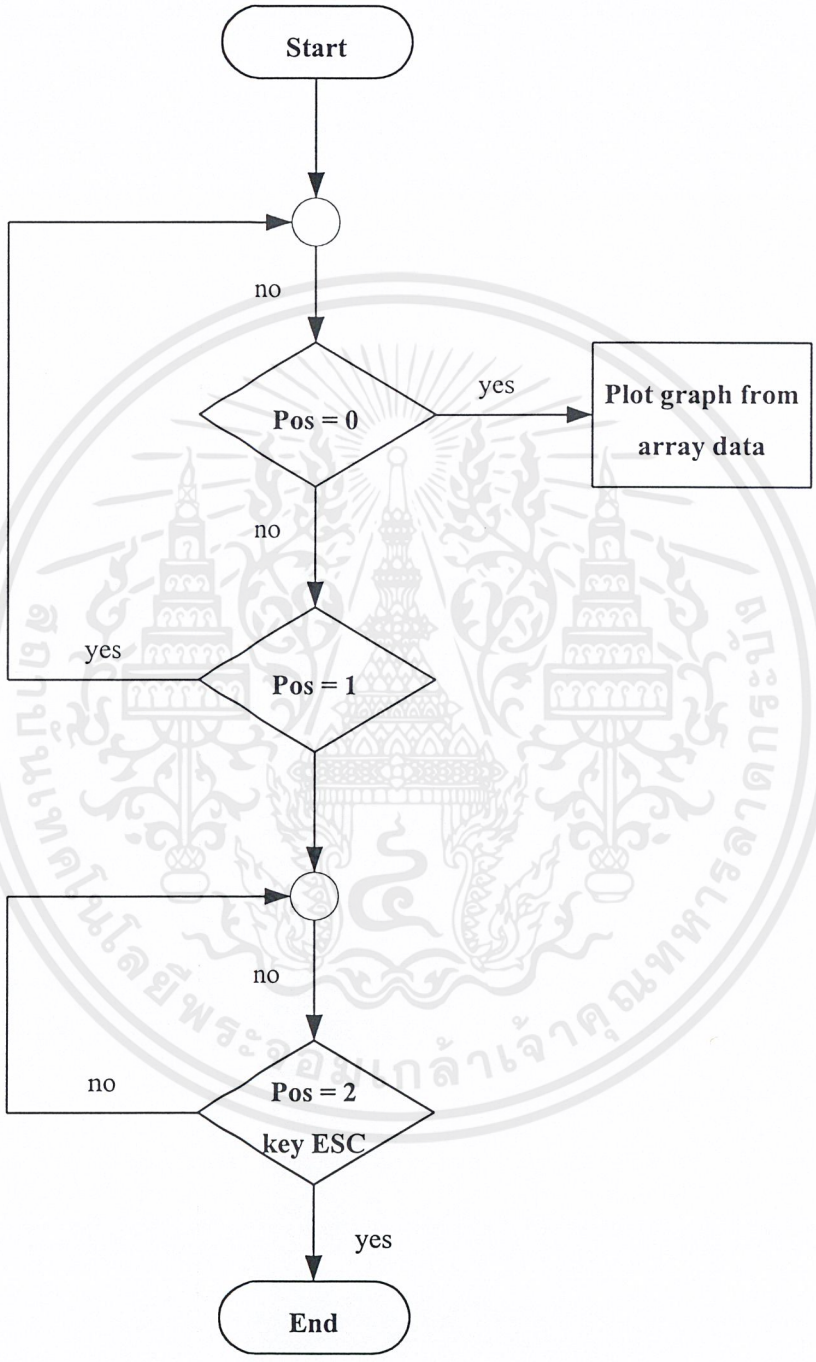
ในการวิจัยนี้ยังมีข้อบกพร่องที่ทำให้ผลการทดลองออกมาผิดพลาด เนื่องจากต้องมีการจัดอุปกรณ์ใหม่ทุกครั้งที่ทำการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

