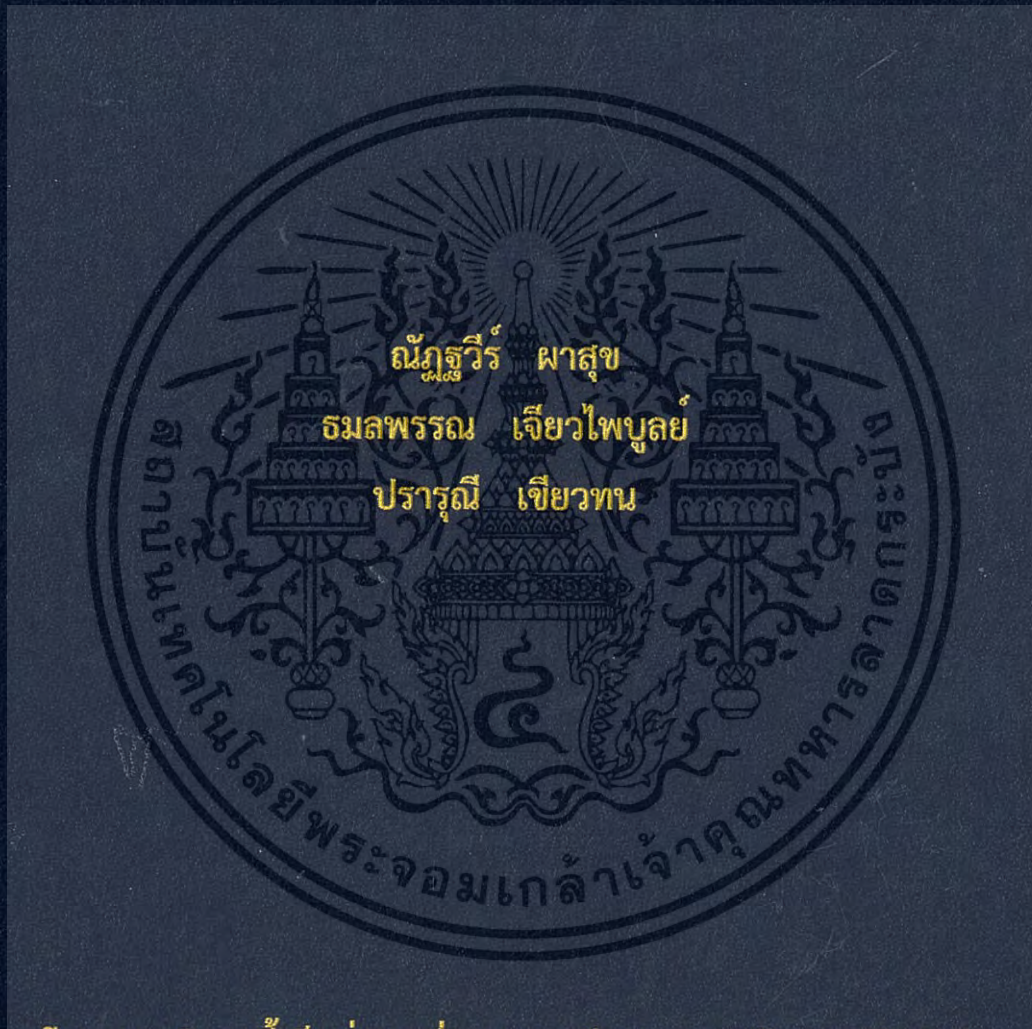


การศึกษาระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์
A STUDY OF PHOTOLUMINESCENCE SPECTROSCOPY



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2558

การศึกษาระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์
A STUDY OF PHOTOLUMINESCENCE SPECTROSCOPY

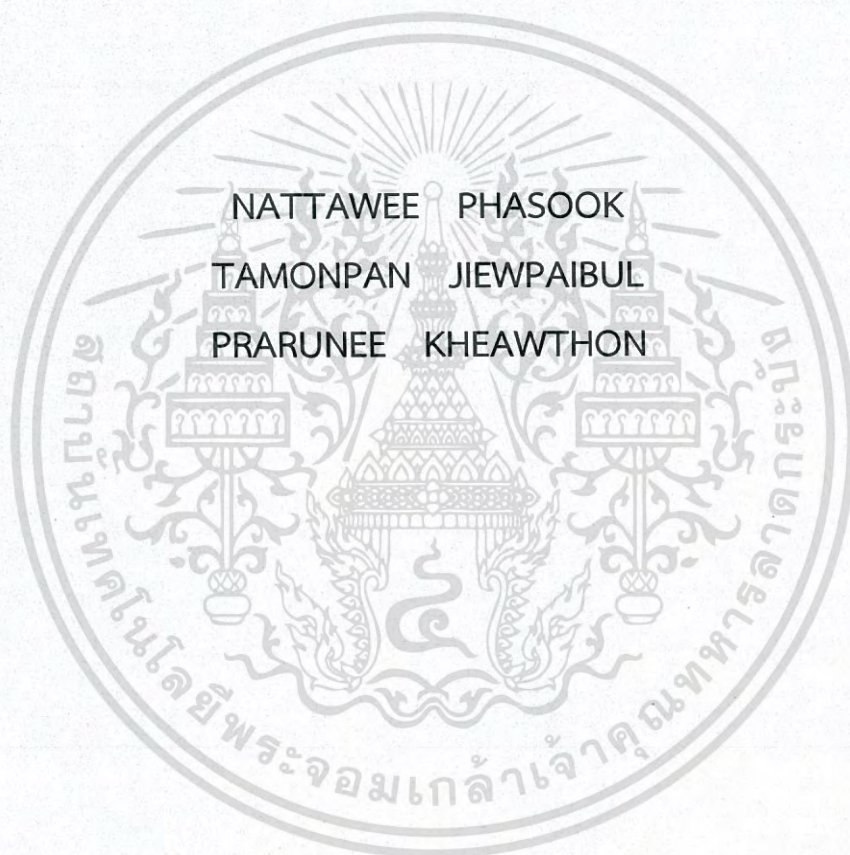


b.00265801

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ปีการศึกษา 2558 ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

A STUDY OF PHOTOLUMINESCENCE SPECTROSCOPY



A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF
THE REQUIREMENT FOR
THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)
DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2015

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนส์โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์
 A Study of Photoluminescence Spectroscopy

ชื่อนักศึกษา นายณัฐวีร์ ฝาสุข รหัสนักศึกษา 55051490
 นางสาวมณฑลพรรณ เจียวไพบูลย์ รหัสนักศึกษา 55051511
 นางสาวปรารุณี เขียวทน รหัสนักศึกษา 55051545

ปริญญา วิทยาศาสตร์บัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ภาควิชา ฟิสิกส์
 ปีการศึกษา 2558
 อาจารย์ที่ปรึกษา อ.สุรชาติ กมลติลก

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้
 โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
 ประจำปีการศึกษา 2558

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ประธานกรรมการ	
ผศ.ดร.ประธาน บุรณศิริ กรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
อ.สุรชาติ กมลติลก กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิของคณะวิทยาศาสตร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ภายใต้อาณัติของคณะ
 วิศวกรรมศาสตร์ ห้ามมิให้คัดลอกหรือเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบันฯ
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	การศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนส์โดยใช้ระบบคอมพิวเตอร์
ชื่อนักศึกษา	นายณัฐวีร์ ผาสุข รหัสนักศึกษา 55051490
	นางสาวธมลพรรณ เจียวไพบูลย์ รหัสนักศึกษา 55051511
	นางสาวปรารุณี เขียวทน รหัสนักศึกษา 55051545
ปริญญา	วิทยาศาสตร์บัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
คณะ	วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา	2558
อาจารย์ที่ปรึกษา	อ.สุรชาติ กมลติลก

บทคัดย่อ

ชุดศึกษาระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescence Spectroscopy) เป็นระบบที่ใช้ศึกษาการตรวจวัดสเปกตรัมการวาวแสงของสารตัวอย่างในย่านแสงที่ตามองเห็น (Visible light) โดยการกระตุ้นสารตัวอย่างด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่นต่างๆ แสงที่เปล่งออกมาจากสารตัวอย่าง จะรวมให้เป็นแสงขนานด้วยคอลลิเมเตอร์ จากนั้นจะถูกแยกเป็นสเปกตรัมด้วยเกรตติงและถูกตรวจวัดด้วยเซนเซอร์ (Linear Array Sensor) ผ่านระบบไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน (Arduino Microcontroller) แสดงผลเป็นกราฟสเปกตรัมแบบเรียลไทม์ (Real Time) บนหน้าจอแสดงผล (User Interface) วิเคราะห์ผลในโปรแกรม Excel ชุดศึกษานี้มีย่านการวัดจาก 393 ถึง 682 นาโนเมตร (nm) และมีความสามารถในการวัดความยาวคลื่นที่น้อยที่สุด 1.15 นาโนเมตร

คำสำคัญ : คอลลิเมเตอร์ โฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี ไมโครคอนโทรลเลอร์ ลิเนียร์อาร์เรย์เซนเซอร์ สเปกตรัมการวาวแสง

Title	A Study of Photoluminescence Spectroscopy	
Students	Mr.Nattawee Phasook	Student ID 55051490
	Miss Tamonpun Jiewpaibul	Student ID 55051511
	Miss Prarunee Kheawthon	Student ID 55051545
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)	
Department	Physics	
Faculty	Science	
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)	
Academic Year	2015	
Advisor	Lecturer Surachart Kamoldirok	

Abstract

A study of photoluminescence spectroscopy system. This system were made for measure a luminescence of sample in visible light region and use LASER to excitation. The light that emission will be parallel light by collimator. So the light will turn to spectrum by grating. Spectrum band of sample is recorded by Linear array sensor. Sensor was performed on Arduino Microcontroller. Real time monitoring on User Interface and calculate by Excel Program. A study of photoluminescence spectroscopy system has 393 to 682 nm of wavelength range with wavelength resolution 1.15 nm

Keywords : Collimator, Photoluminescence Spectroscopy, Microcontroller, Linear array sensor, Emission Spectrum

กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจาก อ.สุรชาติ กมลติลก อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการพิเศษที่ได้ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำและตรวจแก้ไขในการดำเนินการจัดโครงการพิเศษ ผู้วิจัยมีความซาบซึ้งและเป็นพระคุณเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ ขอขอบพระคุณอาจารย์ในสาขาฟิสิกส์ทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และให้ความคิดเห็นเป็นอย่างดีเสมอมา ทำให้ได้ข้อมูลครบถ้วนในงานวิจัยครั้งนี้

คุณงามความดีอันพึงมีจากโครงการพิเศษฉบับนี้ ผู้วิจัยขอมอบแต่บิดา มารดา อันเป็นที่เคารพยิ่ง และคณาจารย์ผู้ประสทาวิชาความรู้ตลอดจนทุกๆ ท่านที่ให้อำนาจใจช่วยเหลือจนกระทั่งโครงการพิเศษฉบับนี้จบลงด้วยดี



ณัฐวีร์ ผาสุข
 ชลพรรณ เจียวไพบุลย์
 ปรรุณี เขียวทน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญตาราง	ฉ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย	1
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการวิธีดำเนินงาน	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence)	3
2.1.1 กลไกการเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนซ์	4
2.1.2 โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence, PL)	5
2.1.3 ความแตกต่างระหว่างฟลูออเรสเซนซ์และ ฟอสฟอเรสเซนซ์	8
2.2 ระบบสเปกโทรสโกปี	8
2.2.1 แหล่งกำเนิดแสง (Light source)	9
2.2.2 ส่วนที่ใช้ในการเลือกแสง (Wavelength selectors)	11
2.2.3 วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้าง	17
2.2.4 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง (Photodetectors)	19
2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน Arduino	24
2.3.1 โปรแกรม Arduino Software	24
2.3.2 วงจร Arduino Board	26
2.4 โปรแกรม Processing	27
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 วัสดุและอุปกรณ์	28
3.2 วิธีการศึกษา/วิธีการทดลอง	28
3.2.1 การทดลองเพื่อหาค่าข้อมูลจำเพาะของเกรตติง	28
3.2.2 การออกแบบวงจร Linear Pixel Analyzer (LPA)	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
3.2.3 การเขียนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบ	31
3.2.4 การออกแบบระบบ Spectroscopy	32
3.2.5 การ Calibrate ระบบ Spectroscopy โดยใช้ He: Ne LASER และ LASER Pointer	33
3.2.6 การทดสอบระบบ Spectroscopy โดยใช้ Na Lamp	35
3.2.7 การจัดระบบ Photoluminescence spectroscopy	36
3.2.8 การนำ sample มาตรวจวัด Fluorescence ด้วย ระบบ Photoluminescence spectroscopy	37
3.2.9 การทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารตัวอย่าง ไม่ทราบองค์ประกอบด้วยระบบ Photoluminescence spectroscopy	38
บทที่ 4 ผลการทดลอง	39
4.1 ผลการทดลองเพื่อหาค่าสเปกของเกรตติง	39
4.2 การจัดวาง Linear pixel analyzer	40
4.3 ผลการ Calibrate ระบบ Spectroscopy โดยใช้ He: Ne LASER และ LASER Pointer	41
4.4 ผลการสอบเทียบการวัดของระบบ PL Spectroscopy โดยใช้ Na Lamp	43
4.5 ผลการทดลองระบบ Photoluminescence spectroscopy โดยใช้สารตัวอย่าง	46
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	49
5.1 สรุปผลการทดลอง	49
5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย	50
5.3 ข้อเสนอแนะ	51
5.4 แนวทางในการพัฒนา	51
เอกสารอ้างอิง	
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัย	2
2.1 ตารางแสดงชนิดและวิธีการกระตุ้นพลังงานในกระบวนการลูมิเนสเซนซ์	3
2.2 Continuum Source for Optica	10
2.3 Light Sources for Spectroscopy	11
4.1 ผลการหาค่าเฉลี่ยของมุมที่แสงสะท้อนออกจากเกรตติง ตามความยาวคลื่นที่กำหนด	39
4.2 ผลของการคำนวณหาสเปกของเกรตติงตามความยาวคลื่นที่กำหนดจากสมการของสเนลล์	40
4.3 แสดงค่าความยาวคลื่นที่น่าจะเป็นไปได้จากการวิเคราะห์ด้วยเลเซอร์	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 แสดงการเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน	4
2.2 แสดงการสปีนของอิเล็กตรอน	6
2.3 แผนภาพระดับพลังงาน Jablonski แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้นเนื่องจากดูดกลืนพลังงานและกระบวนการแผ่รังสี	7
2.4 แสดงการทำงานของ Wavelength Selectors	11
2.5 แสดงลักษณะกราฟของ polychromatic radiation และ monochromatic radiation(band)	12
2.6 Output of a typical wavelength selector	12
2.7 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหเมื่อความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลง	13
2.8 การกระจายแสงโดยปริซึม	14
2.9 Multidiffraction of radiation from a grating	14
2.10 Diffraction of radiation from a grating	15
2.11 แสดงการเลี้ยวเบนผ่านช่องเดี่ยวที่มีความกว้างต่างกัน	17
2.12 ภาพแสดงการทำงานของ collimator	17
2.13 แสดงเลนส์นูนและเลนส์เว้าชนิดต่างๆ	18
2.14 แสดงข้อมูลขาของ TSL 1402R Linear Sensor	22
2.15 Functional Block Diagram ของ TSL 1402R Linear Sensor	22
2.16 การต่อวงจรการทำงานของเซนเซอร์ TSL 1402R Linear Sensor	24
2.17 โปรแกรม Arduino IDE	25
2.18 บอร์ด Arduino Uno R3	26
2.19 ภาพชิพรุ่น ATmega328P	27
2.20 โปรแกรม Processing	27
3.1 แสดงการทำงานของ Reflection Grating แบบ Echellette Grating	29
3.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์การทดลองเพื่อหาสเปกของเกรตติง	29
3.3 สเปกตรัมของหลอด Hg Lamp	30
3.4 วงจร Linear Pixel Analyzer (LPA)	31
3.5 แผนภาพระบบ Spectroscopy ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks	32
3.6 สเปกตรัมของ White light Super Bright LEDs	32
3.7 แผนภาพระบบที่ใช้ในการ Calibrate Spectroscopy ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks	33
3.8 แผนภาพการทดสอบระบบ Spectroscopy โดยใช้ Na Lamp	35
3.9 แผนภาพระบบ Photoluminescence spectroscopy	36

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.10 การทดลองวัดสเปกตรัมของ sample ด้วยระบบ Photoluminescence Spectroscopy	37
3.11 Sample ที่นำมาตรวจวัดด้วยระบบ Photoluminescence Spectroscopy	37
3.12 สารตัวอย่างไม่ทราบองค์ประกอบที่นำมาตรวจวัดด้วยระบบ Photoluminescence Spectroscopy	38
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pixels ของ linear pixels analyzer กับหน่วยใดๆ ของ Super bright LEDs	40
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pixels ของ Sensor กับ ความเข้ม ของ Green LASER Pointer	41
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pixels ของ Sensor กับ ความเข้ม ของ Blue LASER Pointer	41
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง Pixels ของ Sensor กับ ความเข้ม ของ He: Ne LASER 633 nm	42
4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง ความยาวคลื่น และ Pixel	43
4.6 กราฟแสดงผลการสอบเทียบการวัดของระบบ Photoluminescence spectroscopy โดยใช้ หลอด Na lamp	43
4.7 สารละลาย DCM ที่ถูกกระตุ้น	46
4.8 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ Photoluminescence spectroscopy โดยใช้สาร Dichloromethane ความเข้มข้น 8×10^{-5} M	46
4.9 สารละลาย DCM ที่ถูกกระตุ้น	47
4.10 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ Photoluminescence spectroscopy โดยใช้สาร Rhodamine B ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} M	47
4.11 สารละลายไม่ทราบองค์ประกอบที่ถูกกระตุ้น	48
4.12 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ Photoluminescence spectroscopy โดยใช้สารUnknown	48

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันเทคโนโลยีมีความก้าวหน้ามากขึ้น มีการนำเทคโนโลยีทางแสงมาประยุกต์ใช้ให้เกิดประโยชน์ในหลายด้าน ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ การนำมาใช้ประโยชน์ในการศึกษาด้านสเปกโทรสโกปี และ ด้านวัสดุศาสตร์โดยใช้เทคโนโลยีทางแสงในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุ

ในการศึกษาฟิสิกส์พื้นฐานและโมเดิร์นฟิสิกส์ในระดับมหาวิทยาลัย มีการทำการวิจัยและสังเคราะห์สารใหม่ๆ เพื่อนำมาใช้ประโยชน์เป็นจำนวนมาก จึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของสารนั้น เพื่อนำข้อมูลมาวิเคราะห์ ทั้งด้านโครงสร้าง ส่วนประกอบของสาร พื้นผิว การเรืองแสง การนำไฟฟ้า และการดูดกลืนพลังงาน เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในคุณสมบัติของข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์สารคือ คุณสมบัติด้านการเรืองแสงของวัสดุ (Photoluminescence of Materials) ซึ่งเป็นการตรวจสอบคุณสมบัติด้านการเปล่งแสงของสารเรืองแสง โดยใช้เทคนิคโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescence spectroscopy)

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้สร้างชุดศึกษาระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี ซึ่งควบคุมโดยคอมพิวเตอร์ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสง ที่ความยาวคลื่น นาโนเมตร โดยคาดว่าชุดทดลองนี้จะสามารถวัดผลของสารตัวอย่างที่เปล่งแสงออกมาจากระบบการโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปีได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาระบบการโฟโตลูมิเนสเซนส์
- 1.2.2 สามารถผลิตเครื่องมือวัดสเปกตรัมของแสงจากการเรืองแสงของวัสดุ
- 1.2.3 เพื่อใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ในการควบคุมระบบการประมวลผลและสามารถแสดงผลบนคอมพิวเตอร์ได้

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

สร้างชุดศึกษาโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี เพื่อวัดสเปกตรัมการเรืองแสงของวัสดุในย่านที่ตามองเห็น (Visible Light) ให้แสดงผลในรูปแบบกราฟสเปกตรัมบนเครื่องคอมพิวเตอร์

1.4 ขั้นตอนของการวิจัยและวิธีดำเนินงาน

1.4.1 แผนการดำเนินงาน สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับปรากฏการณ์โฟลโตลูมิเนสเซนส์
- ขั้นตอนที่ 2 ศึกษาวิธีการทำงานของระบบโฟลโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี
- ขั้นตอนที่ 3 ออกแบบระบบโฟลโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปีและจัดหาอุปกรณ์
- ขั้นตอนที่ 4 สร้างระบบโฟลโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี
- ขั้นตอนที่ 5 การสอบเทียบระบบโฟลโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี
- ขั้นตอนที่ 6 การหาข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือ
- ขั้นตอนที่ 7 ทดลองใช้ระบบกับสารตัวอย่าง
- ขั้นตอนที่ 8 วิเคราะห์ผลการทดลองและจัดทำรูปเล่มรายงาน
- ขั้นตอนที่ 9 นำเสนอชุดศึกษาระบบโฟลโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี

1.4.2 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน

ตารางที่ 1.1 ระยะเวลาที่ใช้ในการดำเนินงานในแต่ละขั้นตอน

หัวข้องานวิจัย	ปี 2558							ปี 2559				
	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.
ขั้นตอนที่ 1												
ขั้นตอนที่ 2												
ขั้นตอนที่ 3												
ขั้นตอนที่ 4												
ขั้นตอนที่ 5												
ขั้นตอนที่ 6												
ขั้นตอนที่ 7												
ขั้นตอนที่ 8												
ขั้นตอนที่ 9												

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 มีความรู้ความเข้าใจในปรากฏการณ์การวาวของของวัสดุ
- 1.5.2 มีทักษะในการเขียนโปรแกรมการควบคุม กระบวนการวิเคราะห์ผลและการแสดงผลในรูปแบบกราฟบนคอมพิวเตอร์
- 1.5.3 มีทักษะในการจัดอุปกรณ์และเครื่องมือวัดที่ใช้ในระบบโฟลโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการศึกษาระบบโฟโตลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescences spectroscopy) มีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ดังต่อไปนี้

2.1 ลูมิเนสเซนส์ (Luminescence)

ลูมิเนสเซนส์ (luminescence) การเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนส์เกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานที่สูงลงมาสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ปรากฏการณ์นี้เกิดได้ทั้งในวัสดุก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ทั้งวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ วิธีการกระตุ้นให้พลังงานแก่วัสดุ มีหลายวิธี ชนิดของลูมิเนสเซนส์จะแบ่งตามวิธีการกระตุ้นพลังงานให้แก่วสดุ ดังนี้

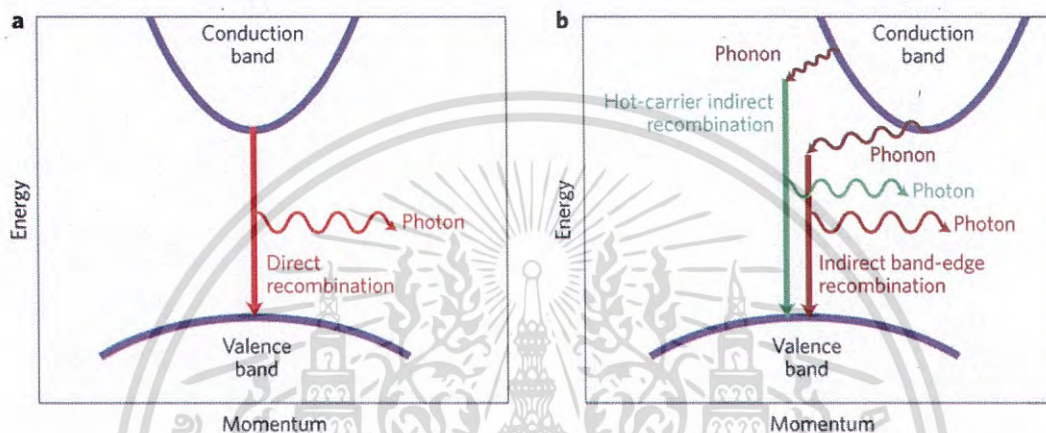
ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงชนิดและวิธีการกระตุ้นพลังงานในกระบวนการลูมิเนสเซนส์

ชนิดของลูมิเนสเซนส์	วิธีการกระตุ้น
Photoluminescence (PL) - Stokes type - Anti-Stokes type	แสง
Electroluminescence (EL) - Intrinsic EL - Carrier Injection EL	ไฟฟ้า
Cathodeluminescence	อิเล็กตรอน
Thermoluminescence	ความร้อน
Triboluminescence	การเสียดสี
Chemical luminescence	ปฏิกิริยาเคมี
X-ray luminescence	รังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 กลไกการเปล่งแสงแบบลูมินเนสเซนส์

1. การเปล่งแสงที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอน (Electron) ในแถบคอนดักชันรวมตัวโดยตรงกับโฮล (Hole) ในแถบเวเลนซ์: เป็นการเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน (band-to-band transition) เป็นการรวมตัวกันโดยตรงระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล โดยอิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบคอนดักชัน (Conduction band) ตกลงมารวมกับโฮลที่อยู่ในแถบเวเลนซ์ (Valence band) ถ้าวัสดุสารกึ่งตัวนำเป็นชนิดช่องว่างพลังงานแบบตรง (direct band gap) โฟตอน (Photon) ที่ออกมาจะมีพลังงานเท่ากับขนาดของช่องว่าง



รูปที่ 2.1 แสดงการเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะระหว่างแถบพลังงานของอิเล็กตรอน

- โฟตอนที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำชนิดช่องว่างพลังงานแบบ direct band gap
- โฟตอนที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำชนิดช่องว่างพลังงานแบบ indirect band gap

2. การเปล่งแสงที่เกิดจากการที่อิเล็กตรอนในแถบคอนดักชันรวมตัวกับโฮลที่ถูกจับอยู่ที่ระดับแอกเซปเตอร์ (Acceptor) หรืออิเล็กตรอนที่ถูกจับอยู่ในระดับโดเนอร์ (Donor) รวมตัวกับโฮลที่อยู่ในแถบเวเลนซ์: เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างสารตั้งต้นกับสารเจือ (Free carrier-impurity level transition)

3. การเปล่งแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างระดับโลคอลไลซ์ (Localized Level) เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนระหว่างสถานะโลคอลไลซ์ (localized states-to-localized states) เช่น การเปล่งแสงจากศูนย์กลางชนิดเฟซเซนเตอร์ (F-center) ในวัสดุชนิดอัลคาไลแฮไลด์ (alkali halide) ซึ่งผลึกของวัสดุชนิดนี้เมื่อถูกอบให้ความร้อนภายในบรรยากาศของโลหะตระกูลอัลคาไล (เช่น Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) จะทำให้อะตอมของโลหะอัลคาไลแพร่ซึมเข้าไปในผลึกอัลคาไลแฮไลด์และทำให้เนื้อผลึกนั้นมีจำนวนอะตอมชนิดแฮไลด์ (เช่น F, Cl, Br, I, At) ที่ไม่สมดุลกับอะตอมอัลคาไลด์ นั่นคือเปรียบเสมือนกับเกิดช่องว่างที่ขาดอะตอมแฮไลด์ จากนั้นเพื่อทำให้สภาพทางไฟฟ้าเป็นกลาง อิเล็กตรอนจะวิ่งไปจับอยู่ที่ช่องว่างของแฮไลด์นั้น ซึ่งเปรียบเสมือนว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่องว่างนั้นเป็นไอออนบวกและอิเล็กตรอนถูกแรง คูลอมบ์ (Coulomb) ดึงดูดไว้คล้ายกับแบบจำลองอะตอมของไฮโดรเจน และอิเล็กตรอนเหล่านั้นมีสถานะอยู่ที่สถานะพื้น (Ground states) เมื่อมีแสงเข้าสู่ผลึกชนิดนี้ แสงนั้นจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากสถานะพื้นไปยังสถานะกระตุ้น (Excited states) เกิดการดูดกลืนแสง และทำให้ผลึกนั้นมีสีตามความยาวคลื่นที่ดูดกลืนเข้าไป เราเรียกการเกิดจุดบกพร่อง (Defects) ของโครงผลึกนี้ว่า การเกิดคัลเลอร์เซนเตอร์ (Color-centers) หรือเฟนเซนเตอร์ (F-centers)

4. การเปล่งแสงจากเอกซิตอน (Exciton) เอกซิตอน (Exciton) คือ คู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกกระตุ้นแต่พลังงานที่ใช้ในการกระตุ้นนั้นยังมีค่าไม่มากพอที่จะทำให้พาหะทั้งคู่แยกออกจากกันเป็นอิสระได้กล่าวคือ ยังมีแรงคูลอมบ์ดึงดูดให้อิเล็กตรอนและโฮลจับกันเป็นคู่ๆ และระดับพลังงานของอิเล็กตรอนและของโฮลยังอยู่ในช่องว่างพลังงานต้องห้ามเอกซิตอนมี 2 ชนิด คือ

- เอกซิตอนอิสระ (Free Exciton) : การเปล่งแสงจากเอกซิตอนชนิดอิสระนี้จะมีค่าพลังงานโฟตอนน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานต้องห้ามเล็กน้อย
- เอกซิตอนแบนด์ (Bound Exciton) : เนื่องจากอิเล็กตรอนและโฮลในเอกซิตอนแบนด์นี้อยู่ใกล้กันมาก พลังงานโฟตอนของแสงที่ถูกเปล่งออกมาจากการรวมตัวของอิเล็กตรอน และโฮล จึงมีค่าน้อยกว่าขนาดของช่องว่างพลังงานต้องห้ามมาก

2.1.2 โฟโตลูมิเนสเซนส์ (Photoluminescence, PL)

โฟโตลูมิเนสเซนส์เป็นกระบวนการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนไปสู่สถานะกระตุ้นและกลับสู่สถานะพื้น (Excitation-De excitation Process) โดยมีโฟตอนกระตุ้นให้เกิดอันตรกิริยา คือ มีการดูดกลืนโฟตอนและให้โฟตอนออกมา

กระบวนการการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนส์

1. กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

เมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลจะขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (Excitation- state) และจะมีกลไกในการลดระดับพลังงานลงสู่สถานะพื้นดั้งเดิม (De excitation state)

ถ้าให้มัลติพลีซิตี (Multiplicity, M) ของโมเลกุล ซึ่งแสดงถึงโมเมนตัมของมุมออบิตัล (Orbital angular momentum) ของแต่ละสถานะและเกี่ยวข้องกับการหมุนของอิเล็กตรอน (Electron spin) ดังสมการ

$$M = 2S + 1 \quad (\text{สมการที่ 2.1})$$

เมื่อ S คือเลขควอนตัมของการหมุนของอิเล็กตรอน (Spin quantum number) ของโมเลกุล และผลรวมของการหมุนของอิเล็กตรอนในโมเลกุลของสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ $S=0$ เพราะโมเลกุลมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ดังนั้นสถานะที่มีพลังงานต่ำสุด ซึ่งเรียกว่าสถานะพื้นอิเล็กตรอนจะต้องอยู่เป็นคู่

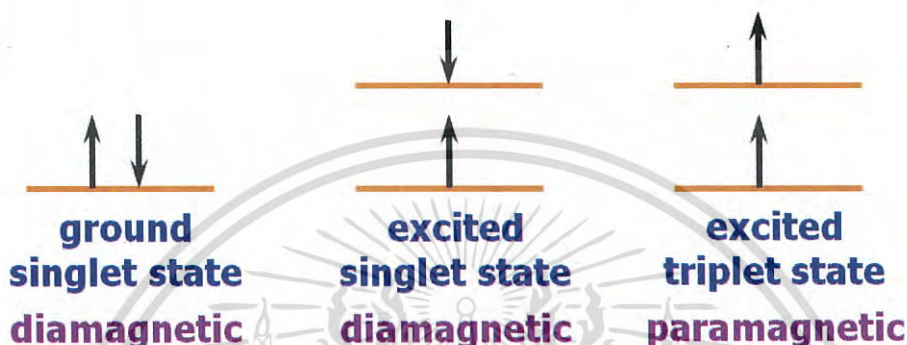
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S = (+\frac{1}{2} - \frac{1}{2}) = 0 \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

นำค่า S ที่ได้แทนค่าในสมการที่ 2.1

$$M = 2(0) + 1 = 1 \quad (\text{สมการที่ 2.3})$$

เรียกว่า singlet electron state และให้สถานะพื้นของ singlet state เป็น S_0 ให้ S_1 และ S_2 เป็นสถานะที่ถูกกระตุ้นลำดับแรกและลำดับที่สองของ singlet state ตามลำดับ



รูปที่ 2.2 แสดงการหมุนของอิเล็กตรอน

ขณะที่โมเลกุลอยู่ในสถานะกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวหนึ่งมีโอกาที่จะเปลี่ยนการหมุนของอิเล็กตรอนกลับทาง ดังนี้

$$S = +\frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

นำค่า S ที่ได้แทนค่าในสมการที่ 2.1

$$M = (2 + 1) = 3 \text{ เรียกว่าสถานะ triplet state}$$

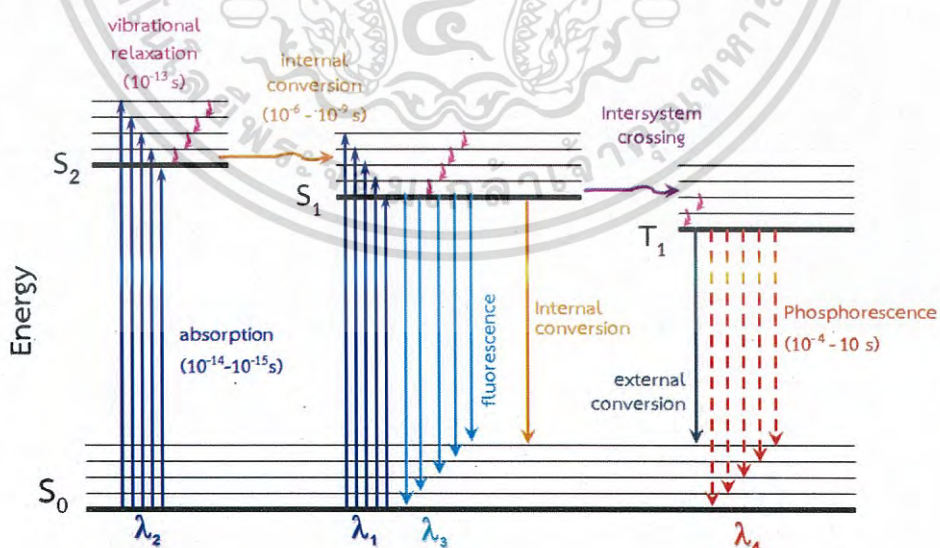
สถานะ Triplet state ที่มีพลังงานต่ำสุดให้เป็น T_1 ดังนั้น โมเลกุลที่มีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ จึงไม่สามารถมีในสถานะพื้นของ triplet state เพราะอิเล็กตรอนมีพลังงานต่ำที่สุดมีการสปินคู่ (จำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่) ดังนั้น โมเลกุลที่มีสปินเดี่ยว (จำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคี่) จึงมีสถานะเป็น doublet state เช่น free radicals เป็นต้น

2. กระบวนการลดระดับพลังงาน (De excitation)

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นไปสู่สถานะกระตุ้น (Excitation state) การที่โมเลกุลจะกลับลงมาสู่สถานะพื้นนั้นจะมีกลไกต่างๆ เกิดขึ้นหลายขั้นตอน ถ้าโมเลกุลนั้นอยู่ในสารละลาย โมเลกุลนั้นจะสามารถลดพลังงานจากการสั่น (Vibrational energy) ที่เกินไปด้วยการชนกับโมเลกุลของตัวทำละลายกลายเป็นความร้อนผ่านกระบวนการลดพลังงานจากการสั่น (Vibrational Relaxation, VR)

ในขณะเดียวกันโมเลกุลที่อยู่ S_2 จะมีระดับพลังงานของการสั่น ลดต่ำลงมาอยู่ในระดับเดียวกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พลังงานของการสั่นที่สูงของ excited singlet แรก S_1 นั่นคือ S_2 มีพลังงานต่ำกลายเป็น S_1 พลังงานสูง (Internal Conversion, IC) กระบวนการลดพลังงานของ VR และ IC เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (ประมาณ 10^{-12} วินาที) จนโมเลกุลลงมาสู่สถานะ S_1 โดยไม่มีการแผ่รังสี ดังนั้น จะเห็นว่าการลดระดับพลังงานจากสถานะสูงกว่า S_1 มาสู่สถานะ S_1 มีการแผ่รังสีจะพบได้น้อย เมื่อโมเลกุลลงมาสู่ระดับพลังงาน S_1 ที่มีพลังงานต่ำแล้วก็จะเกิด การลดระดับพลังงานไปสู่ S_0 โดยมีการให้โฟตอน เรียกว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ซึ่งเกิดรวดเร็วมาก (ประมาณ 10^{-9} - 10^{-7} วินาที) จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่า มีระดับพลังงานหนึ่งที่สารดูดกลืนเข้าไปทำให้เกิดสถานะกระตุ้นเท่ากับพลังงานที่สารนั้นให้ออกมาเมื่อกลับสู่สถานะพื้น (0-0 transitions) ในกรณีที่โมเลกุลกำลังอยู่ในสถานะกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวหนึ่งอาจเกิดหมุนกลับทาง (Reverse spin) ทำให้ค่า M มีค่าเป็น 3 โมเลกุลนั้นจะถูกเปลี่ยนจาก singlet state ไปเป็น triplet state โดยกระบวนการเกิดนี้ไม่มีการให้รังสีออกมา (Intersystem crossing, ISC) ซึ่ง triplet state นั้นจะมีพลังงานต่ำกว่าของ singlet state เดิม โมเลกุลของสารอินทรีย์นั้นมีจำนวนอิเล็กตรอนเป็นเลขคู่ ทำให้โมเลกุลนั้นไม่มีในสถานะพื้นของ triplet state ดังรูป 2.2 เนื่องจากอิเล็กตรอนที่อยู่ในออร์บิทัลมีพลังงานต่ำและมีสปินคู่ ตามกฎของฮุนด์ (Hund's rule) เมื่อค่า M เปลี่ยนเป็น triplet state ที่มีพลังงานสูงแล้วก็จะเกิดกระบวนการ VR เพื่อลดพลังงานให้เป็นสถานะ triplet state (T_1) ที่มีพลังงานต่ำ และเกิดกระบวนการลดระดับพลังงานจาก T_1 ไปยัง S_0 โดยได้โฟตอนเกิดขึ้นเรียกว่า ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence) การเกิดทรานซิชันระหว่างสถานะที่มีค่า M ต่างกันจะเกิดไม่ได้ กระบวนการเกิดฟอสฟอเรสเซนซ์จะใช้เวลานานกว่าฟลูออเรสเซนซ์ (ประมาณ 10^3 - 10 วินาที) ดังนั้นจึงทำให้เห็นการเรืองแสงของสารตัวอย่างได้หลังจากทำให้เกิดสถานะกระตุ้นแล้ว ทั้งนี้จะต้องอยู่ที่อุณหภูมิต่ำๆ เท่านั้น



รูปที่ 2.3 แผนภาพระดับพลังงานจาบวส์กี (Jablonski) แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้นเนื่องจาก

ดูดกลืนพลังงานและกระบวนการแผ่รังสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	S_0	คือ ground electronic singlet state
	S_1, S_2	คือ first and second excited electronic singlet state
	T_1	คือ first excited electronic triplet state

2.1.3 ความแตกต่างระหว่างฟลูออเรสเซนซ์และฟอสฟอเรสเซนซ์

ฟลูออเรสเซนซ์: เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก excited singlet state ไปยัง ground singlet state transition นี้มีความเป็นไปได้สูง ดังนั้นช่วงเวลาของ excited singlet state สั้นมาก (10^{-5} วินาที หรือน้อยกว่า)

ฟอสฟอเรสเซนซ์: เกิดขึ้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนจาก excited triplet state ไปยัง ground singlet state เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงนี้มีการเปลี่ยนทิศการหมุนของอิเล็กตรอน จึงมีความเป็นไปได้น้อยกว่าช่วงเวลาของ excited triplet state จึงยาวกว่า ($10^{-4} - 10^4$ วินาที)

เนื่องจากฟอสฟอเรสเซนซ์มีช่วงเวลายาวนาน โมเลกุลใน excited state บางส่วนจึงอาจมีการลดระดับพลังงานที่ไม่มีการให้รังสีออกมา (Nonradiative relaxation) ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการฟอสฟอเรสเซนซ์และ ความเข้มของแสงที่เกิดจากกระบวนการฟอสฟอเรสเซนซ์ค่อนข้างต่ำ โดยทั่วไปจึงวัดฟอสฟอเรสเซนซ์ที่อุณหภูมิต่ำ

2.2 ระบบสเปกโทรสโกปี

สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) แต่เดิมหมายถึงการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างการแผ่รังสีกับสสารในรูปของฟังก์ชันความยาวคลื่น (λ) สเปกโทรสโกปีจะอ้างถึงการกระเจิงของแสงที่ตามองเห็นตามขนาดความยาวคลื่นของมัน เช่น การกระเจิงของแสงผ่านปริซึม ต่อมาหลักการนี้ได้ขยายออกไปครอบคลุมการวัดปริมาณใดๆ ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของทั้งความยาวคลื่นและความถี่ ดังนั้นมันจึงเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสนามหรือความถี่ (V) ด้วย ขอบเขตการศึกษายังขยายไปครอบคลุมเรื่องของพลังงาน (E) ในฐานะตัวแปร ทั้งนี้เนื่องมาจากความสัมพันธ์กันระหว่างพลังงานและความถี่ตามสมการ $E = h\nu$ (h ในที่นี้คือ ค่าคงที่ของพลังค์) การพล็อตค่าที่ได้จากฟังก์ชันความยาวคลื่นหรือความถี่นี้ เรียกชื่อกันว่าเป็น สเปกตรัม (Spectrum)

การศึกษาสเปกโทรสโกปี มักใช้ในการวิเคราะห์เคมีและเคมีกายภาพ เพื่อใช้ในการระบุถึงส่วนประกอบของสสาร โดยดูจากเส้นสเปกตรัมที่สสารนั้นแผ่ออกมาหรือถูกดูดกลืนเข้าไป

นอกจากนี้ ยังมีการใช้งานสเปกโทรสโกปีอย่างมากในทางดาราศาสตร์ กล้องโทรทรรศน์ขนาดใหญ่ส่วนมากจะติดตั้งสเปกโตรมิเตอร์เอาไว้ ซึ่งใช้ทั้งการตรวจวัดองค์ประกอบทางเคมีและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของวัตถุทางดาราศาสตร์ และยังใช้วัดความเร็วของวัตถุเหล่านั้นโดยสังเกตการเคลื่อนดอปเพลอร์จากเส้นสเปกตรัมของวัตถุนั้น

เครื่องสเปกโทรสโกปี ส่วนใหญ่ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (analytical instrument) การปลดปล่อยพลังงาน การดูดกลืนพลังงานและ การวัดการเรืองแสงไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือที่ออกแบบสำหรับใช้กับแสงยูวี แสงที่ตามองเห็น หรือรังสีอินฟราเรด (IR radiation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จึงมักเรียกว่าเครื่องมือวัดทางแสง (optical instrument) แม้ว่าจะใช้สำหรับช่วงความยาวคลื่นที่ตามองไม่เห็นประกอบด้วย 5 ส่วน

1. แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเสถียรภาพด้านพลังงาน
2. ส่วนที่ใช้ในการแยกความยาวคลื่น
3. ภาชนะบรรจุสารตัวอย่าง
4. ตัวตรวจวัด (Sensor) และ ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็น

สัญญาณที่สามารถวัดได้โดยปกติจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า

5. ส่วนประมวลผลและแสดงผล

ในการวัดการดูดกลืนรังสีจากแหล่งกำเนิดแสงจะผ่านส่วนที่ใช้ในการแยกความยาวคลื่นเพื่อให้ได้รังสีที่มีความยาวคลื่นตามต้องการเมื่อรังสีที่ได้ผ่านตัวอย่างในภาชนะบรรจุสารตัวอย่างจะเกิดการดูดกลืนรังสีโดยส่วนของเซนเซอร์และทรานสดิวเซอร์จะทำหน้าที่ตรวจวัดรังสี จากนั้นประมวลสัญญาณและอ่านผลด้วยส่วนประมวลผลและแสดงผลในเครื่องมือบางเครื่องตำแหน่งของส่วนที่ใช้ในการเลือกความยาวคลื่น และ ภาชนะบรรจุสารตัวอย่างอาจสลับกัน

ในการวัดการเรืองแสงของรังสีจากแหล่งกำเนิดแสงผ่านส่วนที่ใช้ในการเลือกความยาวคลื่น (ตัวแรก) เพื่อเลือกความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับการกระตุ้น เมื่อรังสีผ่านตัวอย่างจะถูกกระตุ้นและเปล่งแสง จากนั้นผ่านส่วนที่ใช้ในการเลือกความยาวคลื่น (ตัวที่สอง) เพื่อแยกความยาวคลื่นที่ถูกปลดปล่อยออกมาแล้วตรวจวัดการเรืองแสงในทิศทางตั้งฉากกับรังสีจากแหล่งกำเนิด

เครื่องมือสำหรับวัดการปลดปล่อยพลังงาน ไม่ต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงตัวอย่างจะถูกบ่อน้ำเข้าสู่ พลาสมา เฟลม หรือ พื้นผิวที่ถูกกระตุ้นให้มีอุณหภูมิสูงขึ้นซึ่งให้พลังงาน ทำให้ในตัวอย่างเปล่งรังสี จากนั้นตรวจวัดรังสีที่เปล่งออกมาประมวลสัญญาณและอ่านผล

วัสดุที่ใช้ในการสร้างได้แก่ กระจก เลนส์ สลิต ปริซึม สารตัวอย่าง และภาชนะบรรจุสารตัวอย่างของเครื่องสเปกโทรสโกปีต้องโปร่งใส (Transparent) ในช่วงสเปกตรัมที่ใช้

- ในช่วงที่ตามองเห็นนิยมใช้แก้วซิลิเกต (Silicate glass)
- ในช่วง ยูวี (<380 nm) ต้องใช้ผสมด้วยซิลิกา (fused silica) หรือ ควอตซ์ (Quartz)
- ในช่วง รังสีอินฟราเรด ใช้ halide salt (KBr, NaCl, AgCl)

2.2.1 แหล่งกำเนิดแสง

การดูดกลืนแสงและการวัดการเรืองแสงของสารต้องมีแหล่งกำเนิดแสงอยู่ด้านนอกของระบบ แหล่งกำเนิดแสงที่ดีควรมีเสถียรภาพ (Stability) สูง นั่นคือ ให้กำลังไฟฟ้าคงที่ ความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดจะแปรผันแบบฟังก์ชันเอ็กโพเนนเชียล (Exponential) กับ แรงดัน (Voltage) ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า ดังนั้นจึงมักใช้ ตัวคุมค่าแรงดัน (Voltage regulator) สามารถ ให้รังสีที่มีความเข้ม (Intensity) สูง สามารถตรวจวัดได้ง่ายและ ให้รังสีที่มีช่วงของสเปกตรัมกว้าง

ในระบบออปติคอลลสเปกโทรสโกปี (Optical spectroscopy) ใช้ทั้ง Continuous Sources และ Line sources

1. แบบ Continuous Sources

ให้รังสีแบบต่อเนื่องในช่วงที่ต้องการ

ใช้ในกระบวนการดูดกลืนแสงของโมเลกุล (Molecular absorption methods)

ในช่วงยูวีที่ใช้กันมากที่สุดคือ หลอดไฮโดรเจนและหลอดดิวเทอเรียม (Hydrogen and deuterium lamp)

ในช่วงที่ตามองเห็นใช้หลอดทังสเตน (Tungsten filament incandescent lamp)

2. แบบ Line Sources

ใช้ในการเรืองแสงและการวัดการดูดกลืนแสงระดับอะตอมนอกจากนี้ยังใช้ใน รามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) รีแฟร็กโทเมทรี (Refractometry) และ โพลาริเมทรี (Polarimetry)

หลอดไอโลหะ (Metal Vapor) ที่ใช้กันมากมี 2 ชนิดคือ หลอดเมอร์คิวรี (Mercury) และ หลอดโซเดียม (Sodium vapors lamps) ให้สเปกตรัมในช่วงยูวีและช่วงที่ตามองเห็น

หลอดฮอโลว์ คาโทด (Hollow Cathode Lamps) ให้ Line spectra สำหรับธาตุจำนวนมากใช้ในการวัดการดูดกลืนแสงของอะตอมและการวัดการเรืองแสงของอะตอม

ตารางที่ 2.2 แหล่งกำเนิดแสงแบบ Continuum (Continuum Sources for Optical Spectroscopy)

แหล่งกำเนิดรังสี	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	ชนิดของสเปกโทรสโกปี
Xenon arc lamp	250-600	Molecular fluorescence
H ₂ and D ₂ lamp	160-380	UV molecular absorption
Tungsten/halogen lamp	240-2,500	UV/visible/near-IR molecular absorption
Tungsten lamp	350-2,200	Visible/near-IR molecular absorption
Nernst glower	400-20,000	IR molecular absorption
Nichrome wire	750-20,000	IR molecular absorption
Global	1,200-40,000	IR molecular absorption

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 แหล่งกำเนิดแสงแบบ Line (Line Sources for Spectroscopy)

แหล่งกำเนิดรังสี	ช่วงความยาวคลื่น (nm)	ชนิดของสเปกโทรสโกปี
Hollow cathode lamp	UV/vis	Atomic absorption; atomic fluorescence
Electrodeless discharge lamp	UV/vis	Atomic absorption; atomic fluorescence
Metal vapor lamp	UV/vis	Atomic absorption; atomic fluorescence; Raman
Laser	UV/vis/IR	Raman; molecular absorption; molecular fluorescence

ในออปติกคอลสเปกโทรสโกปีใช้ทั้งแหล่งกำเนิดแสงแบบ Continuous sources และ Line sources ในช่วงยูวีนิยมใช้หลอดดิวเทอร์เรียมและ หลอดไฮโดรเจน ส่วนในช่วงที่ตามองเห็นนิยมใช้หลอดทั้งสแตน

2.2.2 ส่วนที่ใช้ในการเลือกแสง (Wavelength Selector)

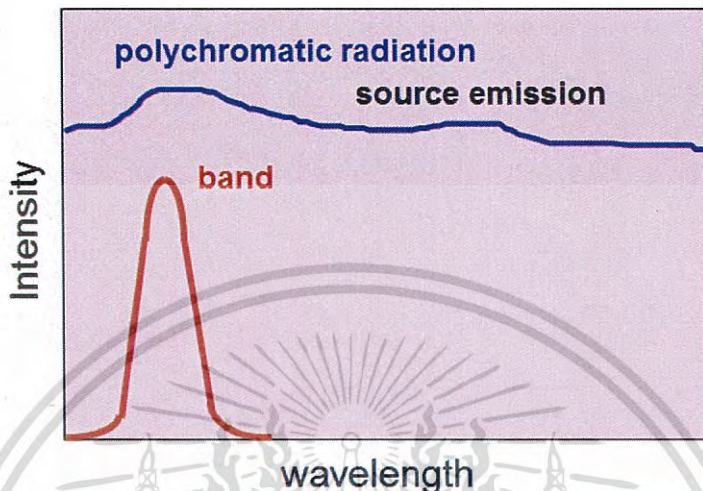
ทำหน้าที่แยกรังสีหลายความยาวคลื่น (Polychromatic radiation) ให้เป็นรังสีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation)



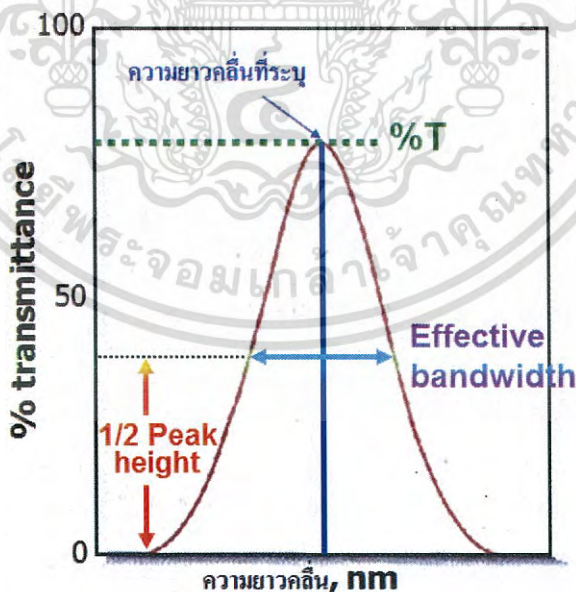
รูปที่ 2.4 แสดงการทำงานของส่วนที่ใช้ในการเลือกแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในทางปฏิบัติรังสีที่ได้จะไม่ใช่อรังสีหลายความยาวคลื่น แต่จะมีความยาวคลื่นในช่วงแคบๆ เรียกว่า แถบ (Band) ซึ่งเป็น Gaussian-shaped distribution of wavelengths ในการแยกรังสีให้เป็นแถบแคบๆ สามารถเพิ่มความไวในการเลือกแสงของเครื่องมือ อีกทั้งยังสามารถลดการเบี่ยงเบนจาก Beer's law เนื่องจากรังสีหลายความยาวคลื่นสำหรับการวัดการดูดกลืน



รูปที่ 2.5 แสดงลักษณะกราฟของรังสีหลายความยาวคลื่น (Polychromatic radiation) และรังสีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation)



รูปที่ 2.6 ลักษณะสัญญาณที่ได้จากส่วนที่ใช้แยกความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

นิยามว่า Effective bandwidth หรือ Bandwidth คือ ความกว้างของแถบที่ครึ่งหนึ่งของจุดสูงสุดของกราฟ (Half-peak height) ในหน่วยความยาวคลื่น Bandwidth จะแปรผกผันกับคุณภาพของเครื่องมือ ถ้า Bandwidth แคบ แสดงว่า เครื่องมือมีสมรรถนะสูง

สภาพไว (Sensitivity) ของเครื่องมือหรือวิธี หมายถึงความสามารถของเครื่องมือหรือวิธีในการจำแนกความแตกต่างของความเข้มข้นของการวิเคราะห์ที่มีค่าน้อยๆ

ปัจจัยที่มีผลต่อสภาพไวคือ

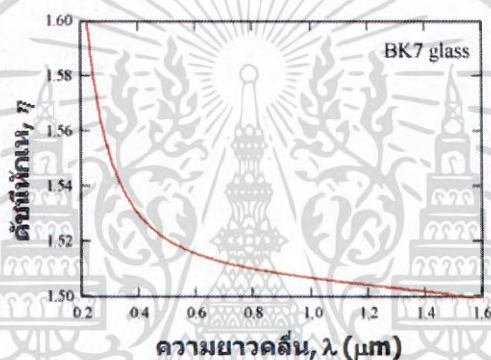
1. ความชัน (Slope) ของ Calibration curve :

ถ้า Calibration curve มีความชันมากสภาพไวจะสูง

2. สภาพทำซ้ำได้ (Repeatability) หรือความเที่ยง (Precision) ของเครื่องมือวัด:

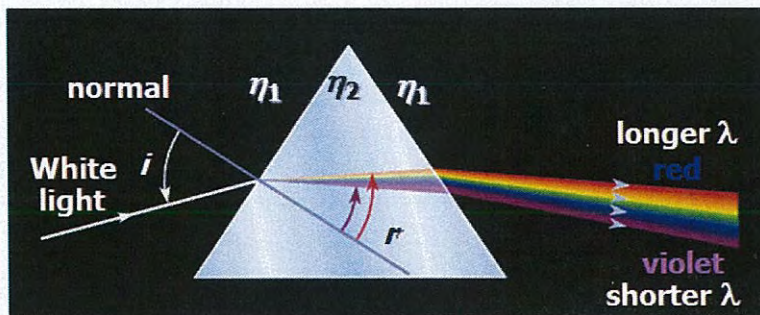
ถ้าสภาพทำซ้ำได้หรือความเที่ยงสูงสภาพไวจะสูง

1. ปริซึม (Prism)



รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงดัชนีหักเหเมื่อความยาวคลื่นเปลี่ยนแปลง

ปริซึมเมื่อแสงผ่านปริซึมจะเกิด การหักเห (Refraction) เนื่องจากดัชนีหักเห (Refractive index) ของปริซึมและอากาศแตกต่างกัน เนื่องจากดัชนีหักเหขึ้นกับความยาวคลื่น แสงความยาวคลื่นต่างๆ จึงถูกหักเหได้ไม่เท่ากัน และกระจายออกจากกัน ดังนั้น แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่าจะถูกหักเหได้มากกว่า



รูปที่ 2.8 การกระจายแสงโดยปริซึม

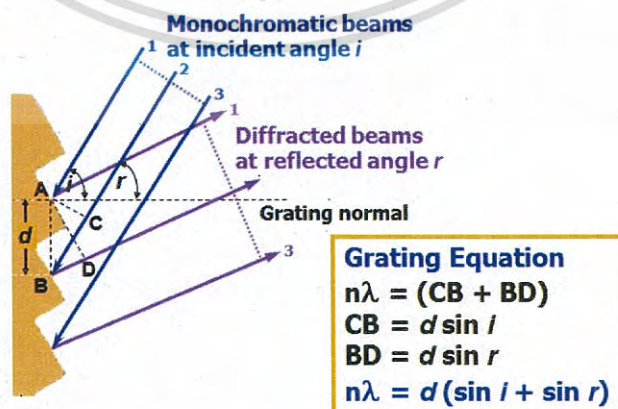
แสงของปริซึมบนระนาบโฟกัสไม่ใช่การกระจายแบบเชิงเส้น (Non-linear dispersion) ปริซึมที่ใช้ในช่วงตามองเห็นทำด้วยแก้วและ ปริซึมที่ใช้ในช่วงยูวีทำด้วยควอตซ์หรือ ส่วนผสมที่มีซิลิกา (ใช้ในช่วงที่ตามองเห็นได้ด้วย)

2. เกรตติง (Grating)

เกรตติงแยกแสงโดยอาศัยหลักการแทรกสอดเสริมและการแทรกสอดหักล้างของ รังสีเกรตติงที่ใช้ในช่วงยูวีถึงช่วงที่ตามองเห็นมักมี 300 – 2000 ช่อง/mm ที่นิยมใช้ที่สุดคือเกรตติงที่มี 1200 – 1400 ช่อง/mm

Echelle Grating

เป็นเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก ช่องด้านหนึ่งมี หน้ากว้างและอีกด้านหนึ่งหน้าแคบ การสะท้อนแสง (Reflection) จะเกิดขึ้นที่หน้ากว้าง อาจถือว่า แต่ละ พื้นผิวของเกรตติง (Board face) เป็นจุดกำเนิดของลำแสง ให้ลำแสงสะท้อน (Reflected beam) 1, 2, 3 ซึ่งแทรกสอดซึ่งกันและกัน ถ้าจะให้เกิดระยะทางของการแทรกสอดของแสง (Constructive interference path lengths) ต้องต่างกันเป็นจำนวน n เท่าของ ความยาวคลื่น ของแสงตกกระทบ (Wavelength of incident beam)



รูปที่ 2.9 ลำดับการเลี้ยวเบนของแสงจากเกรตติง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อลำแสงขนานของรังสีความยาวคลื่นเดียวตกกระทบบนเกรตติงที่มุมตกกระทบบ i กับเส้นปกติของเกรตติง จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของแสงเนื่องจากเกรตติงสะท้อนแสง

การเลี้ยวเบนของลำแสง (Diffracted beam) อาจเกิดการแทรกสอด (Interference) ซึ่งกันและกัน การแทรกสอดเสริม (Constructive interference) จะสูงสุดที่มุมสะท้อน r ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวคลื่น (λ)

$$\text{ตั้งสมการ} \quad n\lambda = d(\sin i + \sin r) \quad (\text{สมการที่ 2.2})$$

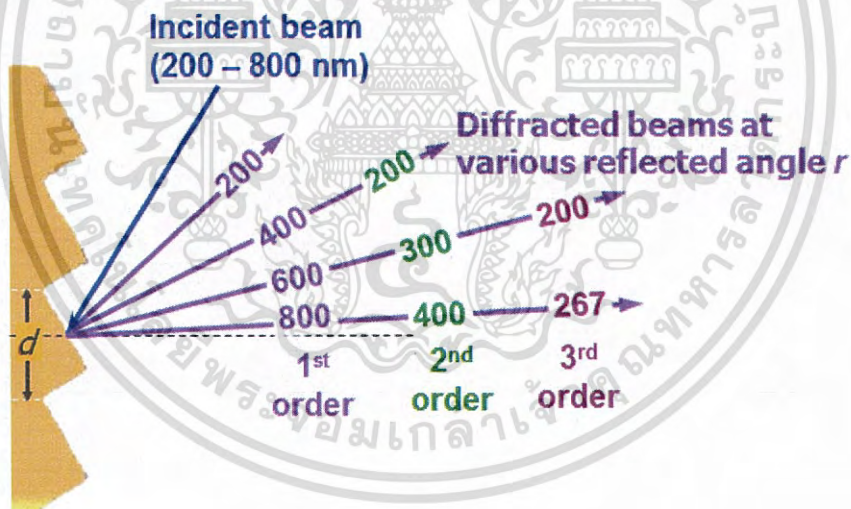
เมื่อ $n =$ อันดับการเลี้ยวเบน (Diffraction order) = $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

$d =$ ระยะระหว่างพื้นผิวที่เกิดการสะท้อน

$i =$ มุมตกกระทบบ (Incident angle)

$r =$ มุมสะท้อน (Reflected angle)

จากสมการ $n\lambda = d(\sin i + \sin r)$ แสดงว่า มีความยาวคลื่นหลายค่าสำหรับมุมเลี้ยวเบน r แต่ละค่า เช่น ถ้าพบลำดับแรกของการเลี้ยวเบน [First-order line ($n = 1$)] ความยาวคลื่น 800 nm ที่มุม r จะพบลำดับที่สองของการเลี้ยวเบน [Second-order (400 nm)] และลำดับที่สามของการเลี้ยวเบน [Third-order (267 nm) lines] ที่มุมนี้ด้วย



รูปที่ 2.10 การพิจารณาลำดับการเลี้ยวเบนของแสงจากเกรตติงเพียงลำดับเดียว

โดยทั่วไปลำดับแรกของการเลี้ยวเบน จะมีความเข้มสูงสุด เราสามารถออกแบบให้เกรตติงให้ First-order line 90% ของแสงที่ตกกระทบบ (Incident power) และ Higher-order lines อาจถูกกำจัดโดยใช้ฟิลเตอร์ (Filters) เช่น แก้วซึ่งดูดกลืนรังสีที่มีความยาวคลื่นต่ำกว่า 350 นาโนเมตร (nm) ใช้กำจัด Higher-order radiation ที่ได้ออกมาพร้อมกับ First-order radiation ในช่วงที่ตามองเห็นได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อดีของโมนโครมาเตอร์ (Monochromator) ที่ใช้ Echellette grating เมื่อเทียบกับโมนโครมาเตอร์ที่ใช้ปริซึมคือการกระจายของรังสีบนระนาบโฟกัสเป็นกระจายเชิงเส้น (Linear dispersion) ทำให้การออกแบบโมนโครมาเตอร์ทำได้ง่าย

เกรตติงแบบเว้า (Concave Gratings)

เกรตติงแบบเว้าเป็นเกรตติงที่มีพื้นผิวเว้าโมนโครมาเตอร์ ที่ใช้เกรตติงแบบเว้าไม่ต้องมีการทำคอลลิเมเตอร์ (Collimating) และกระจกโฟกัส (Focusing mirrors) หรือเลนส์ เพราะเกรตติงที่มีพื้นผิวเว้าสามารถกระจายและโฟกัสรังสีบนช่องรับรับแสง (Exit slit) ได้ โมนโครมาเตอร์ที่ใช้เกรตติงแบบเว้าจึงมีข้อดีคือราคาถูกกว่า นอกจากนี้การลดจำนวน (Optical surfaces) จะทำให้พลังงานของรังสีที่ผ่านออกจากโมนโครมาเตอร์สูงขึ้น

เกรตติงแบบโฮโลกราฟิค (Holographic Gratings)

เกรตติงแบบโฮโลกราฟิคเป็นเกรตติงที่ผลิตจากเทคโนโลยีของเลเซอร์ (Laser technology) โดยใช้เทคนิคเชิงแสง (Optical technique) ไม่ใช่เทคนิคเชิงกล (Mechanical technique) ที่ใช้ผลิตเกรตติงทั่วไป ทำให้เกิดเกรตติงบนพื้นผิวเรียบหรือพื้นผิวเว้า

เครื่องมือวัดทางแสง (Optical instruments)

เครื่องมือวัดทางแสง สมัยใหม่ใช้เกรตติงแบบโฮโลกราฟิค (Holographic gratings) กันมากขึ้น เนื่องจากเกรตติงชนิดนี้มีความสมบูรณ์ของรูปร่างและขนาดของช่องมากกว่า ทำให้เกิดการกระเจิงแสง (Scattering) หรือเกิดภาพซ้อนน้อยลง

คิวเวทท์ (Cuvette)

คิวเวทท์ที่ใช้มีทั้งชนิดทรงกระบอก และชนิดสี่เหลี่ยม คิวเวทท์ชนิดสี่เหลี่ยมมีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า เนื่องจากลดการกระเจิงของแสงตกกระทบ (Light scattering) ได้มากกว่าคิวเวทท์ชนิดกลม คิวเวทท์ที่ทำจากควอตซ์สามารถใช้งานได้ในทุกช่วงความยาว คลื่นแสงตั้งแต่ 190 นาโนเมตรขึ้นไป จนถึง 2,700 นาโนเมตร คิวเวทท์ที่ทำจากแก้วชนิดบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) สามารถใช้งานได้เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นมากกว่า 320 นาโนเมตรขึ้นไป จนถึง 2,500 นาโนเมตร คิวเวทท์พลาสติกสามารถใช้งานได้ในช่วงคลื่น แต่ต้องระวังการมีสารขาวแสงที่เจือปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนในบางช่วงคลื่นของการวัดแสง

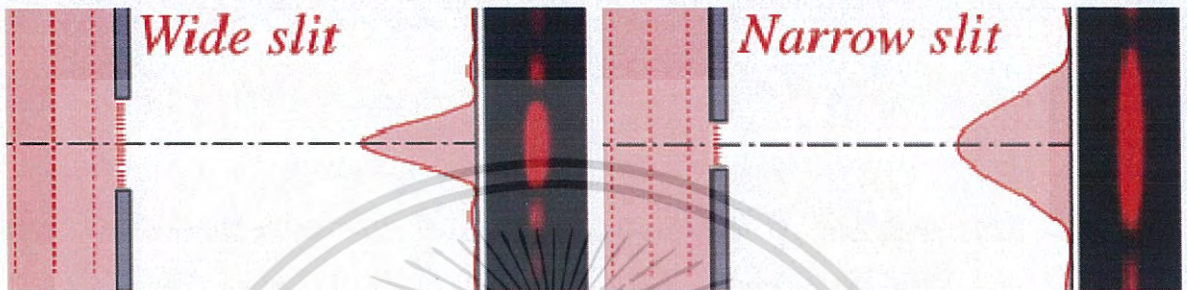
สารตัวอย่าง (Sample)

ตัวอย่างที่จะนำมาวิเคราะห์ด้วยเครื่องลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปี (Luminescence Spectroscopy) จะอยู่ในสถานะของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซก็ได้ โดยส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของสารละลาย บรรจุใน cuvette และนำเข้าสู่เครื่องวัดค่าการกระตุ้น (Excitation, ex) และการปลดปล่อย (Emission, em) ได้เลย

2.2.3 วัสดุอุปกรณ์เพิ่มเติม ที่ใช้ในการสร้าง

สลิตเดี่ยว (Single slit)

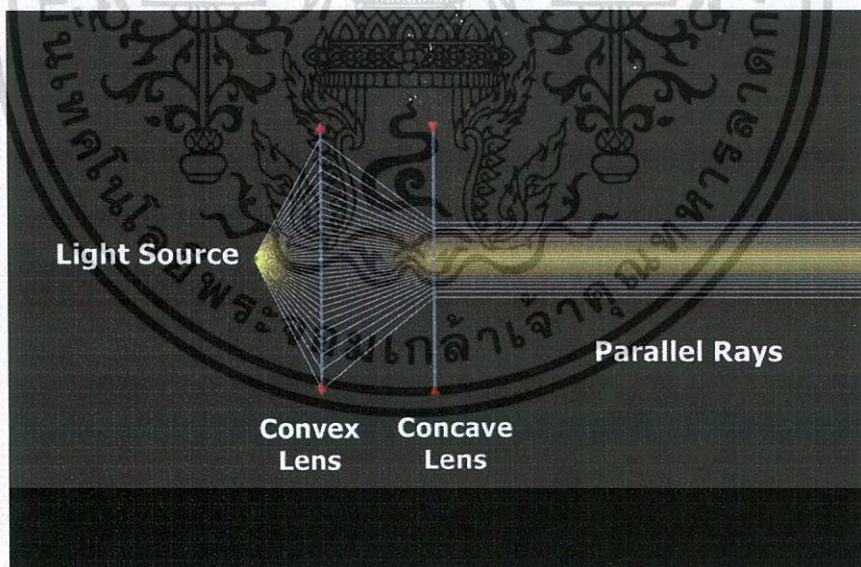
การเลี้ยวเบนของแสงเกิดขึ้นได้ เมื่อแสงจากแหล่งกำเนิดแสงอาพันธ์เดินทางผ่านช่องแคบที่มีขนาดเล็กกว่าความยาวคลื่นทุกๆ จุดบนช่องเดี่ยวจะทำหน้าที่เป็นแหล่งกำเนิดแสงใหม่ตามหลักของฮอยเกน แสงจากแหล่งกำเนิดแสงใหม่จะเกิดการซ้อนทับกันบนฉากทำให้เราเห็นเป็นแถบมืดและแถบสว่าง ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แสดงการเลี้ยวเบนผ่านช่องเดี่ยวที่มีความกว้างต่างกัน

คอลลิเมเตอร์ (Collimator)

คอลลิเมเตอร์ (collimator) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการรวมแสงที่เข้ามาให้ออกไปเป็นแสงขนาน



รูปที่ 2.12 ภาพแสดงการทำงานของคอลลิเมเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระจกเงาระนาบ

การเกิดภาพบนกระจกเงาระนาบ

ภาพที่เกิดจากกระจกเงาระนาบบานเดียว

เมื่อวางวัตถุไว้หน้ากระจกเงาระนาบ เราจะมองเห็นวัตถุเพราะมีแสงจากวัตถุมาเข้าตาเรา ส่วนการมองเห็นภาพของวัตถุนั้น เพราะแสงจากวัตถุไปตกกระทบพื้นผิวกระจกเงาระนาบแล้วสะท้อนมาเข้าตาเราอีกทีหนึ่ง ภาพที่เกิดขึ้นเรียกว่า *ภาพเสมือน* จะปรากฏให้เห็นข้างหลังกระจก และภาพเสมือนไม่สามารถเกิดบนฉากได้ ถ้าเรามองที่ด้านหลังของกระจกเงาระนาบเราจะไม่เห็นภาพ เนื่องจากภาพเสมือนนี้เพียงปรากฏให้เห็น หลังกระจก (เพราะรังสีของแสงสะท้อนเข้าตา เหมือนกับรังสีนี้มาจากข้างหลังกระจก)

ภาพที่เกิดจากกระจกเงาระนาบ 2 บาน วางทำมุมกัน

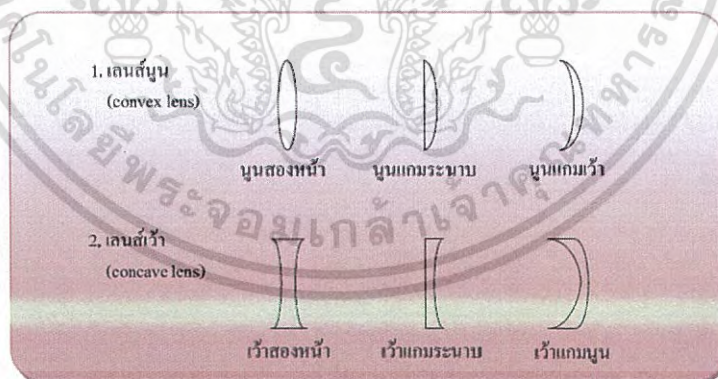
เงาระนาบสองบานวางทำมุมต่อกันถ้านำวัตถุไปวางระหว่างกระจก ภาพที่เกิดจากกระจกเงาระนาบบานหนึ่งถ้าอยู่หน้าแนวกระจกเงาระนาบบานหนึ่ง ภาพนั้นจะทำหน้าที่เป็นวัตถุ ทำให้เกิดการสะท้อนแสงครั้งที่ 2 เกิดภาพที่สองขึ้น โดยระยะภาพก็ยังคงเท่ากับระยะวัตถุ และถ้าภาพทั้งสองยังอยู่หน้าแนวกระจกเงาระนาบบานแรกอีก ภาพนั้นจะทำหน้าที่เป็นวัตถุในการสะท้อนต่อไปอีก กลับไปกลับมาระหว่างกระจกสองบานจนกว่าภาพที่อยู่หลังแนวกระจก จึงจะไม่มี การสะท้อนทำให้เกิดภาพอีก

สูตรคำนวณ $n = (360/q) - 1$ (สมการที่ 2.3)

เมื่อ n คือ จำนวนภาพที่เกิดขึ้น

q คือ มุมที่กระจกเงาระนาบทำมุมต่อกัน (ถ้าเหลือเศษให้ปัดเป็นหนึ่งเสมอ)

เลนส์ (Lens)



รูปที่ 2.13 แสดงเลนส์นูนและเลนส์เว้าชนิดต่างๆ

เลนส์ คือ ตัวกลางโปร่งแสงที่มีผิวหน้าเป็นผิวโค้ง ผิวโค้งของเลนส์อาจจะมรูปร่างเป็นผิวโค้งทรงกลม ทรงกระบอก หรือ พาราโบลาก็ได้ เลนส์แบบง่ายสุดเป็นเลนส์ที่มีผิวโค้งทรงกลม โดยส่วนหนาสุดของเลนส์จะมีค่าน้อยเมื่อเทียบกับรัศมีความโค้ง เลนส์แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ เลนส์นูน (Convex Lens) กับเลนส์เว้า (Concave Lens)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลนส์นูนหรือเลนส์รวมแสง (Convex or Converging Lens) คือเลนส์ที่มีความหนาตรงจุดศูนย์กลางมากกว่าที่ขอบและจะทำหน้าที่รวมแสงขนานไปตัดรวมกันที่จุดโฟกัสจริง (Real Focus)

เลนส์เว้าหรือเลนส์กระจายแสง (Concave or Diverging Lens) คือเลนส์ที่มีความหนาตรงจุดกลางน้อยกว่าที่ขอบและจะทำหน้าที่กระจายแสงขนานจากจุดโฟกัส (Virtual Focus)

สมการสำหรับเลนส์ทั่วไป (Lensmaker's equation)

สมการทั่วไปของเลนส์หนา

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} + \frac{(n-1)d}{nR_1R_2} \right] \quad (\text{สมการที่ 2.4})$$

สมการทั่วไปของเลนส์บาง (เนื่องจาก $d \approx 0$)

$$\frac{1}{f} \approx (n - 1) \left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right] \quad (\text{สมการที่ 2.5})$$

- เมื่อ
- f คือ ความยาวโฟกัสของเลนส์
 - n คือ ดัชนีหักเหของวัตถุที่ใช้ทำเลนส์
 - d คือ ความหนาของเลนส์
 - R_1 คือ รัศมีความโค้งของเลนส์ด้านที่แสงเข้ามาตกกระทบครั้งแรก (ด้านแสงเข้า)
 - R_2 คือ รัศมีความโค้งของเลนส์ด้านที่แสงเข้ามาตกกระทบครั้งที่สอง (ด้านแสงออก)

การหาดำแหน่งภาพ

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} \quad (\text{สมการที่ 2.6})$$

- โดยที่
- f คือ ความยาวโฟกัส
 - S คือ ระยะวัตถุ
 - S' คือ ระยะภาพ
 - f เป็นบวก เมื่อเป็นเลนส์นูน
 - f เป็นลบเมื่อเป็นเลนส์เว้า
 - s เป็นบวก สำหรับวัตถุจริง (ซึ่งอยู่หน้าเลนส์)
 - s เป็นลบ สำหรับวัตถุเสมือน (ซึ่งอยู่หลังเลนส์)
 - s' เป็นลบ สำหรับวัตถุจริง (ซึ่งอยู่หน้าเลนส์)
 - s' เป็นบวก สำหรับวัตถุเสมือน (ซึ่งอยู่หลังเลนส์)

กำลังขยาย (Magnification)

กำลังขยายของภาพที่เกิดโดยกระจก แทนด้วย M สามารถคำนวณได้โดย กำลังขยายมีค่าเท่ากับอัตราส่วนระหว่างระยะภาพ (S') กับระยะวัตถุ (S) หรืออัตราส่วน ระหว่างขนาดภาพ (I) และ ขนาดวัตถุ (O) คือ

$$M = \frac{I}{O} = \frac{s'}{s} \quad (\text{สมการที่ 2.7})$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetectors)

ในการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแสง เริ่มต้นจากการค้นพบทฤษฎีโฟโตอิเล็กทริก เอ็ฟเฟ็ค (Photoelectric effect) ที่กล่าวได้เบื้องต้นคือ เมื่อโลหะได้รับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับระดับพลังงานของโลหะนั้นๆ จะทำให้อิเล็กตรอนของโลหะนั้นอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จากทฤษฎีนี้ ทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแสง เช่น โฟโตไดโอดสุญญากาศ (Vacuum photodiode) และหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (Photo multiplier tube) นอกจากนี้ การศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำยังทำให้เกิดการพัฒนาของอุปกรณ์ตรวจจับแสงขึ้นอีก เช่น P-N junction diode, PIN diode และ Avalanche photodiode อีกด้วย

1. โฟโตไดโอด (Photodiode)

ตั้งแต่ที่เราค้นพบว่าหน่วยที่เล็กที่สุดของแสงและไฟฟ้า คือ โฟตอนและอิเล็กตรอน ทำให้เกิดการพัฒนาระบบการตรวจจับทางแสง การที่โฟตอนถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในปรากฏการณ์ ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เซนเซอร์ (Optoelectronic sensor) ทำให้ได้ผลเป็นกระแสไฟฟ้า เมื่อโฟตอนถ่ายเทพลังงานให้กับสารกึ่งตัวนำ ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นและเพิ่มระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ (Valence band) ขึ้นไปยังแถบนำ (Conduction band) และสามารถแสดงข้อมูลในรูปแบบสัญญาณไฟฟ้าจากการต่อวงจรได้

กระบวนการหลักที่ใช้ในการอธิบายปรากฏการณ์ของสารกึ่งตัวนำมี 3 กระบวนการ คือ โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic) โฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive) และ โฟโตอิเล็กทริก เอ็ฟเฟ็ค (Photoelectric effect) ปรากฏการณ์ โฟโตโวลตาอิกภายในอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จะประกอบไปด้วย รอยต่อของสารกึ่งตัวนำชนิด n และชนิด p การดูดซึมพลังงานโฟตอนทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นไปยัง แถบคอนดักชันแล้วละทิ้งโฮลไว้ที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งเรียกว่า กระบวนการสร้างคู่อิเล็กตรอนโฮล (Generation) ทำให้อิเล็กตรอนถูกกระตุ้นมากขึ้นเกิดการแพร่และเกิดกระแสอิเล็กตรอน ซึ่งเป็นผลมาจากพลังงานศักย์บริเวณรอยต่อดังกล่าว และโฮลจะตรงข้ามกัน จากกระบวนการเหล่านี้ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าสุ่งจร เราเรียกอุปกรณ์ตรวจจับที่ใช้หลักการนี้ว่า โฟโตไดโอด (Photodiode, PD)

จากทฤษฎีดังกล่าว PD จะสามารถตรวจสอบโฟตอนได้ก็ต่อเมื่อพลังงานของโฟตอนสูงกว่า แถบพลังงาน (Band gap) ของสารที่ใช้ ซึ่งแถบพลังงานที่เวลานี้ก็คือพลังงานศักย์ระหว่างแถบคอนดักชัน และ แถบวาเลนซ์ความสัมพันธ์ของพลังงานของโฟตอน (E มีหน่วยเป็น eV) ความยาวคลื่น λ มีหน่วยเป็นเมตร)

$$E = \frac{hc}{\lambda} [J] = \frac{hc}{\lambda e} [eV] \quad (\text{สมการที่ 2.8})$$

เมื่อ h คือ Planck's constant (6.6×10^{-34} Js)

c คือ ความเร็วของแสง (3×10^8 m/s)

e คือประจุของอิเล็กตรอน (1.6×10^{-19} C)

ในส่วนของซิลิกอน (Si) ซึ่งเป็นสารที่ใช้มากใน PD จะสามารถตรวจสอบโฟตอนที่มีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1100nm ได้ เนื่องจากแถบพลังงาน (Bandgap) ของซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 1.1 eV ส่วนอินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) หรืออินเดียมแอนติโมนิไนด์ (InSb) จะใช้กับโฟตอนที่มีความยาวคลื่นมากกว่า ซึ่งอยู่ในช่วงของอินฟราเรด เพราะมีแถบพลังงานน้อยกว่า

2. มัลติพิกเซลเซนเซอร์ (Multi-Pixel Sensors)

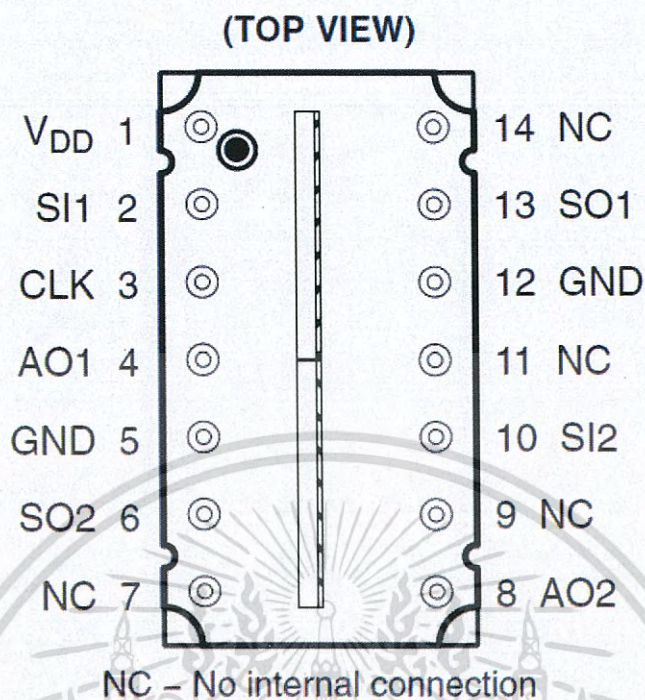
คือเซนเซอร์สารกึ่งตัวนำหลายๆ เซ็นเซอร์ ซึ่งเราเรียกเซ็นเซอร์หนึ่งตัวว่าพิกเซล ซึ่งสร้างขึ้นด้วยวิธีการเดียวกับการสร้างสารกึ่งตัวนำ

ลิเนียร์เซนเซอร์ (Linear sensor) หนึ่งตัว สามารถมีจำนวนพิกเซลตั้งแต่ 2-256 พิกเซลขนานกัน ซึ่งวางตัวเรียงกันเป็นเส้นตรง

เซนเซอร์สองมิติ (Two-dimensional sensor) มีจำนวนพิกเซลตั้งแต่ 2x2 พิกเซล ซึ่งวางตัวเป็นสองมิติ

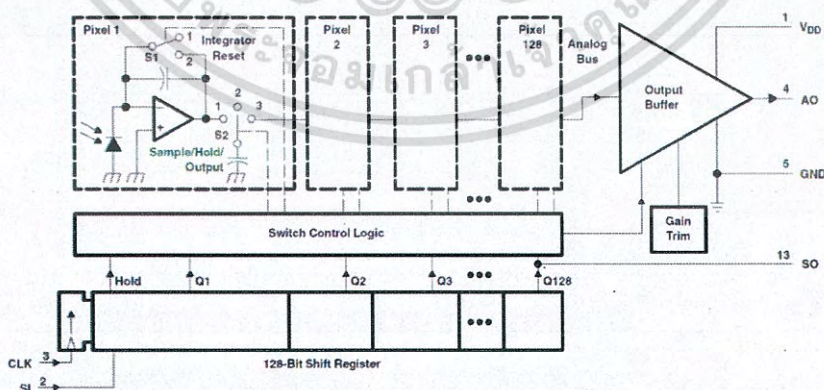
ข้อดีอีกอย่างหนึ่งของ มัลติพิกเซลเซนเซอร์ คือ มีความเร็วสูงในการตรวจจับค่า เนื่องจากสัญญาณของแต่ละพิกเซลเป็นวงจรถาวร อย่างไรก็ตาม การอ่านวงจรถาวรบางครั้งจะเกิดการผิดพลาด เนื่องจากวงจรถาวรที่ใช้ด้วยกันจะต้องมีความซับซ้อนมากตามจำนวนของพิกเซล เพราะฉะนั้นถ้าเกิน 100 พิกเซลขึ้นไปเราจะใช้สารกึ่งตัวนำโลหะออกไซด์ (Metal-oxide semiconductor, C-MOS) ในการอ่านค่าข้อมูลของแต่ละพิกเซล ทำให้ความเร็วของการอ่านค่าในแต่ละพิกเซลนั้นมีค่าจำกัด ซึ่งเซ็นเซอร์แบบ C-MOS นี้ถูกใช้ในปัจจุบันอย่างกว้างขวาง

3. TSL 1402R Linear Sensor



รูปที่ 2.14 แสดงข้อมูลขาของ TSL 1402R Linear Sensor

คือลิเนียร์เซนเซอร์ที่ประกอบด้วยเซนเซอร์ขนาด 128 พิกเซล 2 ตัวต่อกัน ทำให้มีทั้งหมด 256 พิกเซล โดยแต่ละพิกเซลจะมีขนาด 13.5 ไมโครเมตร ซึ่งจะถูกต้องเข้ากับวงจรขยายและส่งมายังเอาต์พุตของเซนเซอร์ การทำงานเบื้องต้นจะทำงานเมื่อมีสัญญาณเข้าที่ขา Serial-input pulse (SI) และทำงานตามจังหวะของสัญญาณนาฬิกาเท่านั้น



รูปที่ 2.15 Functional Block Diagram ของ TSL 1402R Linear Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณัติใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการทำงานของอุปกรณ์(รูปแบบการทำงานแต่ละตัว)แต่พิทเซลล์ในเซ็นเซอร์นั้น จะสร้างกระแสไฟฟ้า (Photocurrent) ซึ่งจะเข้าสู่วงจรขยายของแต่ละพิทเซลล์พร้อมๆกัน

เวลาของการทำงานแต่ละครั้งทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุที่ต่ออยู่จะมีผลกับสัญญาณที่ขา analog output (AO) ดังนั้น การวัดค่าความเข้มแสงโดยใช้อุปกรณ์นี้ เราจำเป็นต้องคำนึงถึงคาบเวลาของการทำงาน

กระบวนการส่งข้อมูลและรีเซ็ตข้อมูลของแต่ละพิทเซลล์นั้น จะถูกควบคุมโดย 256-bit shift register และวงจร reset logic วงจรจะเริ่มทำงานมีสัญญาณลอจิกหนึ่งที่ขา serial input 1 (SI1) โดยเวลาที่ใช้จะเท่ากับสัญญาณนาฬิกา (CLK) หลังจากทีลีนีร์เซนเซอร์ตัวแรกทำงานเสร็จ จะส่งสัญญาณให้ตัวที่สองทำงานในลักษณะเดียวกัน ทำให้มีข้อมูลของค่าความเข้มแสงทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ในรูปความจุไฟฟ้า และ shift register จะทำการอ่านค่าประจุไฟฟ้าที่ถูกเก็บไว้เป็นลำดับตั้งแต่พิทเซลล์แรกถึงพิทเซลล์สุดท้าย ในสัญญาณนาฬิกาที่ 128 และในสัญญาณนาฬิกาที่ 129 ทุกพิทเซลล์ในลีนีร์เซนเซอร์ตัวแรกจะถูกรีเซ็ตค่า และจะเป็นการเริ่มอ่านค่า ตัวที่สองซึ่งจะทำงานคล้ายกันกับตัวที่หนึ่ง จะมีการส่งข้อมูลออกที่ขา analog output 2 (AO2) และสัญญาณนาฬิกาที่ 256 ลีนีร์เซนเซอร์ตัวที่สองจะถูกรีเซ็ตค่าเช่นกัน ทำให้ข้อมูลจะถูกส่งออกครบทั้งหมดในเวลา 257 รอบ สัญญาณนาฬิกา รวมกับเวลาอีกเล็กน้อยที่ใช้ในการส่งข้อมูลผ่านสายส่ง