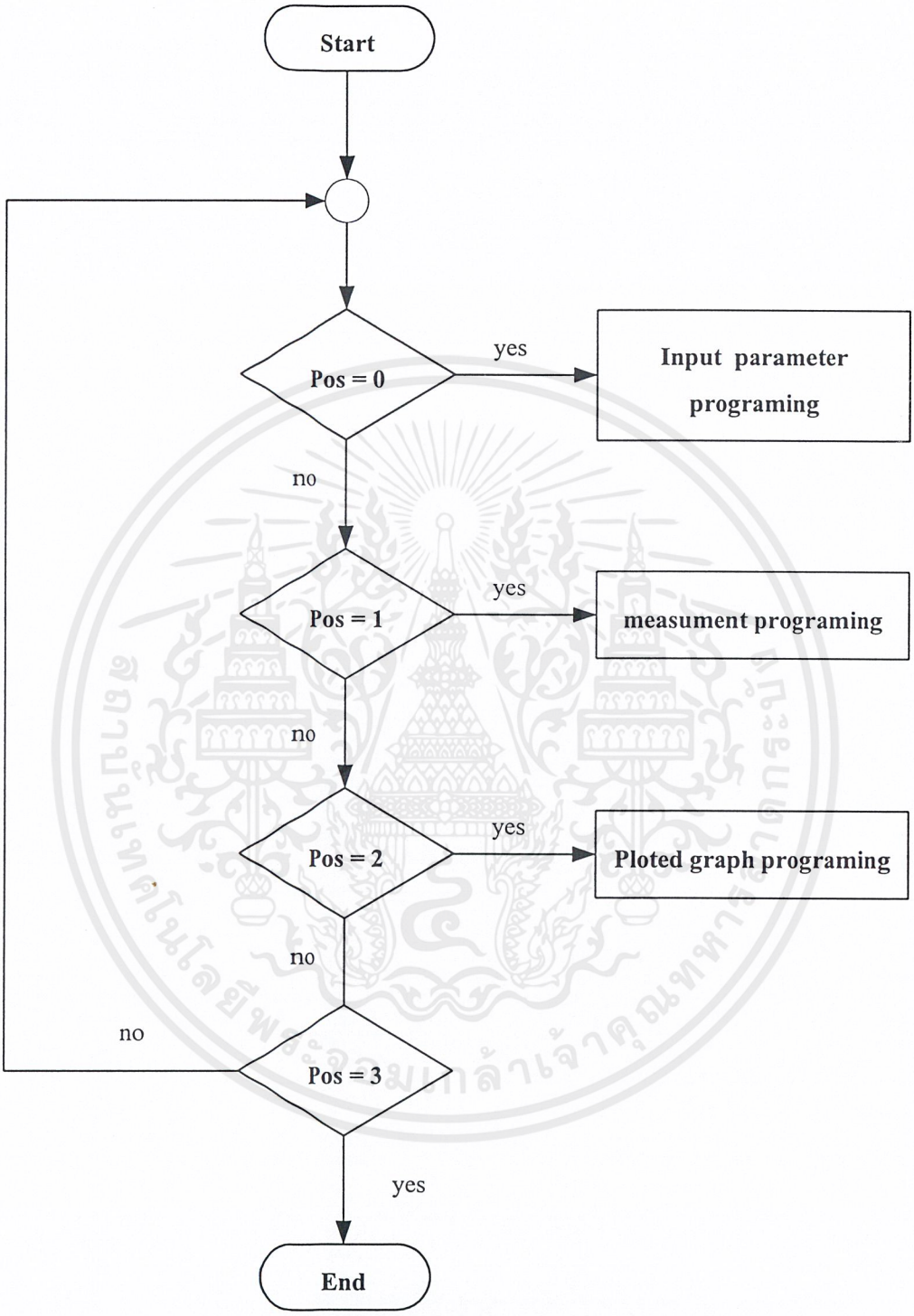
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผังการทำงานของโปรแกรมผลของการวัดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ที่แสดงบน monitor