สัญญาณไฟฟ้าออกจากขา AO จะผ่านวงจรขยายเบื้องต้นมาแล้วจึงไม่จำเป็นต้องต่อตัวต้านทานช่วยภายนอก ซึ่งจะมีลักษณะของสัญญาณในรูปแบบของคลื่นความต่างศักย์ที่แกว่งตามข้อมูลที่ได้จากความเข้มแสงที่ตกกระทบบริเวณของแต่ละพิทเซลล์ โดยใช้แหล่งจ่ายไฟ (V_{DD}) ขนาด 5V ค่าความต่างศักย์ที่วัดได้จากขา analog output จะแสดงได้ดังสมการนี้

$$V_{out} = V_{drk} + (R_e)(E_e)(t_{int}) \quad (\text{สมการที่ 2.9})$$

เมื่อ V_{out} คือ ค่าแรงดันที่ analog output

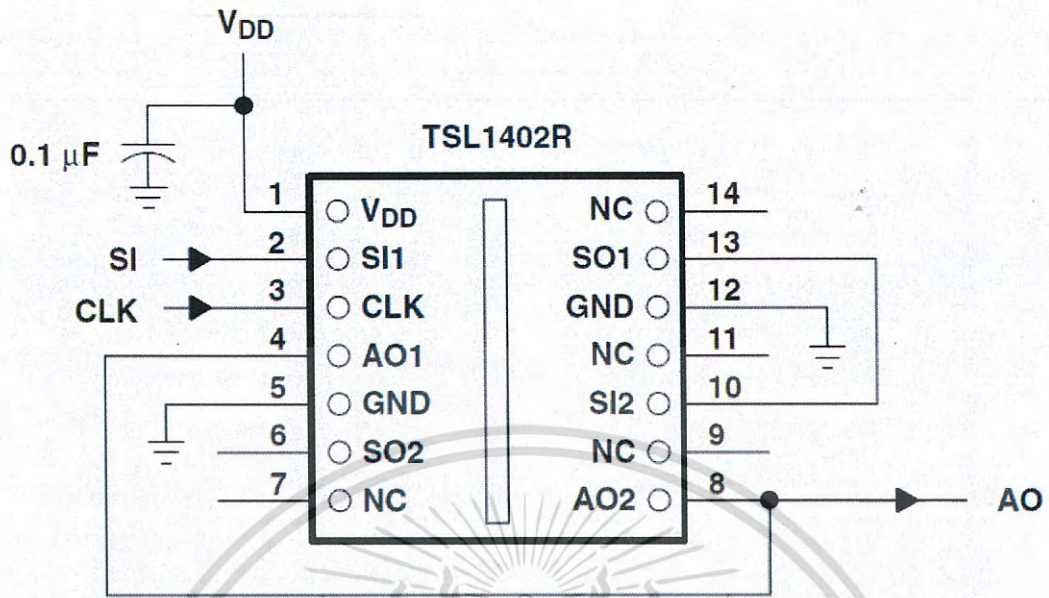
V_{drk} คือ ค่าแรงดันที่ analog output เมื่อไม่มีแสง

R_e คือ ค่าคงที่ที่แสดงการตอบสนองต่อแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆมีหน่วยเป็น $V/(\mu W/cm^2)$

E_e คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบแต่ละพิทเซลล์ มีหน่วยเป็น $\mu W/cm^2$

t_{int} คือ หนึ่งคาบเวลาของสัญญาณนาฬิกาที่ใช้ มีหน่วยเป็นวินาที

การทำงานที่กล่าวมาทั้งหมด จะมีการต่อวงจรดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 การต่อวงจรการทำงานของเซนเซอร์ TSL 1402R Linear Sensor (รูปแบบการทำงานที่ละตัว)

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์อาดูยโน (Arduino)

โดยนิยามของอาดูยโนแล้วอาดูยโนเป็นโอเพนซอร์สแพลตฟอร์มอิเล็กทรอนิกส์ที่รวมเอาฮาร์ดแวร์เข้าด้วยกัน เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน และถูกออกแบบมาสำหรับทุกคน เพื่อใช้ทำโครงการทางด้านอินเตอร์แอ็กทีฟ (Interactive Project) โดยจะมีสองส่วนคือส่วนโปรแกรม (Arduino software) และบอร์ดคอนโทรล (Arduino board)

2.3.1 โปรแกรม Arduino Software

อาดูยโนใช้เครื่องมือในการพัฒนาโปรแกรมที่เรียกว่า “Arduino Software” หรือ “Arduino IDE” โดยใช้ภาษา C/C++ เป็นหลักในการเขียนโค้ดโปรแกรมกับตัวไมโครคอนโทรลเลอร์

โปรแกรมที่ใช้งานมีชื่อเป็นทางการว่า Arduino IDE (IDE นั้นย่อมาจาก Integrated Development Environment) ซึ่งใช้งานได้ทั้งบนระบบปฏิบัติการ Window (XP Vista 7 8) ทั้ง 32 และ 64 บิต, Mac OS X และ Linux ก็ใช้ได้ เรียกได้ว่าใช้งานได้กับทุกระบบปฏิบัติการ แลมนเป็นอิสระจากการทำงานของ OS ทุกชนิด ทำให้ไม่ต้องมีการ Install โปรแกรมให้วุ่นวายแบบโปรแกรมอื่นเพราะแค่ Download มาจากนั้น Unzip ไว้ใน Directory

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 โปรแกรม Arduino IDE

ในการใช้งานโปรแกรม Arduino IDE จะกำหนดหน้าต่างไฟล์สำหรับให้เขียนโค้ดโปรแกรมได้ทันที เรียกว่า สเก็ต (Sketch) เนื่องจากมีชื่อไฟล์ตั้งต้นด้วยข้อความว่า “sketch” ตามด้วยเดือน วัน และตัวอักษร ดังนั้นไฟล์โค้ดโปรแกรมอาดูอินจึงนิยมเรียกกันว่า Sketch

โดยในการเขียน Sketch จะมีขั้นตอนคร่าวๆดังนี้

1. กำหนดบอร์ดและพอร์ตอนุกรม: ก่อนที่จะเริ่มต้นเขียนโค้ดโปรแกรม ผู้ใช้งานต้องกำหนดบอร์ด (Board) ใช้งานและพอร์ตอนุกรม (Serial Port) ที่เชื่อมต่ออยู่บนบอร์ดก่อนเป็นลำดับแรก เพื่อให้ซอฟต์แวร์อาดูอินรับรู้กำลังทำงานกับบอร์ดอาดูอินรุ่นไหน และติดต่อกับพอร์ตอนุกรมที่เท่าไร โดยการกำหนดบอร์ดและพอร์ตอนุกรมได้ที่เมนู Tools เมื่อติดตั้งบอร์ดเข้ากับเครื่องคอมพิวเตอร์

2. โครงสร้างภาษา C/C++ สำหรับ Arduino: การเขียนโปรแกรมควบคุมอาดูอินได้สร้างซอฟต์แวร์เพื่อให้การเขียนโค้ดโปรแกรมเป็นไปในแนวทางเดียวกันให้เป็นมาตรฐาน จึงได้กำหนดฟังก์ชันเริ่มต้นสำหรับการเขียนโค้ดโปรแกรม หรือโครงสร้าง (Structure) ของภาษาอาดูอินด้วยฟังก์ชันเริ่มต้น `setup()` และ `loop()` ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

- ฟังก์ชัน `setup()` : ฟังก์ชัน `setup()` จะถูกเรียกใช้งานเมื่อสเก็ตเริ่มต้นทำงาน ฟังก์ชันนี้ใช้ติดตั้งค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปร กำหนดโหมดของพอร์ตใช้งาน ติดตั้งหรือเริ่มต้นการใช้ไลบรารี เป็นต้น สิ่งสำคัญคือ ฟังก์ชันนี้จะถูกเรียกใช้งานเพียงครั้งแรกครั้งเดียว จนกว่าจะมีการรีเซต หรือเริ่มจ่ายไฟเลี้ยงให้กับบอร์ดอาดูอิน

- ฟังก์ชัน `loop()` : หลังจากที่ฟังก์ชัน `setup()` ทำงานเสร็จสิ้นแล้ว ฟังก์ชัน `loop()` จะเริ่มต้นทำงานต่อ และจะวนทำงานเป็นลูปลดเวลาของการทำงานของโปรแกรม

3. ตรวจสอบโค้ดโปรแกรม: หลังจากที่ได้เขียนโค้ดเสร็จสิ้นแล้ว ก่อนที่จะโปรแกรมโค้ดลงบอร์ด เราจะต้องตรวจสอบโค้ดโปรแกรมก่อนว่า มีข้อผิดพลาดทางด้านไวยากรณ์ของภาษาโปรแกรมหรือไม่ โดยคลิกที่เมนูคำสั่ง Sketch ->Verify/Compile

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าไม่พบข้อผิดพลาดที่หน้าต่างด้านล่างของโปรแกรม Arduino IDE จะแสดงรายละเอียดขนาดของโค้ดโปรแกรมใช้งาน

ถ้าพบข้อผิดพลาดที่หน้าต่างด้านล่างของโปรแกรม Arduino IDE จะบอกตำแหน่งที่โปรแกรมพบข้อผิดพลาดที่ใกล้ที่สุดที่โปรแกรมวิเคราะห์ได้

4. อัปโหลดโปรแกรมไปที่บอร์ด: เมื่อโปรแกรมถูกต้องแล้ว จึงทำการอัปโหลดโปรแกรมโดยคลิกที่เมนูคำสั่ง File->Upload ถ้าไม่พบข้อผิดพลาดในการอัปโหลดโปรแกรม ที่หน้าต่างเอาต์พุตของโปรแกรม Arduino IDE จะแสดงรายละเอียด “Done uploading”

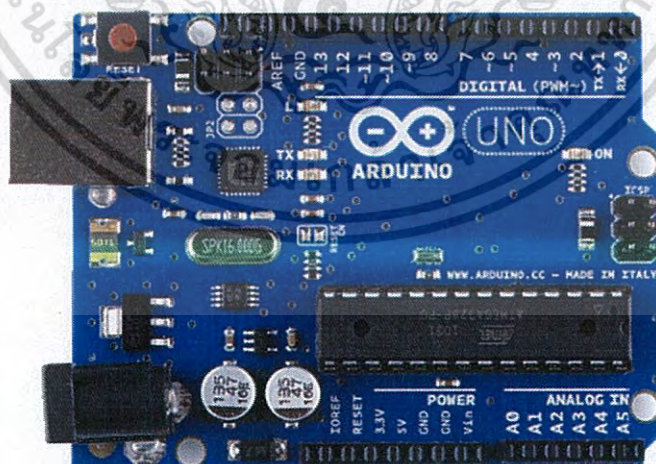
5. คู่มือการทำงานของโปรแกรมอาดูอินไม่มีอุปกรณ์แสดงผลเอาต์พุตมาตรฐานเช่นเดียวกับคอมพิวเตอร์ Arduino IDE ได้เตรียมเครื่องมือในการรับข้อมูลทางพอร์ตอนุกรมไว้พร้อมให้ใช้งานแล้วที่เรียกว่า “Serial Monitor” คลิกที่เมนูคำสั่ง Tools->Serial Monitor

เมื่อเปิดใช้งานหน้าต่าง Serial Monitor จะได้หน้าต่าง Serial Monitor ที่แสดงต่อเนื่องไม่หยุด จะสังเกตเห็นได้ว่า Serial Monitor จะกำหนดพอร์ตอนุกรมหมายเลขพอร์ตเดียวกับที่ได้กำหนดไว้แล้วตอนเลือก Serial Port

แต่สิ่งที่เราต้องกำหนดให้ตรงคือ อัตราการรับข้อมูล หรือความเร็วในการรับส่งข้อมูลผ่านทางพอร์ตอนุกรมที่เรียกว่า เบาท์เรท (Baud Rate) จากตัวอย่างนี้ โค้ดโปรแกรมกำหนดไว้ที่ Serial.begin (9600) จึงต้องกำหนดที่ Serial Monitor ให้ตรงกับค่านี้ด้วย

ชุดคำสั่งที่ใช้งานในฟังก์ชัน loop() จะถูกเรียกใช้งานตลอดเวลาของการทำงานของโปรแกรม หากต้องการให้โปรแกรมหยุดทำงาน หรือทำงานหลังจากกดยุติ ให้เพิ่มคำสั่ง while

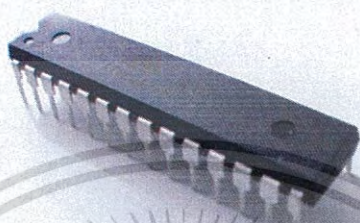
2.3.2 วงจร Arduino Board



รูปที่ 2.18 บอร์ด Arduino Uno R3

คุณสมบัติของบอร์ด Arduino Uno R3 มีรายละเอียดของบอร์ดดังนี้

Arduino Uno R3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์แบบโอเพนซอร์ส ออกแบบมาให้ใช้งานได้ง่าย ใช้ชิพ ATmega328 ดังภาพ 11 รั้นที่ความถี่ 16 MHz หน่วยความจำโปรแกรมแบบ FLASH 32 KB หน่วยความจำข้อมูล SRAM 2 KB บอร์ดใช้ไฟเลี้ยง 7 ถึง 12 V มีระดับแรงดันไฟฟ้าในการทำงานและขาสัญญาณอยู่ที่ 5 V (TTL) มี Digital Input / Output 14 ขา (เป็น PWM ได้ 6 ขา) มี Analog Input 6 ขา Serial UART 1 ชุด I2C 1 ชุด SPI 1 ชุด เขียนโปรแกรมบนซอฟต์แวร์ Arduino IDE และโปรแกรมผ่านพอร์ต USB



รูปที่ 2.19 ภาพชิพรุ่น ATmega328P

2.4 โปรแกรมไพโรเซสซิง (Processing)



รูปที่ 2.20 โปรแกรม Processing

คือภาษาโปรแกรมภาษาหนึ่งที่เอาไว้ใช้กับงานประเภทมัลติมีเดีย ถูกพัฒนาขึ้นมาเมื่อปี ค .ศ. 2008 (เป็นลิขสิทธิ์ของ MIT) โดยเป็นภาษาที่ถูกออกแบบขึ้นมาเพื่อเขียนภาพกราฟิก สื่อเชิงโต้ตอบ (Interactive) สื่อเคลื่อนไหว และวิเคราะห์ โดยสามารถแสดงผลได้บนเว็บเบราว์เซอร์สมัยใหม่ทั่วไปได้ เช่น Firefox, Opera, IE, Safari และ Chrome โดยไม่ต้องพึ่ง Java applet และ Flash plugin แต่อย่างใด ซึ่งพื้นฐานของภาษานี้ถูกสร้างมาจาก ภาษา java และแนะนำสำหรับผู้ที่มีพื้นฐานใหม่สามารถฝึกจากภาษานี้ เพราะไพโรเซสซิงเป็นภาษาแบบ visual context ที่เกี่ยวกับการเห็นภาพ ทำให้ผู้เรียนเข้าใจได้ง่ายขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในการสร้างชุดศึกษาระบบโฟโตนิกส์สเปกโทรสโกปีมีรายละเอียดของวัสดุ อุปกรณ์ และการดำเนินงานวิจัยดังต่อไปนี้

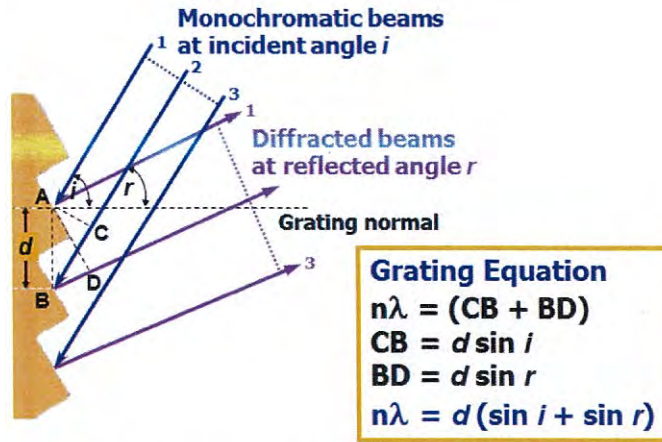
3.1 วัสดุและอุปกรณ์

- | | |
|---|-----------------------------------|
| 1. ชุดทดลองสเปกตรัมของแสง | 14. Angle Clamp |
| 2. Mercury lamp | 15. Mirror |
| 3. Grating | 16. He: Ne LASER |
| 4. Performance Breadboard
1200 x 600 x 60 mm | 17. Green Diode LASER |
| 5. Adjustable Mechanical Slits | 18. Blue Diode LASER |
| 6. Bi-Convex Lens, $f = 50.0$ mm | 19. White light Super Bright LEDs |
| 7. Bi-Concave Lens, $f = -50.0$ mm | 20. Sodium lamp |
| 8. Plano-Convex Lens, $f = 25.0$ mm | 21. Cuvette |
| 9. Lens Tubes | 22. Sample (DCM, Rhodamine B) |
| 10. High-Precision Rotation Mount | 23. Linear Array Sensor TSL1402R |
| 11. Kinematic Mirror Mount | 24. Arduino UNO R3 |
| 12. Extension Tube Slip Ring | 25. Computer |
| 13. Optical Post | 26. Arduino 1.0.6 Program |
| | 27. Processing 2.2.1 Program |

3.2 วิธีการศึกษา/วิธีการทดลอง

3.2.1 การทดลองเพื่อหาข้อมูลจำเพาะของเกรตติง

เกรตติงที่ใช้ในระบบสเปกโทรสโกปีเป็นเกรตติงแบบสะท้อนซึ่งเป็นเกรตติงแบบ Echellette Grating จากเครื่อง UV/VIS Spectrophotometer-Hitachi Perkin Elmer Coleman 139 แต่เนื่องจากเราไม่ทราบข้อมูลจำเพาะของเกรตติงที่ใช้ในเครื่องสเปกโทรสโกปีนี้ จึงทำการทดลองเพื่อหาจำนวนช่องและระยะห่างระหว่างช่องของเกรตติงก่อน เพื่อใช้ในการจัดระบบแสงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 3.1 แสดงการทำงานของเกรตติงแบบสะท้อนแบบ Echelle Grating

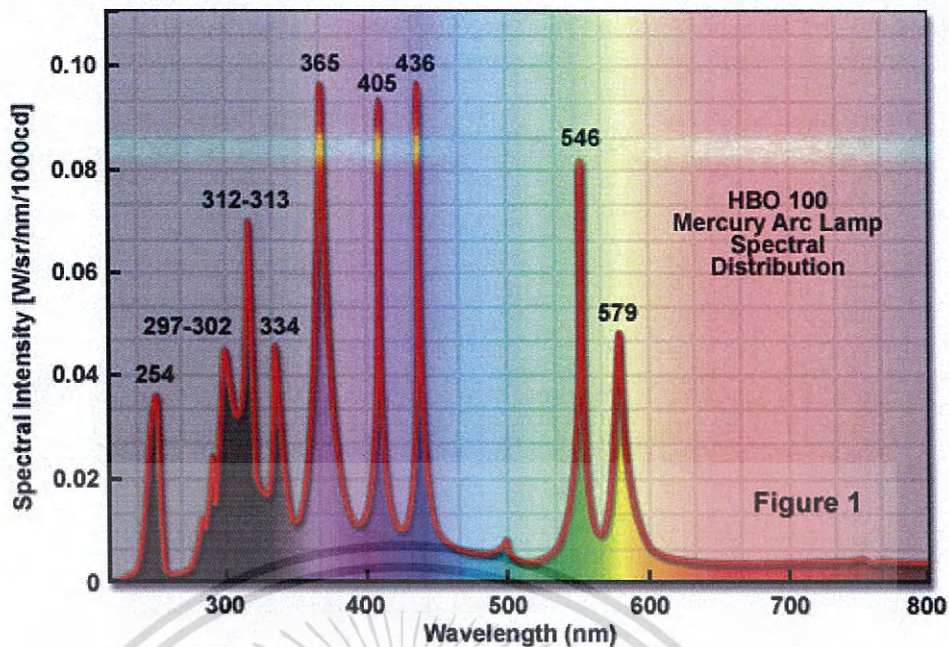
เมื่อลำแสงขนาน ตกกระทบเกรตติงที่มุมตกกระทบ (i) กับเส้นปกติของเกรตติงจะเกิดการเลี้ยวเบนของแสงเนื่องจากเกรตติงสะท้อนแสงและเกิดการแทรกแบบสอดเสริม



รูปที่ 3.2 แสดงการจัดวางอุปกรณ์การทดลองเพื่อหาสเปกของเกรตติง

1. จัดวางอุปกรณ์การทดลองตามรูปที่ 3.2 และของแสงที่ผ่านคอลลิเมเตอร์ตกกระทบกับเส้นปกติของผิวหน้าเกรตติง เป็นมุม i
2. ใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดแสงเมอร์คิวรี (Mercury lamp) ซึ่งมีสเปกตรัมดังรูปที่ 3.3
3. เลื่อนลำกล้องเพื่อหาเส้นสเปกตรัมของหลอดแสงเมอร์คิวรี โดยให้เส้นสเปกตรัมที่ชัดที่สุดปรากฏอยู่ตรงกลางกล้อง วัดมุมที่สเปกตรัมแต่ละสีสะท้อนจากเกรตติงเป็นมุมสะท้อน (r) บันทึกผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 สเปกตรัมของหลอดแสงเมอร์คิวรี

(<http://zeiss-campus.magnet.fsu.edu/articles/lightsources/mercuryarc.html>)

4. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 3 (2 ครั้ง)
5. นำค่ามุมที่ได้ไปคำนวณหาข้อมูลจำเพาะของเกรตติงได้จากสมการ

$$n\lambda = d(\sin i + \sin r) \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

เมื่อ n = อันดับการเลี้ยวเบน (Diffraction order) = $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

λ = ความยาวคลื่นในสเปกตรัมของหลอดแสงเมอร์คิวรี

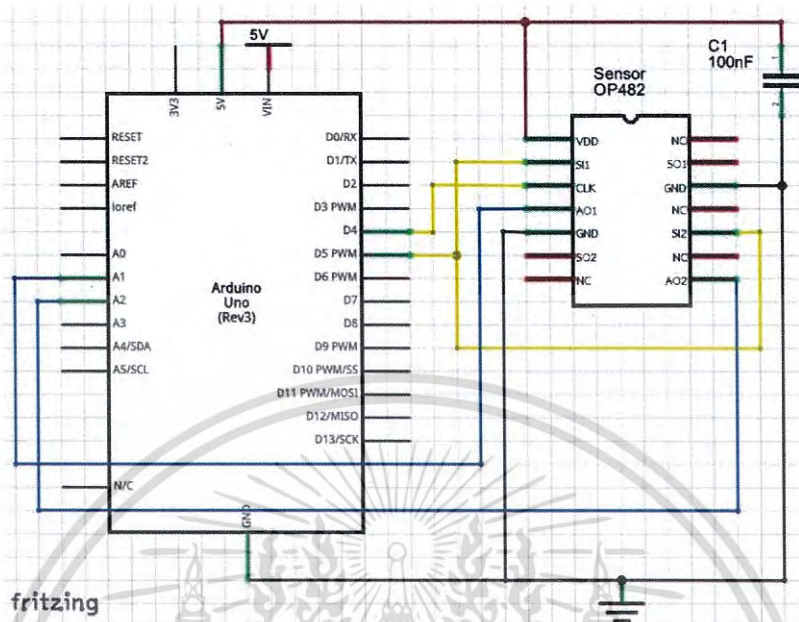
d = ระยะระหว่างพื้นผิวที่เกิดการสะท้อน

i = มุมตกกระทบ (Incident angle)

r = มุมสะท้อน (Reflected angle)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 การออกแบบวงจรควบคุมและวิเคราะห์สัญญาณจากเซนเซอร์ (Linear Pixel Analyzer, LPA)



รูปที่ 3.4 วงจร Linear Pixel Analyzer, LPA

1. ออกแบบวงจร LPA
2. ต่่วงจร LPA ดังรูปที่ 3.4

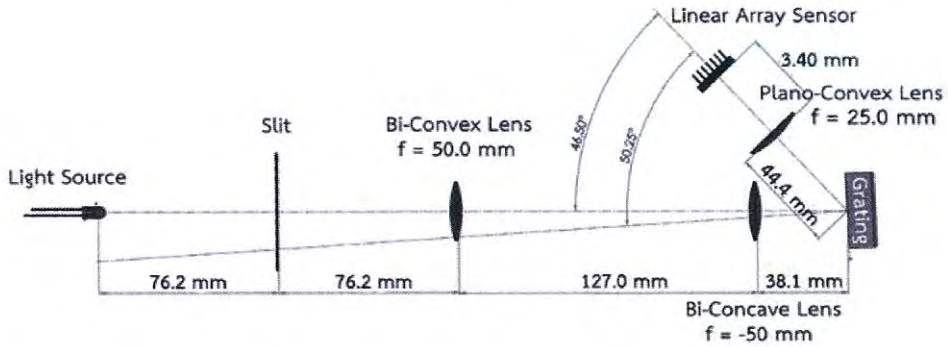
3.2.3 การเขียนซอฟต์แวร์ที่ใช้ในระบบ

1. การควบคุมและการอ่านค่าจากเซนเซอร์ (Linear Array Sensor) ด้วยบอร์ดอาดูยโน (Arduino)
 - 1.1 ทำการเชื่อมต่อ LPA เข้ากับคอมพิวเตอร์
 - 1.2 เปิดโปรแกรม Arduino 1.0.6
 - 1.3 เขียนโปรแกรมให้บอร์ดอาดูยโนควบคุมการทำงานและการอ่านค่าของเซนเซอร์
 - 1.4 กดปุ่ม Verify เพื่อทำการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม
 - 1.5 เมื่อทำการ Verify แล้ว ให้กดปุ่ม Upload โปรแกรมเข้าบอร์ดอาดูยโน
2. การเขียนโปรแกรมแสดงผล PL Monitor เพื่อนำข้อมูลจากเซนเซอร์แสดงผลแบบเรียลไทม์ (Real Time) บนหน้าจอแสดงผล (User Interface, UI)
 - 2.1 เปิดโปรแกรม Processing 2.2.1
 - 2.2 เขียนโปรแกรมรับค่าจาก LPA
 - 2.3 กดปุ่ม RUN โปรแกรม
 - 2.4 เมื่อโปรแกรมสมบูรณ์ บันทึกโปรแกรมชื่อไฟล์ PL Monitor ไว้เพื่อใช้ใน

ขั้นตอนต่อไป

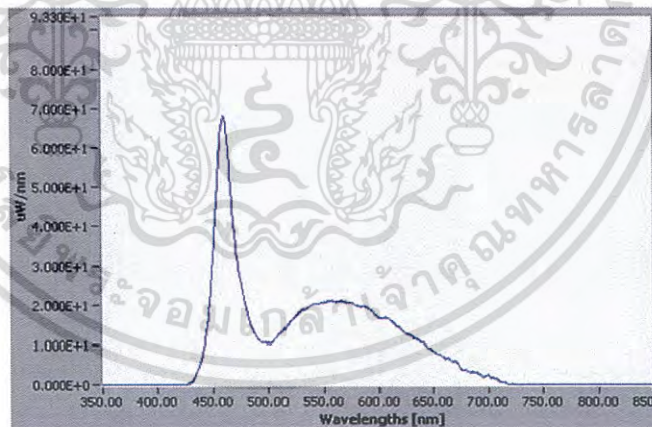
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 การออกแบบระบบตรวจวัดสเปกตรัม



รูปที่ 3.5 แผนภาพระบบตรวจวัดสเปกตรัมที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks

1. แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้เป็นหลอดแอลอีดีสีขาว (White light Super Bright LEDs)
2. วางสลิต (Slit) ห่างจากแหล่งกำเนิดแสง 3 นิ้ว (Breadboard มีรูสอดห่างกัน 1 นิ้ว)
3. ทำให้แสงที่ผ่านจากสลิตเป็นแสงขนาน โดยให้แสงผ่านคอลลิเมเตอร์ที่ใช้เลนส์นูน (Bi-Convex Lens) ความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร และ เลนส์เว้า (Bi-Concave Lens) ความยาวโฟกัส -50 มิลลิเมตร ระยะห่างของเลนส์ทั้งสองอันเท่ากับ 5 นิ้ว และวางคอลลิเมเตอร์ ห่างจากสลิต 3 นิ้ว



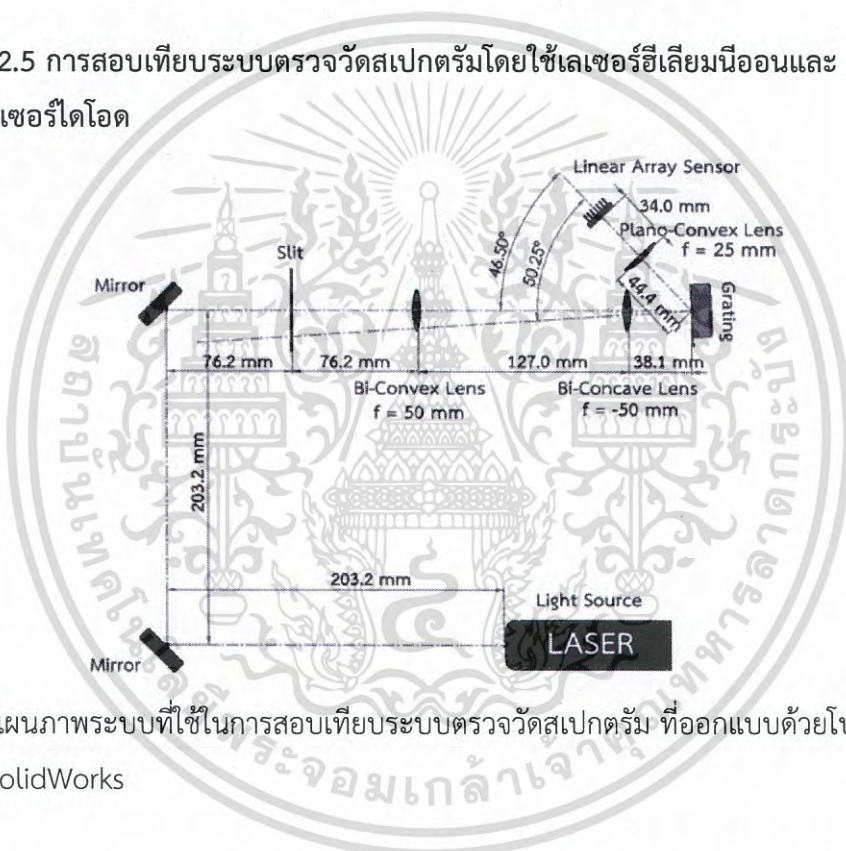
รูปที่ 3.6 สเปกตรัมของหลอดแอลอีดีสีขาว (White light Super Bright LEDs)

4. นำเกรตติงวางไว้บนแท่นหมุน (High-Precision Rotation Mount) และวางห่างจากคอลลิเมเตอร์ 1.5 นิ้ว ปรับเกรตติงเพื่อให้แสงที่ผ่านคอลลิเมเตอร์ตั้งฉากกับผิวหน้าเกรตติง
5. หมุนไมโครมิเตอร์เพื่อปรับฐานของเกรตติงให้หมุนไปทิศทวนเข็มนาฬิกา ให้มุมระหว่างแสงตกกระทบกับแสงสะท้อนของแสงที่มีความยาวคลื่นเท่ากับ 550 นาโนเมตร มีค่าเท่ากับ 45° โดยคำนวณมุมไว้ล่วงหน้า) ทำให้สเปกตรัมออกมาทางด้านขวามือตามเบสเออร์โรว์ (Blaze Arrow)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. นำเลนส์นูน (Plano-Convex Lens) ความยาวโฟกัส 25 มิลลิเมตร รวมสเปกตรัมจากเกรตติง
7. นำเซนเซอร์มาวางโดยให้แสงที่สะท้อนจากเกรตติง ตกกระทบตั้งฉากกับผิวของเซนเซอร์ ให้แถบสเปกตรัมมีความยาวขนาดพอดีกับพิกเซล (Pixel) ของเซนเซอร์
8. เชื่อมต่อระบบ LPA เข้ากับคอมพิวเตอร์ เปิดโปรแกรม PL Monitor เพื่อวัดสเปกตรัมของแอลอีดีสีขาว (White light Super Bright LEDs)
9. ปรับตำแหน่งของเซนเซอร์ ให้ได้กราฟสเปกตรัมของแอลอีดีสีขาว ในหน้าจอแสดงผล UI ให้คล้ายกับกราฟสเปกตรัมในฐานข้อมูล (Data sheet) ที่สืบค้นมา ดังรูปที่ 3.6
10. เมื่อได้กราฟตามรูปที่ 3.6 ครอบระบบด้วยกล่องอะคริลิกสีดำ เพื่อไม่ให้มีแสงจากภายนอกมาภายในระบบ

3.2.5 การสอบเทียบระบบตรวจวัดสเปกตรัมโดยใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออนและเลเซอร์ไดโอด



รูปที่ 3.7 แผนภาพระบบที่ใช้ในการสอบเทียบระบบตรวจวัดสเปกตรัม ที่ออกแบบด้วยโปรแกรม SolidWorks

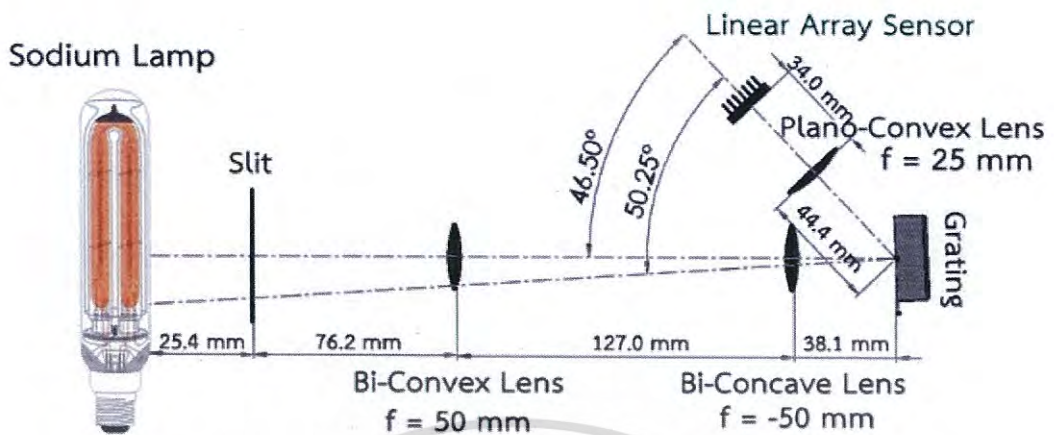
1. จัดวางระบบสอบเทียบดังรูปที่ 3.7 โดยใช้เลเซอร์ไดโอดสีเขียวความยาวคลื่น 532 ± 10 นาโนเมตร เป็นแหล่งกำเนิดแสง
2. เชื่อมต่อระบบ LPA เปิดโปรแกรม PL Monitor เพื่อวัดสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว
3. บันทึกค่าสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว โดยเปิดฟังก์ชัน แสดงผลจากพอร์ตอนุกรม (Serial monitor) ในโปรแกรมอาดูโยโน
4. คัดลอกข้อมูลจากหน้าต่างแสดงผลโปรแกรม Notepad
5. บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์นามสกุล .CSV (ไฟล์ .CSV จะใช้กับโปรแกรม Excel)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. เปิดไฟล์ข้อมูลที่บันทึกไว้ด้วยโปรแกรม Excel จะได้ค่าสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว ซึ่งเป็นค่าความเข้มแสงในแต่ละตำแหน่งพิกเซลของเซนเซอร์
7. บันทึกตำแหน่งพิกเซลที่มีความเข้มแสงสูงสุดของสเปกตรัม
8. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 1-7 โดยเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นเลเซอร์ไดโอดสีน้ำเงินความยาวคลื่น 405 ± 10 นาโนเมตร และเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ความยาวคลื่น 633 นาโนเมตร
9. นำตำแหน่งพิกเซลที่มีความเข้มแสงสูงสุดของเลเซอร์แต่ละชนิดมาพิจารณา เพื่อกำหนดค่าความยาวคลื่นของแต่ละพิกเซล
10. กรณีเลเซอร์ไดโอดมีความยาวคลื่น ± 10 นาโนเมตร ทำการคำนวณด้วยโปรแกรม Excel เพื่อหาค่าความยาวคลื่นที่ใช้
11. นำค่าความยาวคลื่นทั้งหมดของเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ฮีเลียมนีออนมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพิกเซลของตำแหน่งที่มีความเข้มสูงสุดของเลเซอร์แต่ละชนิด
12. ทำการวิเคราะห์กราฟ โดยเลือกความยาวคลื่นของแต่ละพิกเซลที่ทำให้ทั้ง 3 พิกเซล มีความสัมพันธ์กันเป็นสมการเส้นตรง
13. เลือกความสัมพันธ์ของกราฟเส้นตรงที่ได้ โดยใช้ค่ากลางของข้อมูล
14. เมื่อได้ความยาวคลื่นของทั้ง 3 พิกเซล แล้วทำการคำนวณค่าความยาวคลื่นของพิกเซลที่เหลือทั้งหมดจนครบทั้ง 256 พิกเซล
15. เปลี่ยนค่าตำแหน่งพิกเซลของเซนเซอร์เป็นค่าความยาวคลื่น
16. นำมาแสดงผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต่างศักย์กับความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6 การทดสอบระบบตรวจวัดสเปกตรัม โดยใช้หลอดแสงโซเดียม (Sodium Lamp)

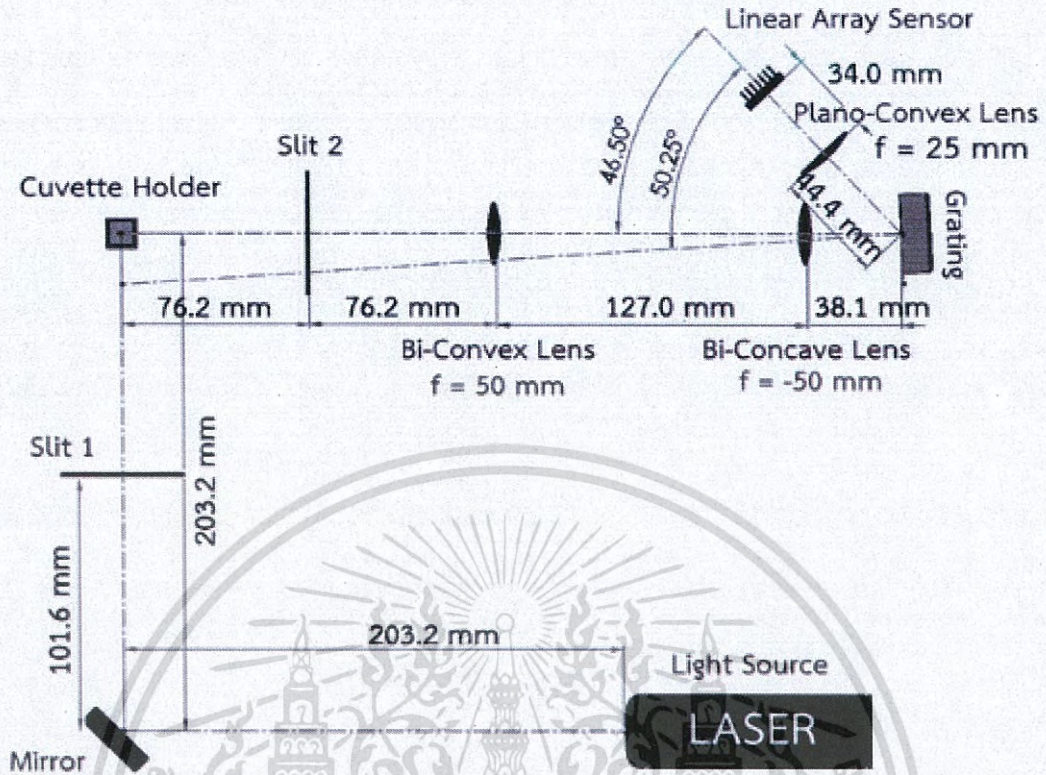


รูปที่ 3.8 แผนภาพการทดสอบระบบตรวจวัดสเปกตรัมโดยใช้หลอดแสงโซเดียม

1. ใช้หลอดแสงโซเดียมเป็นแหล่งกำเนิดแสงของระบบดังรูปที่ 3.8
2. เชื่อมต่อระบบ LPA เข้ากับคอมพิวเตอร์
3. เปิดโปรแกรม PL Monitor และกดปุ่ม RUN โปรแกรม
4. สังเกตกราฟสเปกตรัมที่หน้าจอแสดงผล
5. เปิดฟังก์ชันแสดงผลข้อมูลจากพอร์ตอนุกรมในโปรแกรมอาดูยโน
6. คัดลอกข้อมูลจากจอแสดงผลลงในโปรแกรม Notepad
7. บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์นามสกุล .CSV (ไฟล์ .CSV จะใช้กับโปรแกรม Excel)
8. เปิดไฟล์ข้อมูลที่บันทึกไว้ด้วยโปรแกรม Excel
9. เฉลี่ยค่าที่ได้จากข้อมูลและพล็อตกราฟ
10. นำผลที่ได้เปรียบเทียบกับกราฟสเปกตรัมอ้างอิงของใช้หลอดแสงโซเดียม
11. คำนวณหาข้อมูลจำเพาะของเครื่องมือ ย่านการวัด (Range) ค่าความละเอียด (Resolution) ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) ของระบบตรวจวัดสเปกตรัม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.7 การจักระบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (Photoluminescence Spectroscopy)



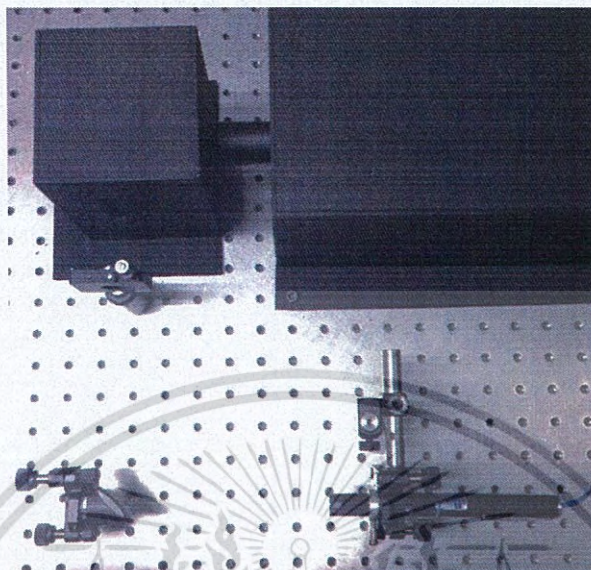
รูปที่ 3.9 แผนภาพระบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

ในระบบโฟโวลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปีจะเพิ่มอุปกรณ์จากระบบตรวจวัดสเปกตรัมที่จัดไว้แล้วข้างต้น ดังนี้

1. วางแท่นวางคิวเวทท์ (Cuvette) แทนที่ตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงจากระบบตรวจวัดสเปกตรัม ดังรูปที่ 3.9
2. วางตำแหน่งเลเซอร์และกระจก
3. ทำการปรับแท่นยึดกระจก (Mirror mount) ของกระจก ให้ลำแสงเลเซอร์ส่องตรงไปยังสไลต์และผ่านไปสู่อุปกรณ์

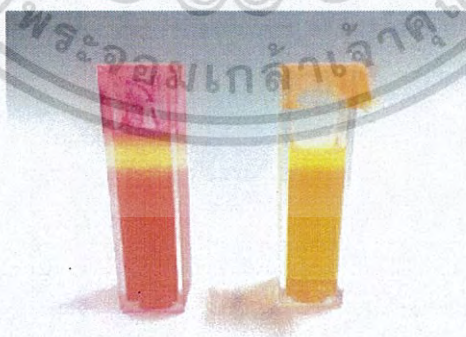
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่วารณี่ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8 การทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารตัวอย่างด้วยระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี



รูปที่ 3.10 การทดลองวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่างด้วยระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

1. เตรียมสารละลายโดยผสม 4-(dicyanomethylene)-2-methyl-6-(p-dimethylaminostyryl)-4H-pyran (DCM) กับ methanol ให้ได้ความเข้มข้น 10^{-4} Molar
2. นำสารละลาย DCM ใส่ควิเวทท์และปิดด้วยเทปกาว (Sealing Film)
3. นำควิเวทท์ไปวางที่แท่นวางควิเวทท์ (Cuvette Holder) จากนั้นเชื่อมต่อกับระบบ LPA เข้ากับคอมพิวเตอร์
4. เปิดโปรแกรม PL Monitor และกดปุ่ม RUN โปรแกรม



รูปที่ 3.11 สารตัวอย่างที่นำมาตรวจวัดด้วยระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี (จากซ้ายมือ Rhodamine B, DCM ตามลำดับ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการกระตุ้น สารละลาย DCM ให้เปล่งแสง
6. สังเกตกราฟสเปกตรัมที่หน้าจอแสดงผล
7. บันทึกข้อมูลโดยการเปิดฟังก์ชันแสดงผลในพอร์ตอนุกรม ในโปรแกรมอาดูยโน
8. คัดลอกข้อมูลจากจอแสดงผลลงในโปรแกรม Notepad
9. บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์นามสกุล .CSV (ไฟล์ .CSV จะใช้กับโปรแกรม Excel)
10. เปิดไฟล์ข้อมูลที่บันทึกไว้ด้วยโปรแกรม Excel
11. ทำการทดลองซ้ำตามข้อ 2-10 โดยใช้สารละลาย Rhodamine B ผสมกับ Ethanal ความเข้มข้น 10^{-3} Molar

3.2.9 การทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงของสารตัวอย่างไม่ทราบองค์ประกอบด้วยระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

1. นำสารละลายไม่ทราบองค์ประกอบ (Unknow) ใส่ควิเวทท์และปิดด้วยเทปกาว (Sealing Film)
2. นำควิเวทท์ไปวางที่แท่นวางควิเวทท์ (Cuvette Holder) จากนั้นเชื่อมต่อระบบ LPA เข้ากับคอมพิวเตอร์
3. เปิดโปรแกรม PL Monitor และกดปุ่ม RUN โปรแกรม
4. ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการกระตุ้น สารละลายไม่ทราบองค์ประกอบให้เปล่งแสง
5. สังเกตกราฟสเปกตรัมที่หน้าจอแสดงผล
6. บันทึกข้อมูลโดยการเปิดฟังก์ชันแสดงผลในพอร์ตอนุกรม ในโปรแกรมอาดูยโน
7. คัดลอกข้อมูลจากจอแสดงผลลงในโปรแกรม Notepad
8. บันทึกข้อมูลเป็นไฟล์นามสกุล .CSV (ไฟล์ .CSV จะใช้กับโปรแกรม Excel)
9. เปิดไฟล์ข้อมูลที่บันทึกไว้ด้วยโปรแกรม Excel



รูปที่ 3.12 สารตัวอย่างไม่ทราบองค์ประกอบที่นำมาตรวจวัดด้วยระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

วิธีการทดลองและผลการทดลอง

4.1 ผลการทดลองการหาค่าสเปกของเกรตติง

ตอนที่ 1 การหาค่าเฉลี่ยของมุมที่แสงสะท้อนออกจากเกรตติงที่มีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร, 436 นาโนเมตร, 500 นาโนเมตร และ 546 นาโนเมตร โดยจากการทดลองกำหนดให้มีมุมของแสงตกกระทบ $\theta_i = 45.670^\circ$

ตารางที่ 4.1 ผลการหาค่าเฉลี่ยของมุมที่แสงสะท้อนออกจากเกรตติง ตามความยาวคลื่นที่กำหนด

ความยาวคลื่น $\lambda(\text{nm})$	มุม θ_r ที่วัดได้ (องศา)			θ_r เฉลี่ย
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	
405 nm	53.330 °	53.330 °	53.300 °	53.320 °
436 nm	50.750 °	50.750 °	50.750 °	50.750 °
500 nm	45.950 °	46.167 °	46.133 °	46.083 °
546 nm	41.583 °	41.650 °	41.633 °	41.622 °

ตอนที่ 2 การคำนวณหาสเปกของเกรตติงตามความยาวคลื่นที่กำหนด

จากสมการของสเนลล์

$$n\lambda = d (\sin\theta_i + \sin\theta_r)$$

ดังนั้น

$$d = \frac{n\lambda}{\sin\theta_i + \sin\theta_r}$$

เมื่อ

n คือ ลำดับการเลี้ยวเบน

λ คือ ความยาวคลื่น (nm)

θ_i คือ มุมของแสงที่ตกกระทบเกรตติง

θ_r คือ มุมของแสงที่สะท้อนออกจากเกรตติง

จากการทดลองกำหนดให้มีมุมของแสงตกกระทบ $\theta_i = 45.670^\circ$ และ $n = 1$

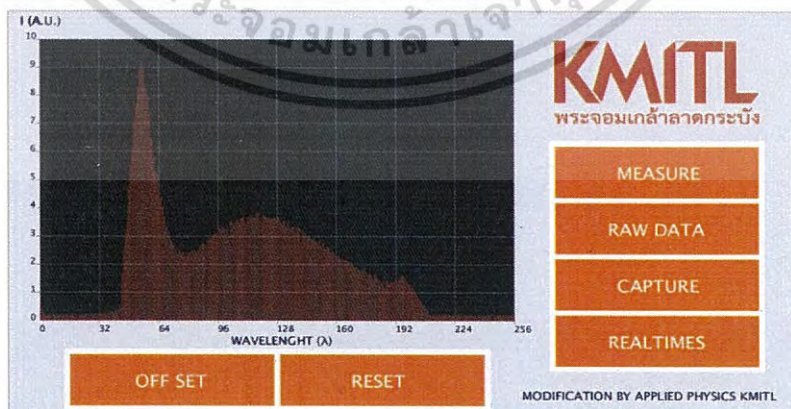
ตารางที่ 4.2 ผลของการคำนวณหาระยะห่างระหว่างช่อง (d) ของเกรตติงตามความยาวคลื่นที่กำหนดจากสมการของสเนลล์

ความยาวคลื่น λ (nm)	θ_r เกลี่ย	ระยะห่างระหว่างช่อง (d)
405 nm	53.320 °	720.100 nm
436 nm	50.750 °	718.400 nm
500 nm	46.083 °	726.500 nm
546 nm	41.622 °	712.700 nm
ระยะห่างระหว่างช่อง d เกลี่ย		719.425 nm

จากการทดลองพบว่าระยะห่างระหว่างช่อง (d) เกลี่ยของเกรตติงที่ค่าเท่ากับ 719.425 นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับค่าของเกรตติง ขนาด 1400 ร่อง/มม. ที่มีจำหน่ายทั่วไป ซึ่งมีค่า d เท่ากับ 714.285714 นาโนเมตร ดังนั้นผู้ทำการทดลองจึงกำหนดให้ เกรตติงมีค่าเท่ากับ 714.2857143 นาโนเมตร เพื่อใช้ในการศึกษาในครั้งนี้

4.2 การจัดวางลิเนียร์เซนเซอร์ (Linear sensor)

ผลการทดลองที่ได้จากการจัดวางตำแหน่งลิเนียร์เซนเซอร์ เพื่อใช้ในการรับสัญญาณแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น (400 – 700 นาโนเมตร) โดยใช้หลอดแอลอีดีสีขาว (Super bright LEDs) เป็นแหล่งกำเนิดแสง (Light source) โดยดูจากสเปกตรัมที่อยู่บนหน้าจอแสดงผล (User Interfered, UI) ให้กราฟที่ปรากฏขึ้นครอบคลุมช่วงความยาวคลื่นของหลอด LED ซึ่งรูปกราฟที่ได้ (รูปที่ 4.1) จะมีความสัมพันธ์กับกราฟที่นำมาใช้อ้างอิง(รูปที่ 3.6)



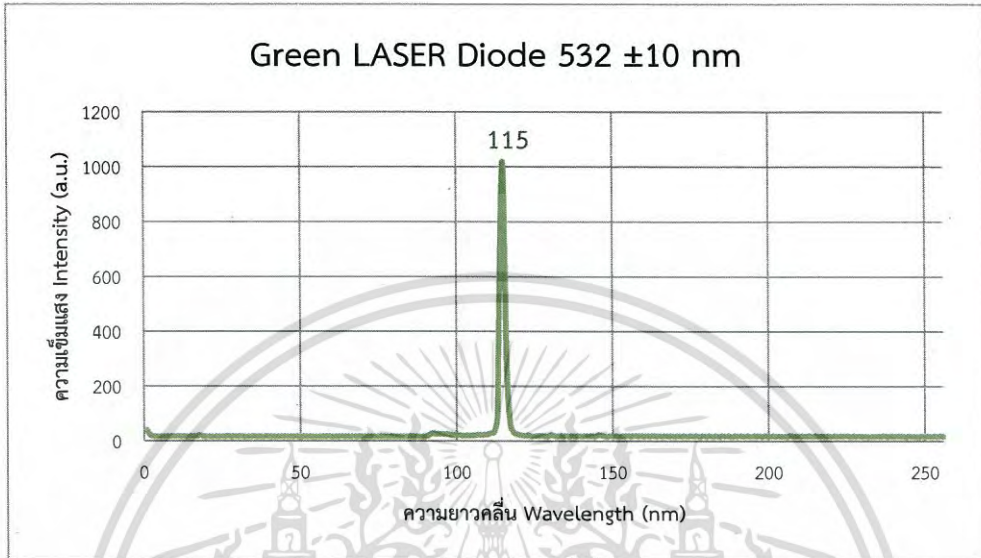
รูปที่ 4.1 กราฟสเปกตรัมของแสงจากหลอดแอลอีดีสีขาว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ผลการสอบเทียบระบบสเปกโทรสโกปี โดยใช้เลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He: Ne LASER)

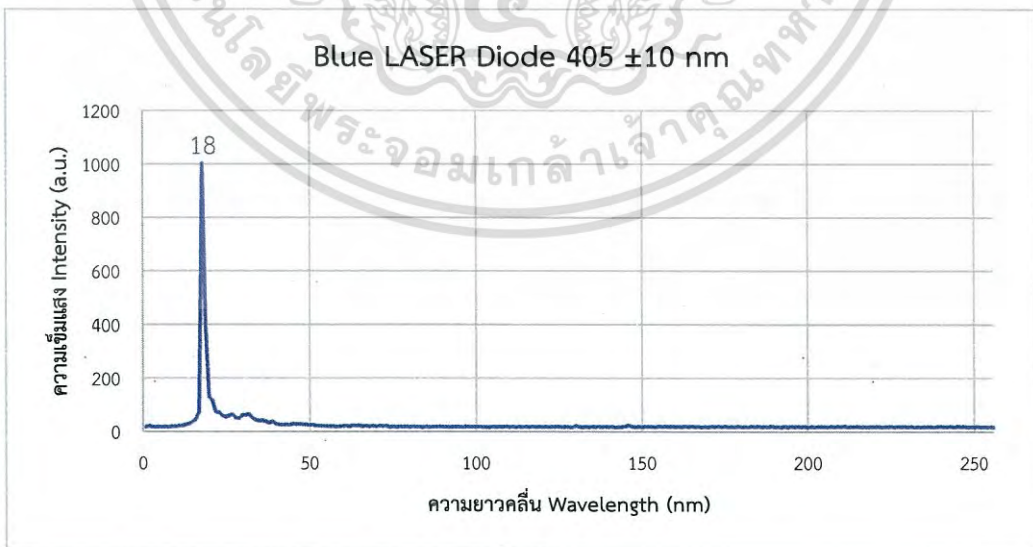
และเลเซอร์ไดโอด (LASER Diode)

4.3.1 ผลการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว (Green LASER Diode) 532 ± 10 นาโนเมตร



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิคเซลของเซนเซอร์กับความเข้มของเลเซอร์ไดโอดสีเขียว

4.3.2 ผลการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์ไดโอดสีน้ำเงิน (Blue LASER Diode) 405 ± 10 นาโนเมตร

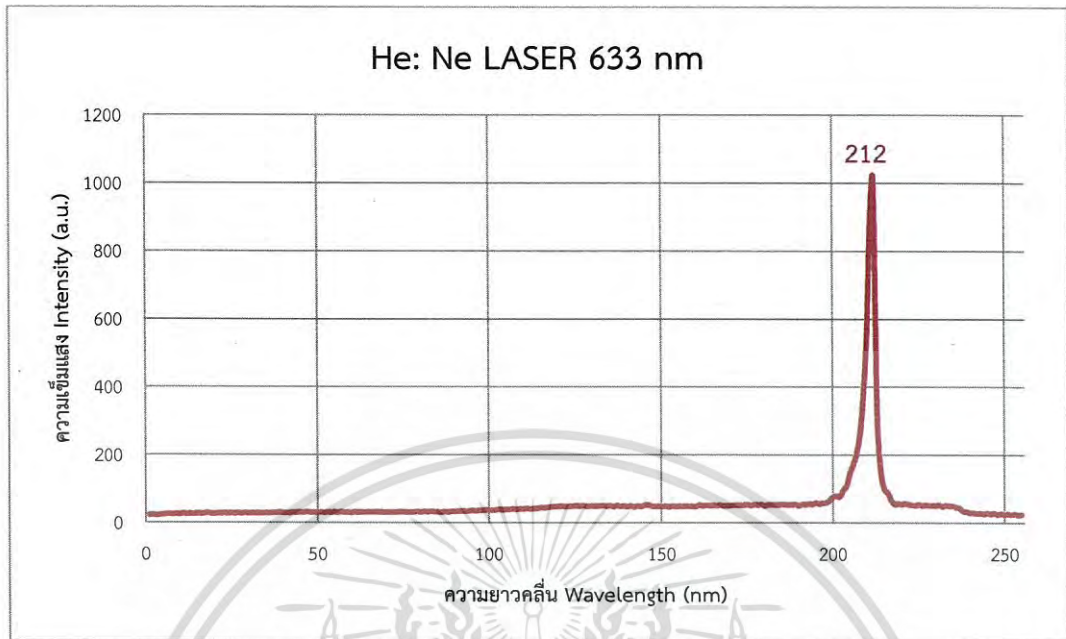


รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิคเซลของเซนเซอร์กับความเข้มของเลเซอร์ไดโอด

สีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ผลการวัดสเปกตรัมของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน (He: Ne LASER) 633 นาโนเมตร



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพิคเซลของเซนเซอร์กับความเข้มของเลเซอร์ฮีเลียมนีออน

เนื่องจากเลเซอร์ไดโอดสีน้ำเงินมีความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร และเลเซอร์ไดโอดสีเขียวมีความยาวคลื่น 532 นาโนเมตร มีค่าความยาวคลื่น ± 10 นาโนเมตร จึงทำการบวกค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ทั้งสองเป็นเลขลงตัว ทำให้เลเซอร์ทั้งสองมีค่าความยาวคลื่นที่น่าจะเป็นค่าจริงอย่างละ 21 ค่า ตั้งแต่ -10 นาโนเมตร ถึง +10 นาโนเมตร ของความยาวคลื่นเลเซอร์