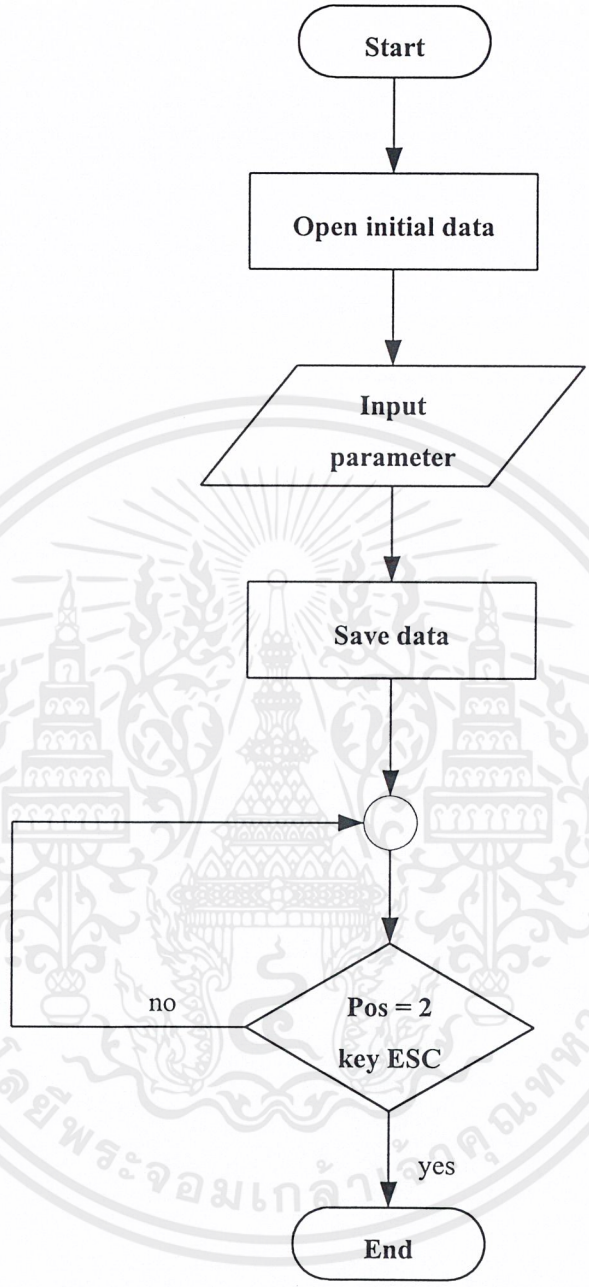
ผังการทำงานของโปรแกรมการพลอตกราฟ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



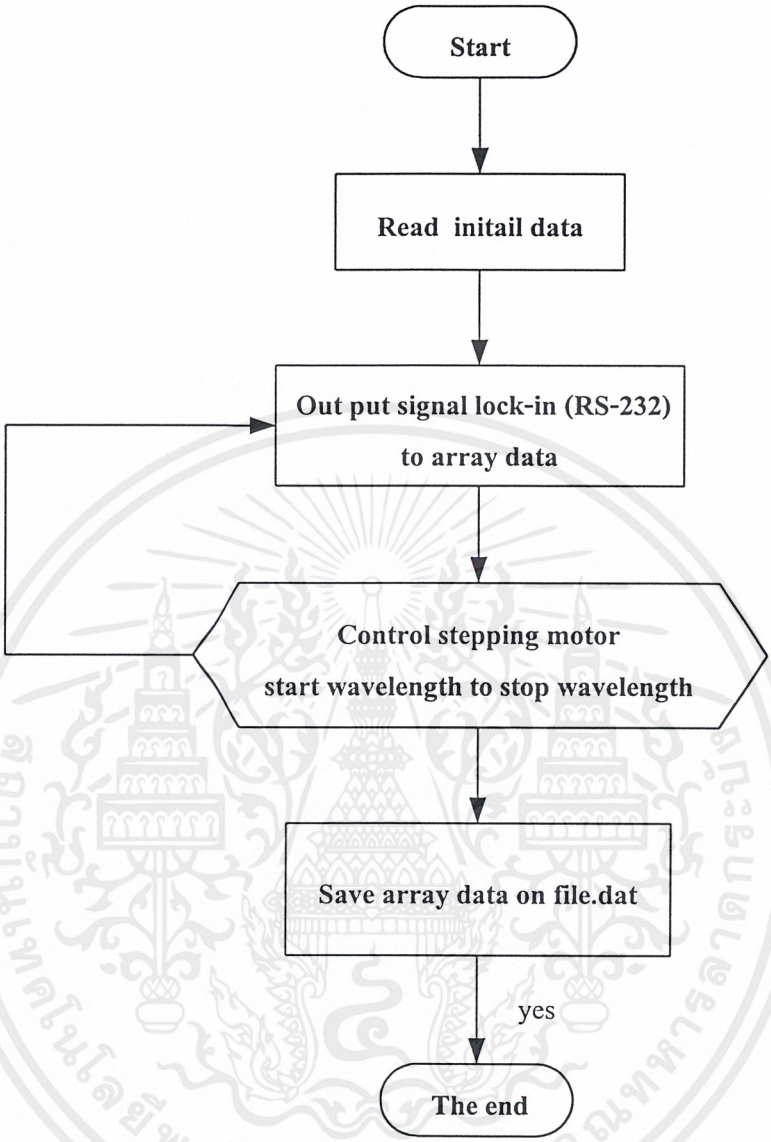
ผังการทำงานของโปรแกรมหลัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผังการทำงานโปรแกรมป้อนค่าพารามิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ผังการทำงานของโปรแกรมการวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวอย่างสารกึ่งตัวนำที่ใช้วัดในระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโตรสโคปี

ZnSe **InP** **GaAsP**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Class	Material	Lattice Constant [Å]	Bandgap [eV]	Absorption edge [μm]	Crystal structure[1]	Comments
IV	Diamond	3.56683	5.47	0.226508	D	
IV	Si	5.43095	1.12	1.10625	D	
IV	Ge	5.64613	0.66	1.877273	D	
IV	Sn	6.4892	0.082	15.10976	D	
IV-IV	6H-SiC	3.086	2.996	0.41355	W	c = 15.117
III-V	GaAs	5.6533	1.424	0.870084	Z	
III-V	AlAs	5.6605	2.17	0.571494	Z	
III-V	InAs	6.0584	0.36	3.441667	Z	
III-V	InP	5.8686	1.35	0.917778	Z	
III-V	GaP	5.4512	2.26	0.54823	Z	
III-V	AlSb	6.1355	1.58	0.784177	Z	
III-V	GaSb	6.0959	0.72	1.720833	Z	
III-V	AlP	5.451	2.5	0.4956	Z	
III-V	InSb	6.4794	0.2	6.195	Z	
III-V	GaN	3.189	3.36	0.36875	W	c = 5.185
II-VI	ZnS	5.42	3.68	0.336685	Z	
II-VI	CdS	5.832	2.42	0.511983	Z	
II-VI	ZnSe	5.65	2.7	0.458889	Z	
II-VI	CdSe	6.05	1.7	0.728824	Z	
II-VI	CdTe	6.48	1.55	0.799355	Z	
ternary	$In_{.53}Ga_{.47}As$	5.8686	0.74	1.671253	Z	Lattice matched to InP
ternary	$Al_{.48}In_{.52}As$	5.8686	1.46	0.8486	Z	Lattice matched to InP
ternary	$In_{.5}Ga_{.5}P$	5.6533	1.80	0.688	Z	Lattice matched to GaAs
ternary	$In_{.5}Al_{.5}P$	5.6533	2.35	0.527234	Z	Lattice matched to GaAs

Table 1. Lattice constants, bandgap energy and absorption edge of different semiconductors and alloys.

[1] D = Diamond lattice, Z = Zincblende lattice, W = Wurtzite lattice

 © Bart J. Van Zeghbroeck 1996

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

1. ดุสิต เครืองาม, **โซลิตสเตทฟิสิกส์**, ครั้งที่ 1, หน้า 419-426, บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด, กรุงเทพมหานคร, 2535
2. ดุสิต เครืองาม, **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งาน เล่ม 1**, ครั้งที่ 1, หน้า 82-88, สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพมหานคร, 2542
3. D.R. Vij, **Luminescence of Solid**, pp. 95-133, Plenum Press, New York, 1998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้