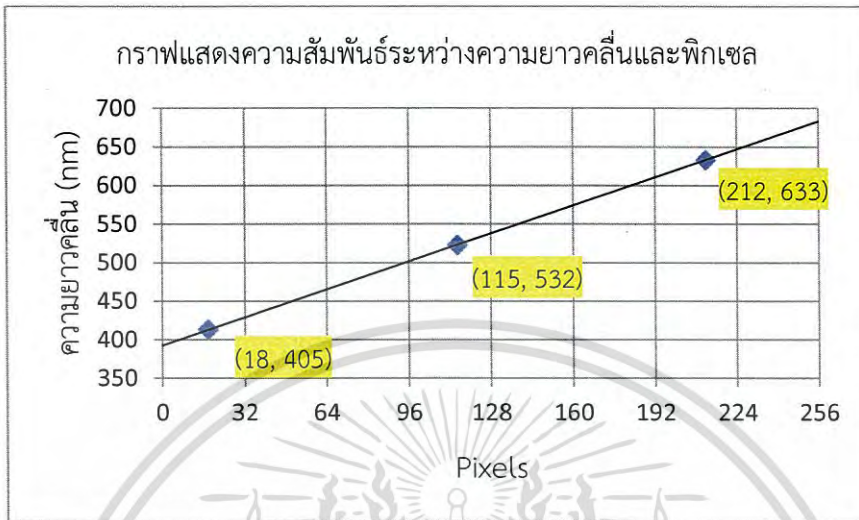
คำนวณหาค่าความยาวคลื่นที่เป็นไปได้ โดยวิเคราะห์จากค่าระยะห่างของค่าความยาวคลื่นที่แต่ละพิคเซลวัดได้ให้มีขนาดเท่ากัน (เป็นเชิงเส้น) พบว่ามี 3 กรณี

ตารางที่ 4.3 แสดงค่าความยาวคลื่นที่น่าจะเป็นไปได้จากการวิเคราะห์ด้วยเลเซอร์

กรณี	ความยาวคลื่นของ เลเซอร์ไดโอดสีน้ำเงิน $\lambda = 405 \text{ nm}$	ความยาวคลื่นของ เลเซอร์ไดโอดสีเขียว $\lambda = 532 \text{ nm}$
1	411	522
2	413	523
3	415	524

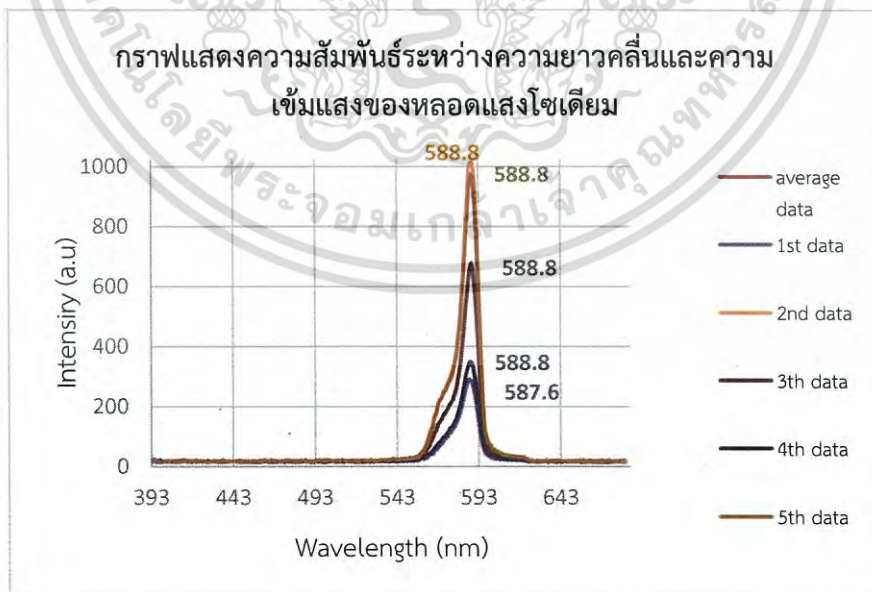
จากข้อมูลข้างต้น นำมาหาค่ากลางของข้อมูลซึ่งตรงกับกรณีที่ 2 คือ เลเซอร์ไดโอดสีน้ำเงินมีความยาวคลื่นเท่ากับ 413 นาโนเมตร และ เลเซอร์ไดโอดสีเขียวมีความยาวคลื่นเท่ากับ 523 นาโนเมตร เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าวทำให้ได้ความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพิกเซล โดยมีค่าความยาวคลื่นที่น้อยที่สุดที่ระบบสามารถวัดได้เท่ากับ 1.1340206185567 นาโนเมตร หรือ ประมาณ 1.13 นาโนเมตร



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและพิกเซล

4.4 ผลการสอบเทียบการวัดของระบบโฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปีโดยใช้หลอดแสงโซเดียม (Sodium Lamp)



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงผลการสอบเทียบการวัดของระบบ โฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทรสโกปีโดยใช้

หลอดแสงโซเดียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.1 ความถูกต้อง หรือ ความแม่นยำ (Accuracy)

ความแม่นยำ เป็นค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของเครื่องมือวัด (Instrument) ในการอ่านค่าหรือแสดงค่าที่วัดได้เข้าใกล้ค่าจริง

โดยการคำนวณค่าความถูกต้อง/ความแม่นยำใช้สมการ $\%Accuracy = 100 - \%Error$

$$\text{Relative error} = \left| \frac{x_{\text{mea}} - x_t}{x_t} \right|$$

เมื่อ $\%Error = \text{Relative error} \times 100$

x_{mea} คือ ค่าที่ได้จากการวัด (Measure value)

x_t คือ ค่าจริง (True value)

จะได้ $\% Accuracy$ ของระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโทรสโกปี

$$= 100 - \left| \frac{(588.8 \times 10^{-9}) - (589.0 \times 10^{-9})}{(589.0 \times 10^{-9})} \right| \times 100\%$$

$$= 99.96604414\%$$

$$\approx 99.97\%$$

ดังนั้น $\% Accuracy$ ของระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโทรสโกปีคือ 99.97%

4.4.2 การวัดความเที่ยงตรงของเครื่องมือ (Precision)

ความเที่ยงตรงของเครื่องมือ เป็นค่าที่นิยมใช้และแสดงความหมายใกล้เคียงกับความถูกต้องแม่นยำ (Accuracy) ซึ่งในความเป็นจริงแล้วความเที่ยงตรงมีความหมายที่แตกต่างจากความแม่นยำ โดยความเที่ยงตรงเป็นค่าที่แสดงถึงความสามารถของเครื่องมือวัดในการแสดงค่า เดิมเมื่อทำการวัดหลายๆ ครั้ง หรือความสามารถในการแสดงค่าซ้ำ (Repeatability) ของเครื่องมือวัดภายใต้เงื่อนไขการวัดแบบเดิม โดยความเที่ยงตรงของเครื่องมือสามารถวิเคราะห์ได้จากค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ย

โดยใช้สมการ

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ย} = \left| \frac{x_i - x_m}{x_m} \right|$$

$$x_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ X_m คือ ค่าเฉลี่ยของการวัด
 X_i คือ ค่าการวัดแต่ละครั้ง
 n คือ จำนวนครั้งของการวัด
 $\sum_{i=1}^n X_i$ คือ ผลรวมการวัดทั้งหมด

จะได้ค่าค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยของเครื่องมือวัดของระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทสโกปี

$$\text{ครั้งที่ 1} = \frac{|(587.6 \times 10^{-9}) - (588.56 \times 10^{-9})|}{(588.56 \times 10^{-9})}$$

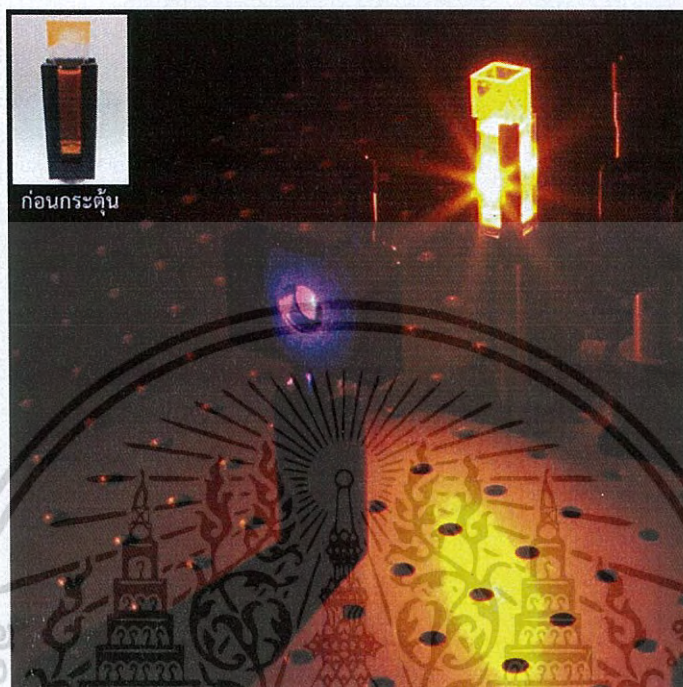
$$= 0.00163 \text{ nm}$$

$$\text{ครั้งที่ 2-5} = \frac{|(588.8 \times 10^{-9}) - (588.56 \times 10^{-9})|}{(588.56 \times 10^{-9})}$$

$$= 0.000408 \text{ nm}$$

ดังนั้น ค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ยของระบบโฟโตลูมิเนสเซนซ์สเปกโทสโกปีคือ 0.00163 nm เนื่องจากเป็นค่าที่มีความคลาดเคลื่อนไปจากค่าเฉลี่ยมากที่สุด

4.5 ผลการทดลองระบบโฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทสโกปี โดยใช้สารละลาย Dichloromethane ที่ความเข้มข้น 8×10^{-5} M และสารละลาย Rhodamine B ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} M
 ผลการทดลองระบบโฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทสโกปี โดยใช้สาร Dichloromethane ความเข้มข้น 8×10^{-5} M พบว่าความยาวคลื่นที่มีความเข้มแสงสูงสุดคือ 611.5 นาโนเมตร



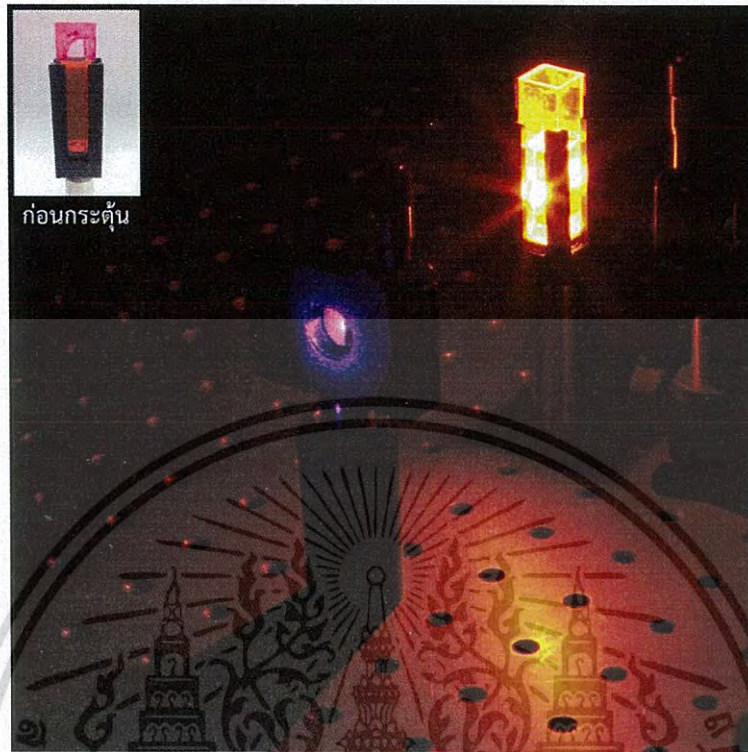
รูปที่ 4.7 สารละลาย DCM ที่ถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร และ (มุมซ้ายบน) สารละลาย DCM ก่อนถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงผลการทดลองระบบโฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทสโกปีโดยใช้สารละลาย Dichloromethane ความเข้มข้น 8×10^{-5} M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองระบบโฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทสโกปี โดยใช้สารละลาย Rhoda mine B ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} M พบว่าความยาวคลื่นที่มีความเข้มแสงสูงสุดคือ 608.1 นาโนเมตร



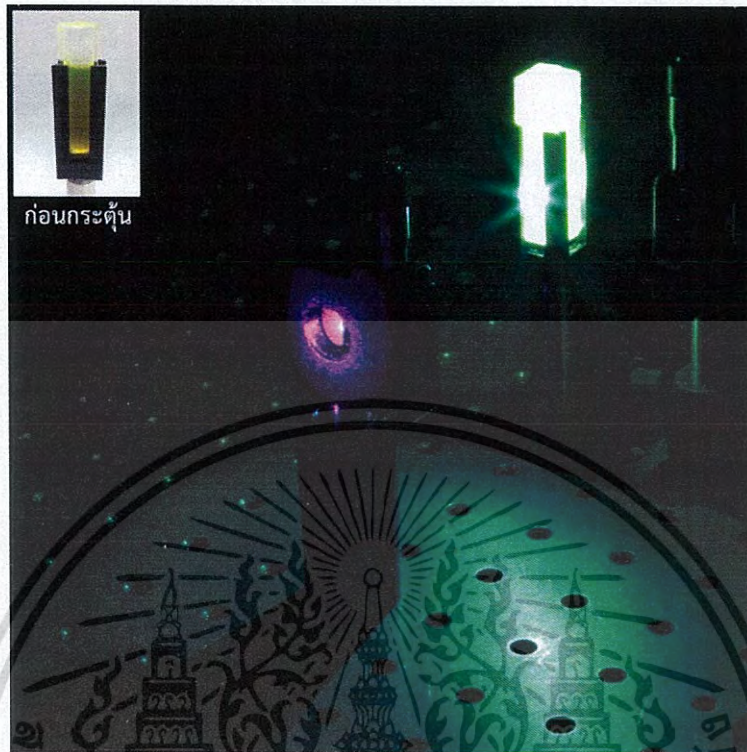
รูปที่ 4.9 สารละลาย RB ที่ถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร และ (มุมซ้ายบน) สารละลาย RB ก่อนถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงผลการทดลองระบบโฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทสโกปี โดยใช้สารละลาย Rhodamine B ที่ความเข้มข้น 1×10^{-3} M

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองระบบโฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทสโกปี โดยใช้สารที่ไม่ทราบองค์ประกอบ พบว่าความยาวคลื่นที่มีความเข้มแสงสูงสุดคือ 499.2 นาโนเมตร



รูปที่ 4.11 สารที่ไม่ทราบองค์ประกอบที่ถูกกระตุ้นด้วยเลเซอร์ไดโอดความยาวคลื่น 405 นาโนเมตร และ (มุมซ้ายบน) สารที่ไม่ทราบองค์ประกอบก่อนถูกกระตุ้นด้วยแสงเลเซอร์



รูปที่ 4.12 กราฟแสดงผลการทดลองระบบ โฟโวลูมิเนสเซนส์สเปกโทสโกปี โดยใช้สารไม่ทราบองค์ประกอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

ผลการสร้างชุดศึกษาระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปี สรุปผลได้ดังนี้

1. ชุดศึกษาระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปีประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการกระตุ้น คือเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ฮีเลียมนีออนที่มีความยาวคลื่น 405 ± 10 นาโนเมตร, 532 ± 10 นาโนเมตร และ 633 นาโนเมตร ตามลำดับ ใช้ในการกระตุ้นสารตัวอย่างที่เป็นของเหลว สามารถปรับรูปร่างได้ด้วยไมโครมิเตอร์สไลด์ แสงที่เปล่งออกมาจากสารตัวอย่างจะถูกรวมแสงให้กลายเป็นแสงขนานด้วยคอลลิเมเตอร์ ประกอบด้วยเลนส์นูนและเลนส์เว้าที่มีความยาวโฟกัส 50 มิลลิเมตร และ -50 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสงจะถูกเปลี่ยนเป็นสเปกตรัมด้วยเกรตติงที่มีระยะระหว่างพื้นผิวที่เกิดการสะท้อน (d) เท่ากับ 714.2857143 นาโนเมตร จากนั้นแถบสเปกตรัมจะถูกรวมด้วยเลนส์ให้มีขนาดพอดีกับเซนเซอร์ (Linear Array Sensor) ในการแสดงผล จะแสดงผลกราฟสเปกตรัมแบบเรียลไทม์ (Real Time) บนหน้าจอแสดงผล พร้อมบันทึกและวิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรม Excel
2. จากการสอบเทียบระบบตรวจวัดสเปกตรัมด้วยเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ค่าความยาวคลื่นของเลเซอร์ไดโอดและเลเซอร์ฮีเลียมนีออน ที่ตรงกับพิกเซลของเซนเซอร์คือที่ความยาวคลื่น 413 นาโนเมตร, 523 นาโนเมตร และ 633 นาโนเมตร ตรงกับพิกเซลที่ 18 , 115 และ 212 ตามลำดับ คำนวณย่านการวัดของเครื่องมือ (Range) มีค่าตั้งแต่ $393 - 682$ นาโนเมตร และมีค่าความละเอียดของเครื่องมือ (Resolution) ประมาณ 1.13 นาโนเมตร
3. การทดสอบระบบตรวจวัดสเปกตรัมโดยใช้หลอดแสงโซเดียม นำกราฟสเปกตรัมที่วัดจากชุดศึกษาระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปีมาเปรียบเทียบกับเอกสารอ้างอิง พบว่าเครื่องมือวัดมีความแม่นยำ (Accuracy) 99.97% ความเที่ยงตรง (Precision) มีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าเฉลี่ย 0.00163
4. การทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งของสารตัวอย่างด้วยชุดศึกษาระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปี สรุปผลได้ว่าเครื่องมือวัดสามารถตรวจวัดสเปกตรัมของแสงที่เปล่งออกมาจากระบบการโฟโตนิกส์เซนเซอร์ได้
5. จากการทดลองวัดสเปกตรัมของสารที่ไม่ทราบองค์ประกอบด้วยชุดศึกษาระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปี สรุปผลได้ว่าเครื่องมือสามารถวัดแสงที่เปล่งออกมาจากระบบการโฟโตนิกส์เซนเซอร์ของสารที่ไม่ทราบองค์ประกอบได้ มีสเปกตรัมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนสื่อออนไลน์โดยไม่ผ่านการอนุมัติจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อเจ้าของลิขสิทธิ์เอกสารฉบับนี้

เปล่งแสงในช่วงความยาวคลื่น 460-620 นาโนเมตร และมีจุดสูงสุดที่ความยาวคลื่นประมาณ 500 นาโนเมตร

5.2 ปัญหาที่พบในงานวิจัย

โครงการพิเศษ ชุดศึกษาระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปีมีปัญหาที่พบในงานวิจัยดังนี้

ในระบบจัดแสงเป็นระบบที่ค่อนข้างถูกรบกวนได้ง่าย จึงต้องจัดระบบแสงบนโต๊ะที่มีความมั่นคง และต้องป้องกันแสงรบกวนจากสิ่งแวดล้อม เพื่อป้องกันการสูญเสียแสงที่แผ่ออกมาจากสารตัวอย่าง จึงจำเป็นต้องจัดระบบแสงให้มีระยะผ่านทางเดินแสงที่สั้นที่สุด ด้วยการเลือกใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสม แต่เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านอุปกรณ์ ทำให้ระบบแสงที่จัดทำขึ้นไม่เป็นไปตามที่คาดหวังไว้

1. เลนส์เป็นส่วนสำคัญในการจัดแสงเป็นอย่างมาก เพราะทำหน้าที่ในการรวมลำแสงและทำให้แสงมีลำขนาน ในระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปีแสงที่ผ่านจากเกรตติง จะเป็นสเปกตรัมที่บานออกเป็นมุมในแต่ละความยาวคลื่น จึงจำเป็นต้องใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสที่น้อยที่สุด วางไว้ใกล้เกรตติงมากที่สุด เพื่อรวบรวมสเปกตรัมได้ครอบคลุมทั้งหมด แต่เนื่องจากเลนส์ที่มีอยู่นั้น มีความยาวโฟกัสที่น้อยที่สุดคือ 25.0 มิลลิเมตร จึงต้องวางเลนส์ในระยะที่ห่างออกไป ซึ่งทำให้มีสเปกตรัมบางส่วนไม่ถูกรวมแสงไปยังเซนเซอร์ ส่งผลให้ย่านการวัดแคบลง
2. ในส่วนของเซนเซอร์รับแสงที่ทำหน้าที่ตรวจวัดสเปกตรัมของสารตัวอย่าง ในโครงการพิเศษนี้ ใช้ เซนเซอร์ ที่มีลักษณะเป็นระนาบเส้นตรง ในระบบโฟโตนิกส์เซนเซอร์สเปกโตรสโคปี สเปกตรัมที่สะท้อนออกจากเกรตติง จะทำมุมสะท้อนต่างๆตามความยาวคลื่น แต่ด้วยลักษณะของเซนเซอร์ที่เป็นระนาบ ทำให้สเปกตรัมที่ตกกระทบเซนเซอร์ มีระยะห่างทางเดินแสงที่แตกต่างกันในแต่ละความยาวคลื่น ดังสมการ

$$n\lambda = d (\sin i + \sin r) \quad (\text{สมการที่ 3.1})$$

เมื่อ n = อันดับการเลี้ยวเบน (diffraction order) = $\pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

λ = ความยาวคลื่น

d = ระยะระหว่างพื้นผิวที่เกิดการสะท้อน

i = มุมตกกระทบ (incident angle)

r = มุมสะท้อน (reflected angle)

ด้วยเหตุนี้ทำให้การรับสเปกตรัมในแต่ละพิทช์เซลล์ของเซนเซอร์มีความคลาดเคลื่อนของความยาวคลื่นเล็กน้อย ในช่วงปลายทั้งสองด้านของเซนเซอร์

3. เนื่องจากในระบบตรวจวัดสเปกตรัมของโครงการพิเศษนี้ใช้เซนเซอร์ (Linear Array Sensor) ในการวัดค่าแถบสเปกตรัมภายในครั้งเดียว โดยไม่มีการหมุนเกรตติง ทำให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถวัดสเปกตรัมได้รวดเร็ว แต่จะทำให้การจัดระบบทำได้ยากและมีความคลาดเคลื่อนได้ง่าย

5.3 ข้อเสนอแนะ

1. ระบบตรวจวัดสเปกตรัม ในส่วนที่รวมแสงเข้าไปยังเซนเซอร์ (Linear array sensor) ควรใช้เลนส์ที่มีความยาวโฟกัสน้อยลง โดยเลือกเลนส์ที่มีความยาวโฟกัสเหมาะสม ให้เลนส์สามารถรวมแสงได้มากขึ้นและครอบคลุมแถบสเปกตรัมจากเกรตติง ซึ่งจะช่วยให้ย่านการวัดกว้างขึ้น
2. เขียนโปรแกรมที่ใช้ในส่วนการวิเคราะห์ข้อมูลในการแสดงผลโดยเพิ่มฟังก์ชันความสัมพันธ์ระหว่างพิกเซลกับค่าความละเอียดของเครื่องมือของแต่ละพิกเซลเพื่อแก้ปัญหาความคลาดเคลื่อนบริเวณปลายเซนเซอร์ ซึ่งเครื่องมือมีความแม่นยำมากขึ้น
3. ใช้การหมุนเกรตติงแทนการรับข้อมูลเป็นแถบสเปกตรัมเพื่อง่ายต่อการติดตั้งและสอบเทียบเครื่องมือใหม่

5.4 แนวทางพัฒนา

1. พัฒนาระบบให้สามารถวิเคราะห์หาช่วงอายุของเอ็กซีตอน (Life time) ได้
2. พัฒนาระบบให้สามารถวิเคราะห์หาสเปกตรัมการดูดกลืนได้ (Absorption)
3. พัฒนาระบบให้สามารถกระตุ้นสารตัวอย่างให้เปล่งแสง โดยใช้ไฟฟ้าในการกระตุ้นได้ (Electroluminescence)
4. พัฒนาระบบให้สามารถวัดด้วยใช้สารตัวอย่างในรูปแบบทรายฟิล์ม (Dry Film) ได้

เอกสารอ้างอิง

Partha P. Benerjee and Ting-Chung Poon. (1992). *Principles of Applied Optics*. Aksen Associates Incorporated Publishes.

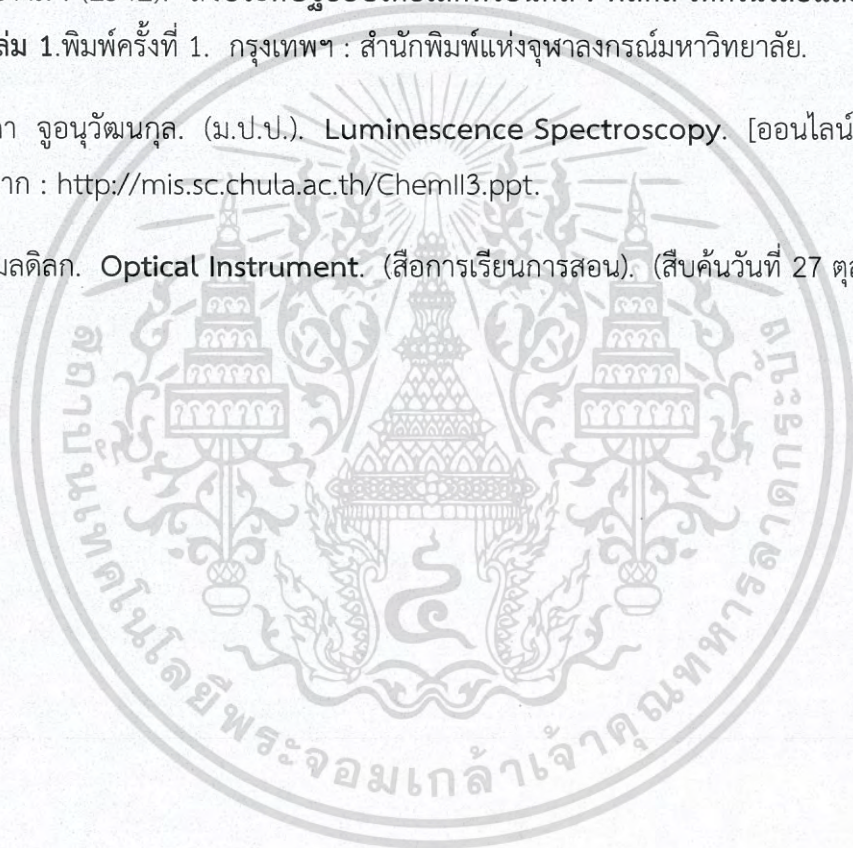
Turu Yoshizawa. (2009). *Handbook of OPTICAL METROLOGY Principles and Applications*. CRC Press Taylor & Francis.

ประจัน พลังสันติกุล. (2553). *พื้นฐานภาษา C สำหรับ Arduino C Programming for Arduino*. บริษัท แอปซอพท์เทคโนโลยี จำกัด.

ดุสิต เครื่องงาม . (2542). *สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งาน เล่ม 1*. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ผศ. สุชาดา จุณวัฒน์กุล. (ม.ป.ป.). *Luminescence Spectroscopy*. [ออนไลน์]. สืบค้นได้จาก : <http://mis.sc.chula.ac.th/Chem113.ppt>.

สุรชาติ กมลฉีก. *Optical Instrument*. (สื่อการเรียนการสอน). (สืบค้นวันที่ 27 ตุลาคม 2558)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Prototype Microfluidic System for Fluorescence-Based Chemical Sensing

Pattareeya Kittidachachan¹, Suparat Rujihan¹ and Badin Damrongsak^{2*}

¹Department of Physics, Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

²Engineering Physics Research Group, Department of Physics, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakorn Pathom 73000, Thailand

*Corresponding author. E-mail: badin@su.ac.th

ABSTRACT

A prototype microfluidic system for fluorescence detection is presented in this paper. The system consists of an excitation light source, a polymer-based microfluidic channel and an optical detector. Experiments are conducted to demonstrate use of the developed system for fluorescence detection in chemical applications. Three fluorescent dyes – Rhodamine 6G, Coumarin 153 and DCM – with different concentrations ranging from 100 nM to 5 mM are used as the analyte in the experiments. Relationship between the photo-response of the microfluidic system and concentration of fluorescent dyes is investigated. The results are compared to that obtained from a bulk system where the analyte under test is dispensed into a standard-size cuvette. In the bulk system, we found a decrease in the fluorescence signal when dye concentration is higher than 10⁻⁵ M for Rhodamine 6G and 10⁻⁴ M for Coumarin 153 and DCM. This is probably due to the re-absorption and self-quenching phenomena, which result in low quantum yield of fluorescent dyes at high concentration. However, this problem is not found in microfluidic systems with a low detection volume. In addition, the relationship between the photo-response of the system corresponding to different dye concentrations was modeled based on Beer Lambert's law. The measured results agreed well with the theoretical model.

Keywords: Fluorescence detection, Lab-on-a-chip, Chemical sensor, Optical detection system

INTRODUCTION

Fluorescence detection is a reliable and highly sensitive technique for measuring toxic heavy metal contamination (e.g., mercury, cadmium and lead) in the ambient environment (Basabe-Desmonts et al., 2007; Demchenko, 2009; Liu et al., 2010). Commercially available fluorescence systems are typically bulky and expensive, so inconvenient for on-site measurement, which requires small devices. For this reason, considerable research has focused on developing compact and low-cost fluorescence detection systems (Kou et al., 2009; Banerjee

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

et al., 2010; Zhang et al., 2011). In recent decades, because of their portability and miniaturization, which enables them to work with small amounts of volume/sample, microfluidic systems have attracted interest in a variety of fields, including biology, chemistry and physics. The fabrication of microfluidic devices is relatively simple and cheap; thus, making such devices an ideal choice as portable sensors to detect toxic heavy metals.

In this paper, we present the development and characterization of a prototype microfluidic system for fluorescence detection. The diagram of the prototype microfluidic system is shown in Figure 1. A high power LED is used as a main light source, instead of a tungsten lamp or a laser, thus making the system more compact and inexpensive. This system is similar to previous work developed by Banerjee et al. (2010), in which two polarizers were used to remove the unwanted light emitted by the light source. However, with such a system, the fluorescence signal was partly absorbed by a polarizer. Instead, in this study, a long-pass filter is used to eliminate only the unwanted light from the LED light source that has overlapped with the fluorescence spectrum of the dyes.

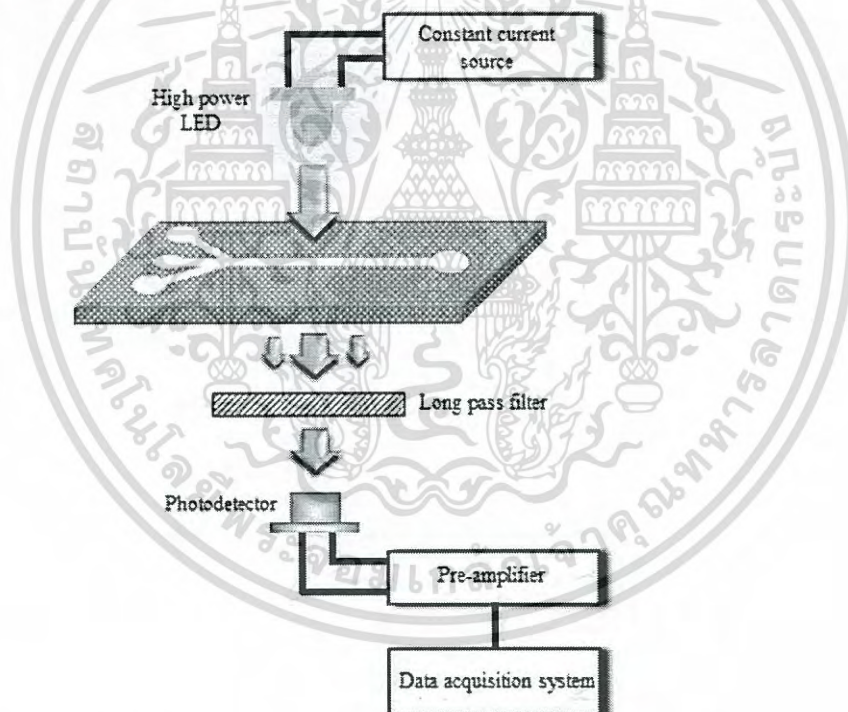


Figure 1. Diagram of a prototype microfluidic system for fluorescence detection.

In addition, a theoretical model is developed to investigate the relationship between the photo-response of the microfluidic system and concentration of fluorescent dyes. Fabrication of a microfluidic channel is described. Experiments are performed and results are then compared with the developed theoretical model.

THEORETICAL BACKGROUND

A theoretical model based on Beer Lambert’s law is developed in order to calculate the output of a prototype microfluidic system corresponding to different dye concentrations. First, when the light with the excitation power P_0 travels through a microchannel containing dye solution, the transmitted power P_T can be expressed using Beer Lambert’s law (Banerjee et al., 2010) as:

$$P_T = P_0 e^{-\alpha(\lambda)x} \tag{1}$$

where x is the optical path length through the dye solution and $\alpha(\lambda)$ is the absorption coefficient.

The power that is absorbed by fluorescence dye can then be calculated using Equation (2):

$$P_A = P_0 - P_T = P_0 \left(1 - e^{-\alpha(\lambda)x}\right) \tag{2}$$

where P_A is the absorbed power.

When a dye is illuminated by the excitation light, it emits photons at a longer wavelength with a power P_F . The amount of emitted fluorescence power is proportional to the absorbed power and the fluorescence quantum yield ϕ_F , which can be given by:

$$P_F = \phi_F P_A = \phi_F P_0 \left(1 - e^{-\alpha(\lambda)x}\right) \tag{3}$$

The fluorescence quantum yield is the ratio of the amount of emitted light over that of absorbed light.

In our microfluidic system, the emission light is observed through a long pass filter that suppresses the excitation wavelength. Therefore, only some emitted fluorescence can reach a photodetector. The output photocurrent I_{photo} is then proportional to the responsivity of the photodetector itself, and the amount of emitted fluorescence reaching the photodetector, which can be given as:

$$I_{photo} = R(\lambda) T_{filter} \phi_{CE} P_F \tag{4}$$

where $R(\lambda)$ is the wavelength dependent responsivity of the photodetector, T_{filter} is the transmittance of the long pass filter and ϕ_{CE} is the collection efficiency, which is the ratio of the amount of collected fluorescence over total emission fluorescence.

Replacing the fluorescence-emitted power from Equation (3) into (4), we have:

$$I_{photo} = R(\lambda) T_{filter} \phi_{CE} \phi_F P_0 \left(1 - e^{-\alpha(\lambda)x}\right) \tag{5}$$

For the sake of simplification, some term is combined into a single lumped parameter K , called a K-factor. The K-factor depends on the responsivity of the photodetector, the filter transmittance, the collection efficiency of the system, the fluorescence quantum yield and the excitation power:

$$I_{photo} = K \left(1 - e^{-\alpha(\lambda)x} \right) \quad (6)$$

where $K = R(\lambda)T_{filter}P_0\phi_{CE}\phi_F$.

In chemistry, the absorption coefficient is proportional to the molar absorptivity $\varepsilon(\lambda)$ and the concentration c of a chemical species as:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda)c \quad (7)$$

Hence, the output photocurrent as a function of concentration can be written as:

$$I_{photo}(c) = K \left(1 - e^{-\varepsilon(\lambda)cx} \right) \quad (8)$$

Equation (8) is used for fitting experimental data for all experiments in this paper.

MATERIALS AND METHODS

Fabrication of microfluidic channels

Microfluidic channels used in this experiment were fabricated in house using the process flow described in Rujihan et al. (2012). First, the master mold of the desired pattern was fabricated using printed circuit board technology. The next step, called replica molding, used poly-dimethylsiloxane (PDMS) as a starting material. This PDMS part was used to create microfluidic devices. The last step is PDMS-glass bonding. Before bonding, holes were drilled manually in PDMS for fluidic connections. Surface treatment using oxygen plasma was used to clean both PDMS and the glass slide. Immediately after plasma treatment, PDMS is placed into contact with the glass slide to complete the bonding.

Experimental setup

Experiments were conducted to study the relationship between the photo-response of the microfluidic system and concentration of fluorescent dyes. Three fluorescent dyes – Coumarin 153, DCM and Rhodamine 6G (Rh6G) – with different concentrations ranging from 100 nM to 1 mM were used as the analyte in the experiments. In this study, a high-power LED was used as the excitation light source. It was chosen in such a way that its peak wavelength and the absorption spectra of the fluorescence dyes overlapped. Therefore, a UV LED with a peak wavelength of 396 nm was used as the excitation light for Coumarin 153, a blue LED with a peak wavelength of 451 nm for DCM dye and a green LED with a peak wavelength of 396 nm for Rh6G. Emission fluorescence was then observed by (1) a spectrophotometer (Avantes) in order to study the emitted spectra of

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

fluorescence dyes and (2) a silicon photodetector (Roithner Laser) in order to study the corresponding photocurrent as a function of dye concentration.

Figures 2 and 3 show the diagram of the experimental setup for fluorescence spectroscopy measurement when the sample is contained in a standard-size cuvette and a microfluidic channel, respectively. The investigation of the photocurrent in response to the variation of dye concentration was carried out using the experimental setup shown in Figure 1.

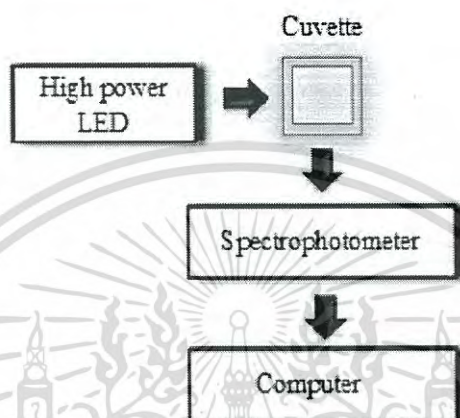


Figure 2. Diagram of the experimental setup for fluorescence spectroscopy measurement when sample is in a cuvette holder.

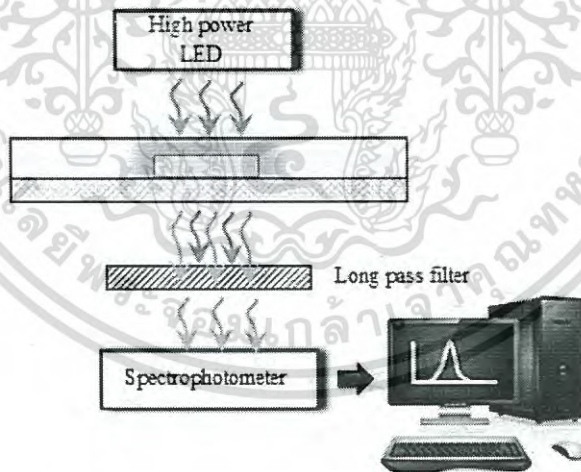


Figure 3. Diagram of the experimental setup for fluorescence spectroscopy measurement with a microfluidic channel.

RESULTS AND DISCUSSION

The emission spectra of fluorescence dyes (Coumarin 153, DCM and Rh6G) corresponding to different dye concentrations varying from 10^{-7} to 10^{-3} M are shown in Figures 3, 4 and 5, respectively. In the bulk system, we found a decrease in the fluorescence signal when dye concentration is about 1mM. This

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

is probably due to the re-absorption and self-quenching phenomena, which result in low quantum yield of fluorescent dyes at high concentration. However, this problem is not found in microfluidic systems with a low detection volume; thus, giving it a dynamic range greater than the bulk system.

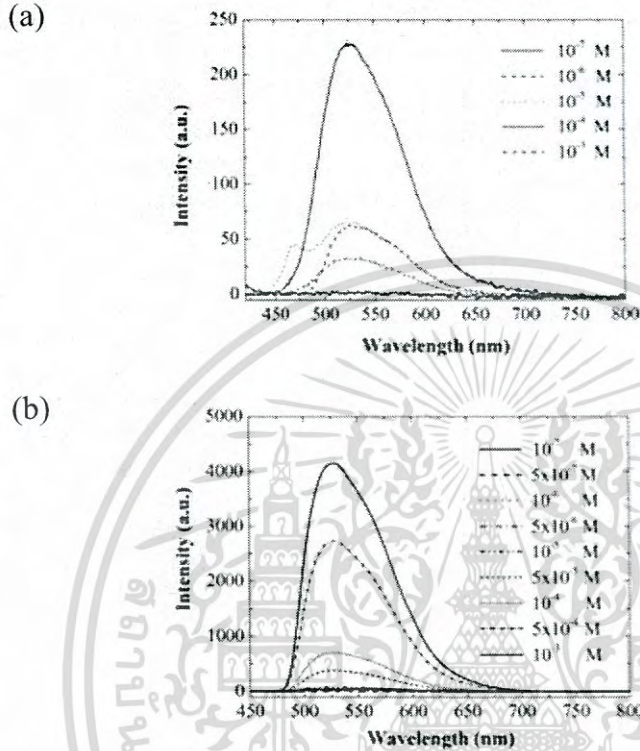


Figure 4. Fluorescence spectra of Coumarin 153 dyes in ethanol solution with different concentrations. The solution is contained in (a) a cuvette holder and (b) a microfluidic channel.

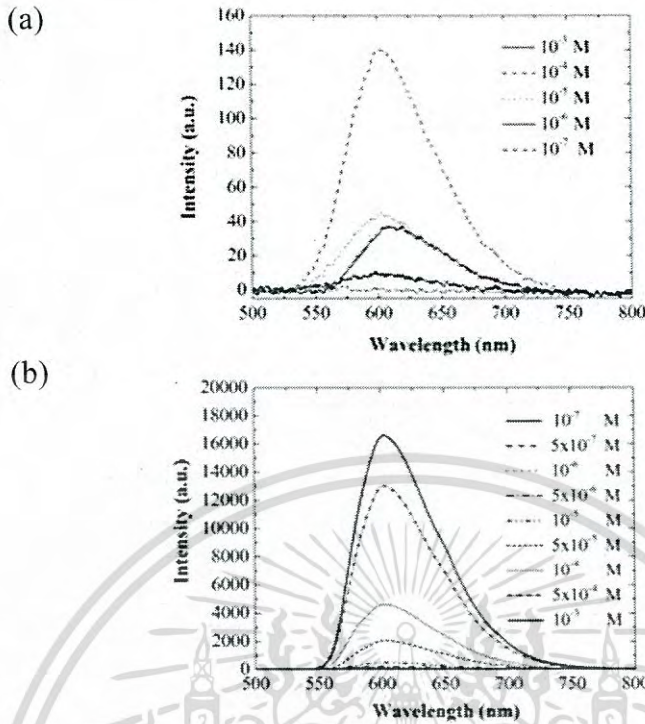


Figure 5. Fluorescence spectra of DCM dyes in ethanol solution with different concentrations. The solution is contained in (a) a cuvette holder and (b) a microfluidic channel.

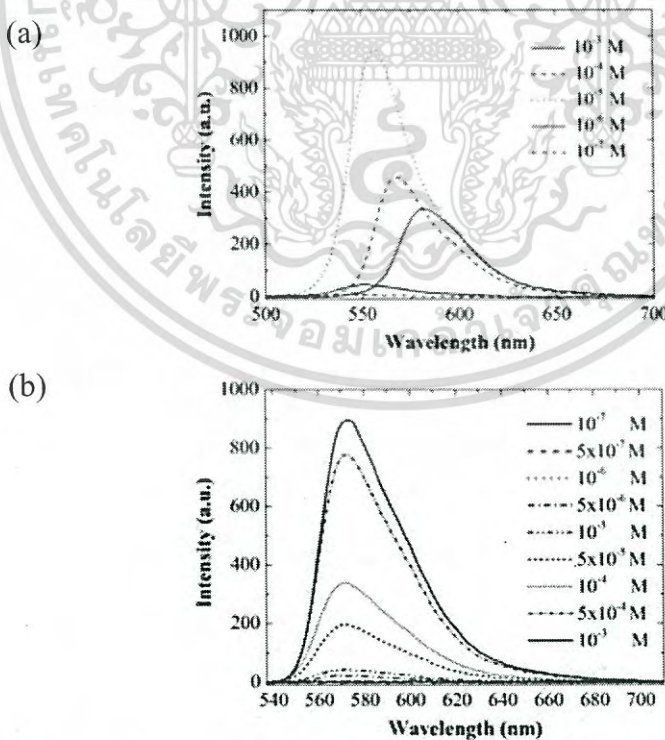


Figure 6. Fluorescence spectra of Rh6G dyes in ethanol solution with different concentrations. The solution is contained in (a) a cuvette holder and (b) a microfluidic channel.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

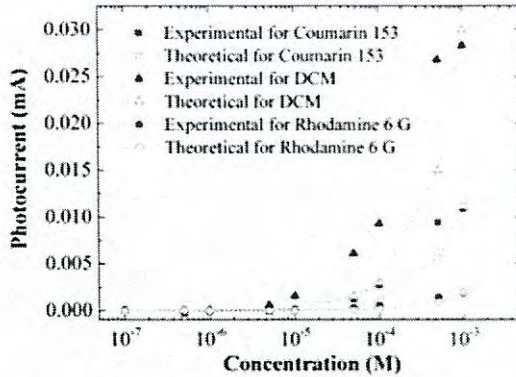


Figure 7. Experimental results and theoretical model of the photocurrent corresponding to different dye concentrations.

The relationship between the output (photocurrent) of the prototype microfluidic system and various dye concentrations was investigated using the experimental setup shown in Figure 1. The experimental results for all three fluorescence dyes are shown in Figure 7. Using Equation (8), a theoretical model was fit to the experimental data. The optical path x is measured from the height of the microchannel, which is equal to $70 \mu\text{m}$. The molar absorptivity $\epsilon(\lambda)$ was taken from the standard value (PhotochemCAD package, version 2.1a) at the excitation wavelength. K-parameters were chosen in such a way that the R^2 value of the trend line was very close to 1. Fit parameters are shown in Table 1.

Table 1. Fit parameters for each fluorescence dye.

Dyes	K	ϵ ($\times 10^5$)	R^2
Coumarin 153	8.00	1.16	0.89
DCM	10.20	2.00	0.81
Rh6G	0.24	4.20	0.91

CONCLUSION

A prototype microfluidic system for fluorescence-based heavy metal detection in the ambient environment was developed and characterized. The results obtained from the prototype microfluidic system show a higher dynamic range than that of the bulk system. This is due to the re-absorption and self-quenching found in the bulk system. In addition, the relationship between the photo-response of the system corresponding to different dye concentrations was modeled based on Beer Lambert's law. The measured results agreed well with the theoretical model.

ACKNOWLEDGMENTS

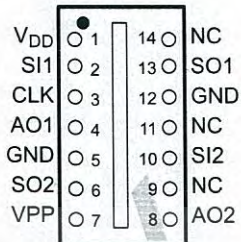
The authors gratefully acknowledge Dr. Sirapat Pratontep at the College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for assistance with oxygen plasma treatment. We also would like to thank the Faculty of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for financial support.

REFERENCES

- Banerjee, A., et al. 2010. Concentration Dependence of Fluorescence Signal in a Microfluidic Fluorescence Detector. *Journal of Luminescence* 130: 1095–1100. DOI: 10.1016/j.jlumin.2010.02.002
- Basabe-Desmots, L., et al. 2007. Design of Fluorescent Materials for Chemical Sensing. *Chem. Soc. Rev.* 36: 993. DOI: 10.1039/b609548h
- Demchenko, A.P. 2009. *Introduction to Fluorescence Sensing*. Springer, New York. DOI 10.1007/978-1-4020-9003-5
- Kou, S., et al. 2009. Microfluidic Detection of Multiple Heavy Metal Ions Using Fluorescent Chemosensors. *Bull. Korean Chem. Soc.* 30: 1173. DOI: 10.5012/bkcs.2009.30.5.1173
- Liu, H., et al. 2010. Rhodamine-based Ratiometric Fluorescence Sensing for the Detection of Mercury(II) in Aqueous Solution. *Talanta* 81: 433. DOI: 10.1016/j.talanta.2009.12.020
- Rujihan, S., et al. Low-cost Fabrication of Masters for Plastic-based Microfluidic Devices. In *Proceeding of 7th annual conference of Thai Physics Society, SPC2012, May 9-12, 2012, Ayutthaya, Thailand.*
- Zhang, D., et al. 2011. Microfabrication and Applications of Opto-Microfluidic Sensors. *Sensors* 11: 5360. DOI: 10.3390/s110505360

- 256 × 1 Sensor-Element Organization
- 400 Dots-Per-Inch (DPI) Sensor Pitch
- High Linearity and Low Noise for 256 Gray-Scale Applications
- Output Referenced to Ground
- Low Image Lag . . . 0.5% Typ
- Operation to 2 MHz
- Single 5-V Supply

(TOP VIEW)



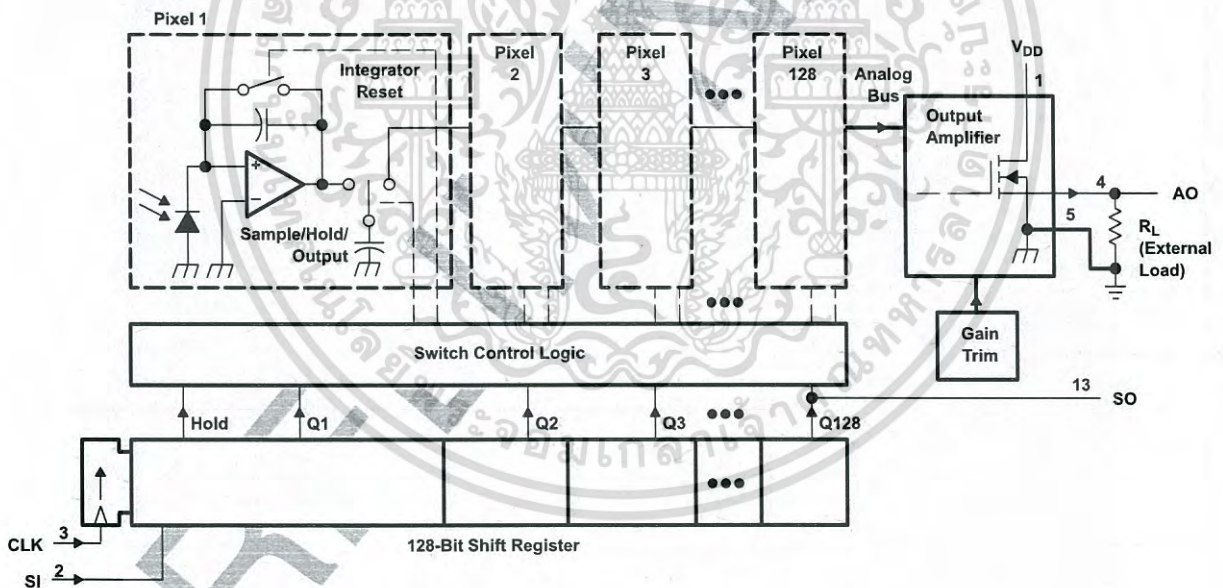
NC – No internal connection

description

The TSL1402 linear sensor array consists of two sections of 128 photodiodes each and associated charge amplifier circuitry, aligned to form a contiguous 256 × 1 pixel array. The device incorporates a pixel data-hold function that provides simultaneous integration start and stop times for all pixels. The pixels measure 63.5 μm by 55.5 μm, with 63.5-μm center-to-center spacing and 8-μm spacing between pixels. Operation is simplified by internal logic requiring only a serial-input pulse (SI) and a clock.

The TSL1402 is intended for use in a wide variety of applications including mark and code reading, OCR and contact imaging, edge detection and positioning, and optical encoding.

functional block diagram (each section – pin numbers apply to section 1)



TSL1402

256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

Terminal Functions

TERMINAL NAME	NO.	DESCRIPTION
AO1	4	Analog output of section 1
AO2	8	Analog output of section 2
CLK	3	Clock. Clk controls charge transfer, pixel output, and reset.
GND	5,12	Ground (substrate). All voltages are referenced to GND.
NC	9, 11, 14	No internal connection
SI1	2	Serial input (section 1). SI1 defines the start of the data-out sequence for section 1.
SI2	10	Serial input (section 2). SI2 defines the start of the data-out sequence for section 2.
SO1	13	Serial output (section 1). SO1 provides a signal to drive the SI2 input (in serial connection).
SO2	6	Serial output (section 2). SO2 provides a signal to drive the SI input of another device for cascading or as an end-of-data indication.
V _{DD}	1	Supply voltage. Supply voltage for both analog and digital circuitry.
V _{PP}	7	Connected to GND

detailed description

device operation (assumes serial connection)

The sensor consists of 256 photodiodes, called pixels, arranged in a linear array. Light energy impinging on a pixel generates photocurrent, which is then integrated by the active integration circuitry associated with that pixel.

During the integration period, a sampling capacitor connects to the output of the integrator through an analog switch. The amount of charge accumulated at each pixel is directly proportional to the light intensity on that pixel and the integration time.

The output and reset of the integrators is controlled by a 256-bit shift register and reset logic. An output cycle is initiated by clocking in a logic 1 on SI1. An internal signal, called Hold, is generated from the rising edge of SI1 and simultaneously transmitted to sections 1 and 2. This causes all 256 sampling capacitors to be disconnected from their respective integrators and starts an integrator reset period. As the SI pulse is clocked through the shift register, the charge stored on the sampling capacitors is sequentially connected to a charge-coupled output amplifier that generates a voltage on analog output AO. Simultaneously, during the first 18 clock cycles, all pixel integrators are reset, and the next integration cycle begins on the 19th clock. On the 128th clock rising edge, the SI pulse is clocked out on the SO1 pin (section 1) and becomes the SI pulse for section 2 (SI2). The rising edge of the 129th clock cycle terminates the SO1 pulse, and returns the analog output AO1 of section 1 to high-impedance state. Analog output AO2 now becomes the active output. As in section 2, SO2 is clocked out on the 256th clock pulse. Note that a 257th clock pulse is needed to terminate the SO2 pulse and return AO2 to the high-impedance state.

AO is driven by a source follower that requires an external pulldown resistor. When AO is not in the output phase, it is in a high-impedance state. The output is nominally 0 V for no light input and 2 V for a nominal white level output, with a nominal full-scale (saturation) voltage of 3 V.

The TSL1402 can be connected in the serial mode, where it takes 256 clocks to read out all pixels, or in the parallel mode where it takes 128 clocks to read out all pixels (see application section).

TSL1402

256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

absolute maximum ratings†

Supply voltage, V_{DD}	7 V
Digital output voltage range, V_O	-0.5 V to $V_{DD} + 0.5$ V
Digital output current range, I_O	-10 mA to 10 mA
Digital input current range, I_I	-20 mA to 20 mA
Operating free-air temperature range, T_A	0°C to 70°C
Storage temperature range, T_{stg}	-25°C to 85°C
Lead temperature 1,6 mm (1/16 inch) from case for 10 seconds	260°C

† Stresses beyond those listed under "absolute maximum ratings" may cause permanent damage to the device. These are stress ratings only, and functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated under "recommended operating conditions" is not implied. Exposure to absolute-maximum-rated conditions for extended periods may affect device reliability.

recommended operating conditions (see Figure 1 and Figure 2)

	MIN	NOM	MAX	UNIT	
Supply voltage, V_{DD}	4.5	5	5.5	V	
Input voltage, V_I	0		V_{DD}	V	
High-level input voltage, V_{IH}	$V_{DD} \times 0.7$		V_{DD}	V	
Low-level input voltage, V_{IL}	0		$V_{DD} \times 0.3$	V	
Wavelength of light source, λ	400		1000	nm	
Clock frequency, f_{clock}	5		2000	kHz	
Sensor integration time, t_{int}	Serial connection	0.1195	5	100	ms
	Parallel connection	0.0555	5	100	
Setup time, Serial input, $t_{su}(SI)$	20			ns	
Hold time, serial input, $t_h(SI)$ (see Note 1)	0			ns	
Operating free-air temperature, T_A	0		70	°C	

NOTE 1: SI must go low before the rising edge of the next clock pulse.

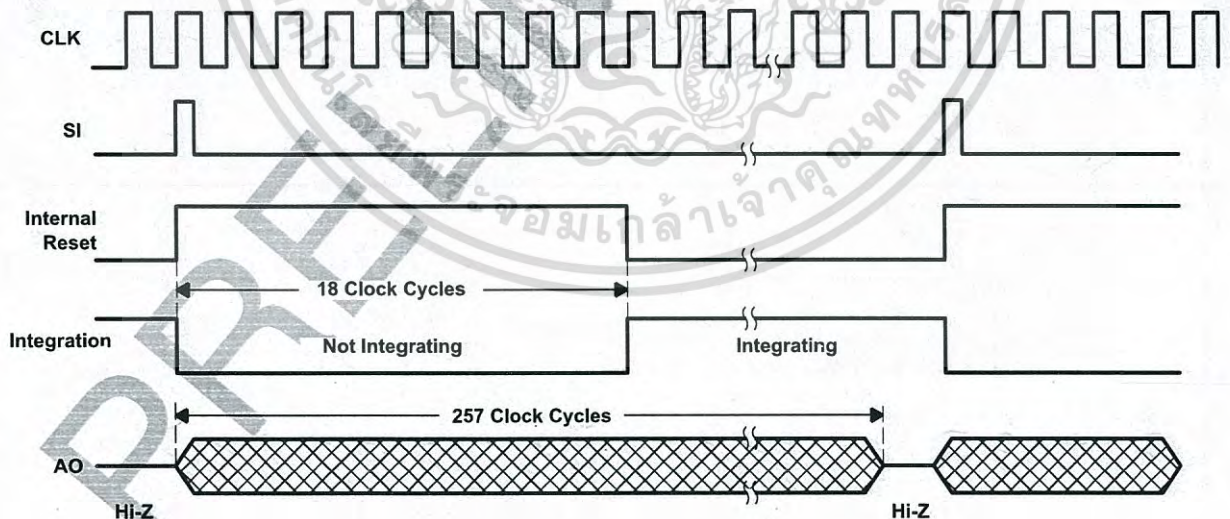


Figure 1. Timing Waveforms (Serial Connection)

TSL1402

256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

electrical characteristics at $f_{\text{clock}} = 200 \text{ kHz}$, $V_{\text{DD}} = 5 \text{ V}$, $T_{\text{A}} = 25^{\circ}\text{C}$, $\lambda_{\text{p}} = 565 \text{ nm}$, $t_{\text{int}} = 5 \text{ ms}$, $R_{\text{L}} = 330 \ \Omega$, $E_{\text{e}} = 14 \ \mu\text{W}/\text{cm}^2$ (unless otherwise noted) (see Note 2)

PARAMETER	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
Analog output voltage (white, average over 256 pixels)		1.8	2	2.2	V
Analog output voltage (dark, average over 256 pixels)	$E_{\text{e}} = 0$	0	0.1	0.2	V
PRNU Pixel response nonuniformity	See Note 3			±10%	
Nonlinearity of analog output voltage	See Note 4		±0.4%		
Output noise voltage	$E_{\text{e}} = 0$, See Note 5		1		mVrms
Saturation exposure	See Note 6	95.5	121.5		nJ/cm ²
Analog output saturation voltage		3	3.5		V
DSNU Dark signal nonuniformity	All pixels, $E_{\text{e}} = 0$, See Note 7		0.04	0.12	V
IL Image lag	See Note 8		0.5%		
I_{DD} Supply current	$R_{\text{L}} = 330 \ \Omega$		5	8	mA
I_{IH} High-level input current	$V_{\text{I}} = V_{\text{DD}}$			10	μA
I_{IL} Low-level input current	$V_{\text{I}} = 0$			10	μA
C_{i} Input capacitance			10		pF

- NOTES:
- Clock duty cycle is assumed to be 50%.
 - PRNU is the maximum difference between the voltage from any single pixel and the average output voltage from all pixels of the device under test when the array is uniformly illuminated.
 - Nonlinearity is defined as the maximum deviation from a best-fit straight line over the dark-to-white irradiance levels, as a percent of analog output voltage (white).
 - RMS noise is the standard deviation of a single-pixel output under constant illumination as observed over a 5-second period.
 - Saturation exposure is calculated using the maximum responsivity and minimum output saturation voltage figures.
 - DSNU is the difference between the maximum and minimum of dark-current voltage.
 - Image lag is a residual signal left in a pixel from a previous exposure. It is defined as a percent of white-level signal remaining after a pixel is exposed to a white condition followed by a dark condition:

$$IL = \frac{V_{\text{AO}} - V_{\text{AO(dark)}}}{V_{\text{AO(white)}} - V_{\text{AO(dark)}}} \times 100$$

TSL1402 256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

operating characteristics over recommended ranges of supply voltage and operating free-air temperature unless otherwise noted (see Figure 2)

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$t_{pd(SO)}$	Propagation delay time, SO1, SO2			50		ns
t_w	Clock high or low			50		ns
t_s	Analog output settling time to $\pm 1\%$	$R_L = 330 \Omega, C_L = 50 \text{ pF}$		350		ns

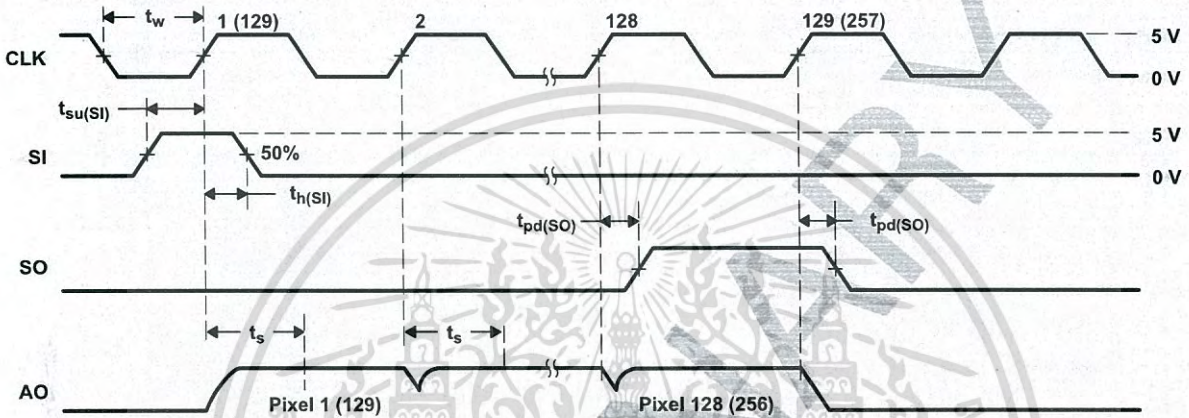


Figure 2. Operational Waveforms (each section)

TSL1402
256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

APPLICATION INFORMATION

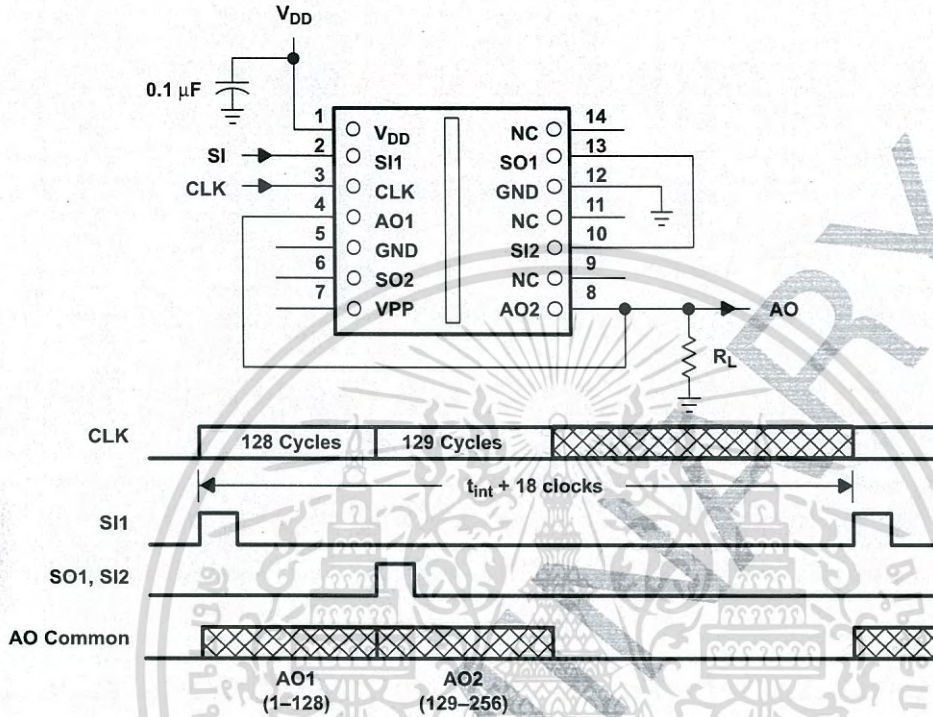


Figure 3. Serial Connection

TSL1402 256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

APPLICATION INFORMATION

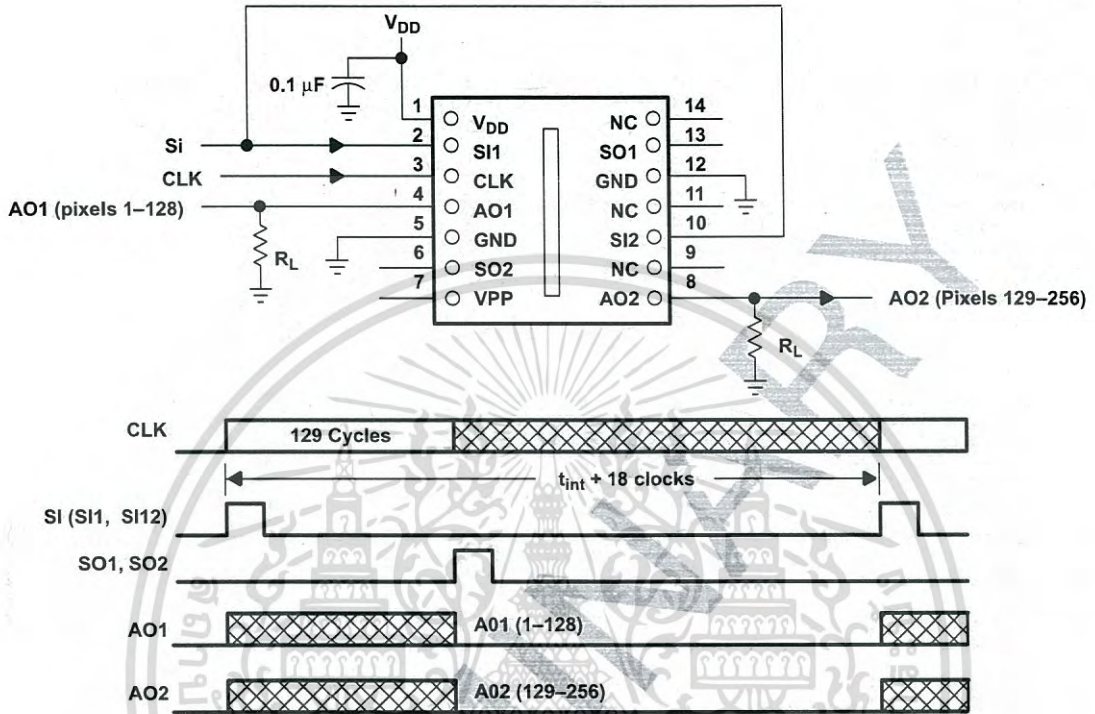


Figure 4. Parallel Connection

TSL1402
256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

TYPICAL CHARACTERISTICS

PHOTODIODE SPECTRAL RESPONSIVITY

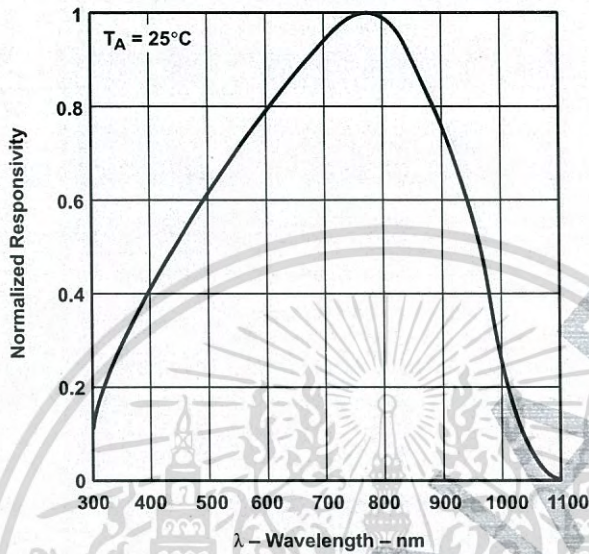


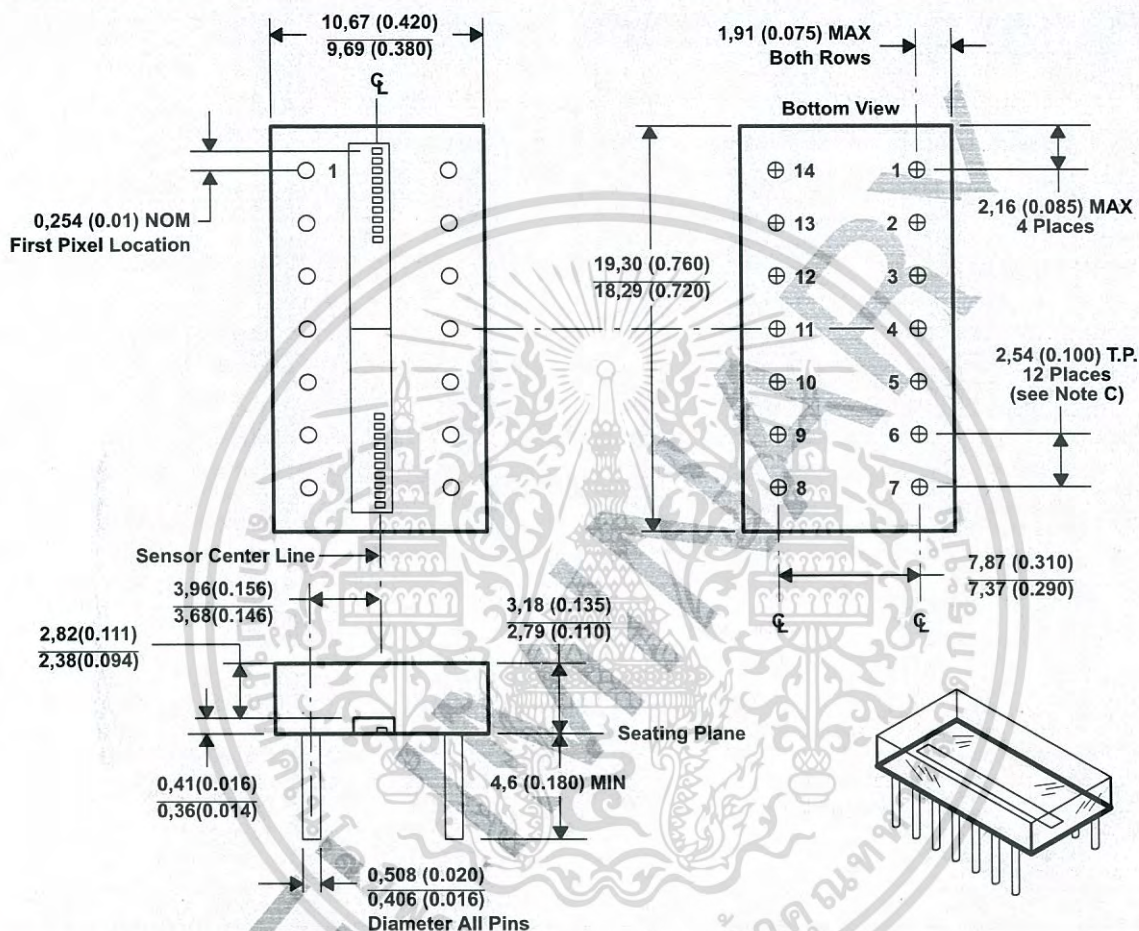
Figure 5

TSL1402 256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD

TAOS002 – MAY 1999

MECHANICAL INFORMATION

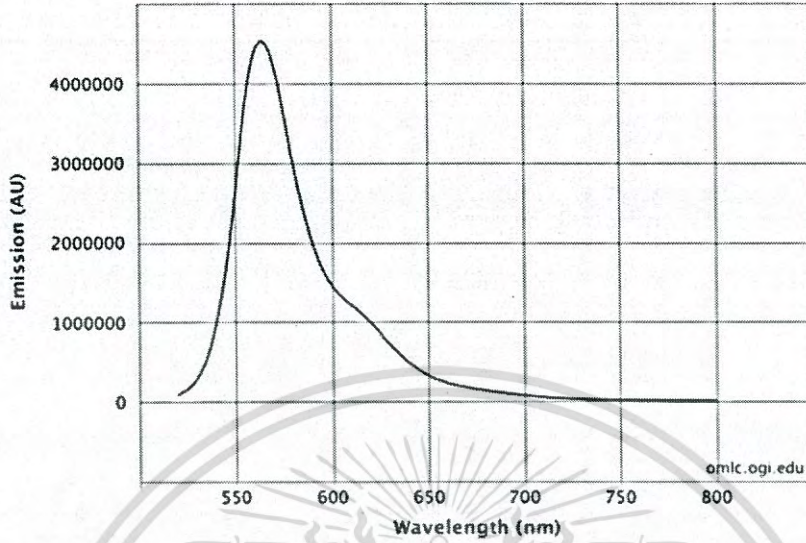
This assembly consists of a sensor chip mounted on a printed-circuit board in a clear molded plastic package. The distance between the top surface of the package and the surface of the sensor is nominally 1 mm (0.040 inch).



- NOTES: A. All linear dimensions are in inches (millimeters).
 B. This drawing is subject to change without notice.
 C. The true-position spacing is 2.54 mm (0.100 inch) between lead centerlines. Each pin centerline is located within 0.25 mm (0.010 inch) of its true longitudinal positions.
 D. Index of refraction of mold compound = 1.5
 E. Designation per JEDEC Std. 30: PDIP-T14

Figure 6. Clear Molded Plastic Package

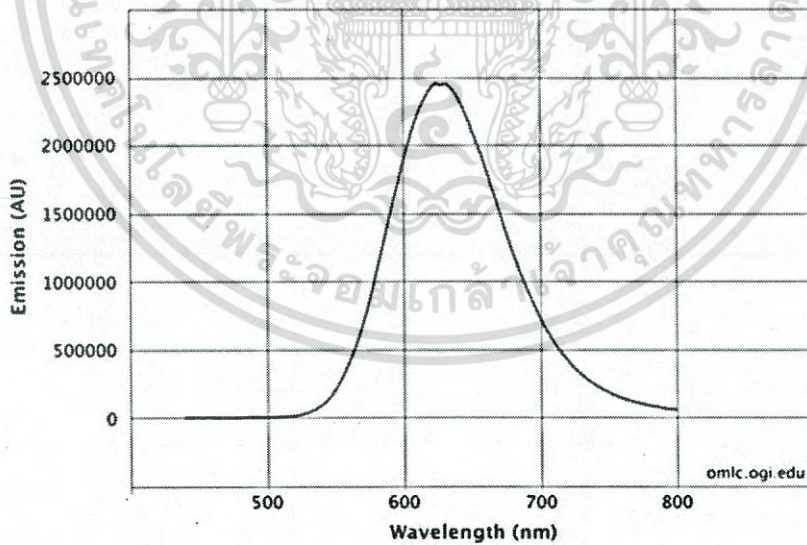
Rhodamine B in ethanol



รูปที่ กราฟสเปกตรัมของสารละลายโรดามีนบีในเอทานอล

จากแหล่งข้อมูล <http://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/index.html>

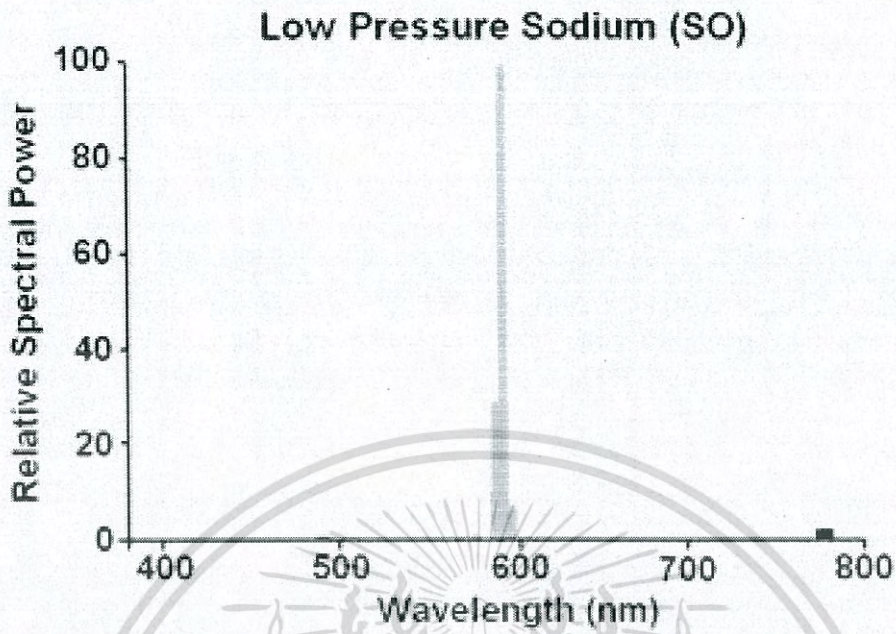
methylene)-2-methyl-6-(p-dimethylaminostyryl)-4H-pyran, [DCM] i



รูปที่ กราฟสเปกตรัมของสารละลายดีซีเอ็มในเมทานอล

จากแหล่งข้อมูล <http://omlc.org/spectra/PhotochemCAD/index.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ กราฟสเปกตรัมของหลอดแสงโซเดียม

จากแหล่งข้อมูล https://en.wikipedia.org/wiki/Sodium-vapor_lamp

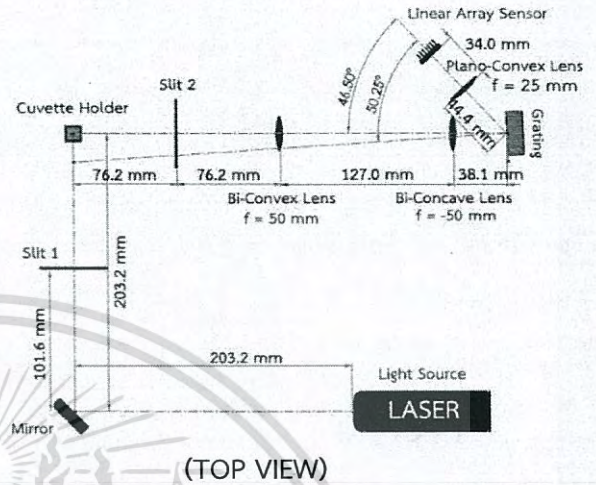
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Photoluminescence Spectroscopy System

Description

A Photoluminescence spectroscopy system. This system were made for measure a luminescence of sample in visible light and use LASER to excitation. The light that emission will be parallel light by collimator. So the light will turn to spectrum by grating. Spectrum band of sample is recorded by Linear array sensor. Sensor was performed on Arduino Microcontroller. Real time monitoring on User Interface and calculate by Excel Program.



Specification	
Lightsource	He:Ne Laser 633 nm Laser Diode 405±10 , 532±10 nm
Grating	1400 Groove/mm (d= 714.285714 nm)
Wavelength Range	404.53-739.36 nm
Resolution	1.31 nm
Output Signal	Digital Serial Data
Output Baud Rate	9600 (Real-time Mode) 115200 (Raw Data Mode)
Output Connector	USB Cable
Spectral Responsivity	

(TSL1402 256 × 1 LINEAR SENSOR ARRAY WITH HOLD Datasheet, 1999 Texas Advanced Optoelectronic Solutions, Inc.)

NOTE: Encoding model (PL-yy-xxx) » yy is Solidy generation, xxx is Calibration times



Physics Department, Science faculty King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

physics.kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OPTICAL AND COMMUNICATION LABORATORY

Photoluminescence Spectroscopy

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษากระบวนการโฟโตลูมิเนสเซนซ์
2. วัดสเปกตรัมการวาวแสงของสารตัวอย่าง

ทฤษฎี

ลูมิเนสเซนซ์ (Luminescence)

การเปล่งแสงแบบลูมิเนสเซนซ์เกิดจากการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนเปลี่ยนสถานะจากระดับพลังงานที่สูงลงมาสู่ระดับพลังงานที่ต่ำกว่า ปรากฏการณ์นี้เกิดได้ทั้งในวัสดุก๊าซ ของเหลว และของแข็ง ทั้งวัสดุอินทรีย์และอนินทรีย์ วิธีการกระตุ้นให้พลังงานแก่วัสดุมีหลายวิธี ชนิดของลูมิเนสเซนซ์จะแบ่งตามวิธีการกระตุ้นพลังงานให้แก่วัสดุ ดังนี้

ตารางที่ 1 ตารางแสดงชนิดและวิธีการกระตุ้นพลังงานในกระบวนการลูมิเนสเซนซ์

ชนิดของลูมิเนสเซนซ์	วิธีการกระตุ้น
Photoluminescence (PL) - Stokes type - Anti-Stokes type	แสง
Electroluminescence (EL) - Intrinsic EL - Carrier Injection EL	ไฟฟ้า
Cathodeluminescence	อิเล็กตรอน
Thermoluminescence	ความร้อน
Triboluminescence	การเสียดสี
Chemical luminescence	ปฏิกิริยาเคมี
X-ray luminescence	รังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence, PL)

โฟโตลูมิเนสเซนซ์เป็นกระบวนการที่อะตอมหรืออิเล็กตรอนไปสู่สถานะกระตุ้นและกลับสู่สถานะพื้น (Excitation-De excitation Process) โดยมีโฟตอนกระตุ้นให้เกิดอันตรกิริยา คือ มีการดูดกลืน โฟตอนและให้โฟตอนออกมา

กระบวนการการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์

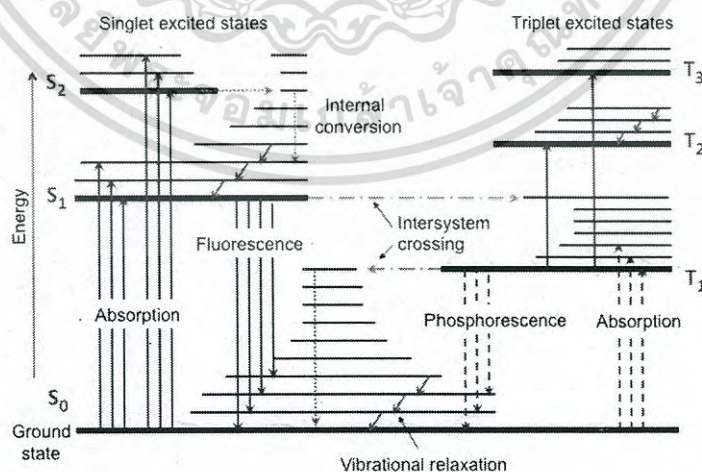
1. กระบวนการกระตุ้น (Excitation)

เมื่อโมเลกุลดูดกลืนรังสีของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า โมเลกุลจะขึ้นไปอยู่ที่สถานะกระตุ้น (Excitation- state) และจะมีกลไกในการลดระดับพลังงานลงสู่สถานะพื้นดั้งเดิม (De excitation state)

2. กระบวนการลดระดับพลังงาน (De excitation)

เมื่อโมเลกุลถูกกระตุ้นไปสู่สถานะกระตุ้น (Excitation state) การที่โมเลกุลจะกลับลงมาสู่สถานะพื้นนั้นจะมีกลไกต่างๆ เกิดขึ้นหลายขั้นตอน ถ้าโมเลกุลที่อยู่ S_2 จะมีระดับพลังงานของการสั่นลดต่ำลงมา (Vibrational Relaxation, VR) อยู่ในระดับเดียวกับพลังงานของการสั่นที่สูงของ excited singlet แรก S_1 นั่นคือ S_2 มีพลังงานต่ำกลายเป็น S_1 พลังงานสูง (Internal Conversion, IC) กระบวนการลดพลังงานของ VR และ IC เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว (ประมาณ 10^{-12} วินาที) โดยไม่มีการแผ่รังสี เมื่อโมเลกุลลงสู่ระดับพลังงาน S_1 จะเกิดการลดระดับพลังงานไปสู่ S_0 โดยมีการให้โฟตอน เรียกว่า ฟลูออเรสเซนซ์ (Fluorescence) ซึ่งเกิดรวดเร็วมาก (ประมาณ 10^{-9} - 10^{-7} วินาที)

ในกรณีที่โมเลกุลกำลังอยู่ในสถานะกระตุ้น อิเล็กตรอนตัวหนึ่งอาจเกิดหมุนกลับทาง (Reverse spin) ทำให้ค่า M มีค่าเป็น 3 โมเลกุลนั้นจะถูกเปลี่ยนจาก singlet state ไปเป็น triplet state โดยกระบวนการการเกิดนี้ไม่มีการให้รังสีออกมา (Intersystem crossing, ISC) และเกิดกระบวนการลดระดับพลังงานจาก T_1 ไปยัง S_0 โดยได้โฟตอนเกิดขึ้นเรียกว่า ฟอสฟอเรสเซนซ์ (Phosphorescence)



รูปที่ 1 แผนภาพระดับพลังงานจาบลอนสกี (Jablonski) แสดงกระบวนการเกิดการกระตุ้นเนื่องจากดูดกลืนพลังงานและกระบวนการแผ่รังสี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

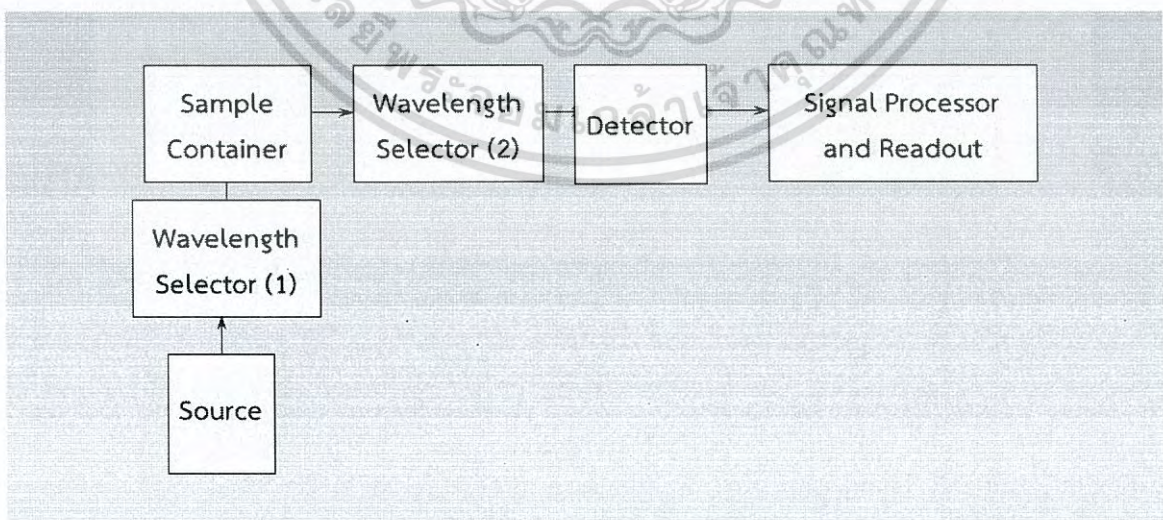
2.2 ระบบสเปกโทรสโกปี

สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) แต่เดิมหมายถึงการศึกษาปฏิกิริยาระหว่างการแผ่รังสีกับสสารในรูปของฟังก์ชันความยาวคลื่น (λ) สเปกโทรสโกปีจะอ้างถึงการกระเจิงของแสงที่ตามองเห็นตามขนาดความยาวคลื่นของมัน เช่น การกระเจิงของแสงผ่านปริซึม ต่อมาหลักการนี้ได้ขยายออกไปครอบคลุมการวัดปริมาณใดๆ ที่อยู่ในรูปฟังก์ชันของทั้งความยาวคลื่นและความถี่ ดังนั้นมันจึงเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของสนามหรือความถี่ (ν) ด้วย ขอบเขตการศึกษาขยายไปครอบคลุมเรื่องของพลังงาน (E) ในฐานะตัวแปร ทั้งนี้เนื่องมาจากความสัมพันธ์กันระหว่างพลังงานและความถี่ ตามสมการ $E = h\nu$ (h ในที่นี้คือ ค่าคงที่ของพลังค์) การพล็อตค่าที่ได้จากฟังก์ชันความยาวคลื่นหรือความถี่นี้เรียกชื่อกันว่าเป็น สเปกตรัม (Spectrum)

การศึกษาสเปกโทรสโกปี มักใช้ในการวิเคราะห์เคมีและเคมีกายภาพ เพื่อใช้ในการระบุถึงส่วนประกอบของสสาร โดยดูจากเส้นสเปกตรัมที่สสารนั้นแผ่ออกมาหรือถูกดูดกลืนเข้าไป

ส่วนประกอบพื้นฐานของเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ (analytical instrument) การปลดปล่อยพลังงาน การดูดกลืนพลังงานและ การวัดการเรืองแสงไม่ว่าจะเป็นเครื่องมือที่ออกแบบสำหรับใช้กับแสงยูวี(Ultraviolet Light, UV) แสงที่ตามองเห็น (Visible Light) หรือรังสีอินฟราเรด (Infrared Radiation, IR) จึงมักเรียกว่าเครื่องมือวัดทางแสง (optical instrument) แม้ว่าจะใช้สำหรับช่วงความยาวคลื่นที่ตามองไม่เห็นประกอบด้วย 5 ส่วน

1. แหล่งกำเนิดแสงที่มีความเสถียรภาพด้านพลังงาน
2. ส่วนที่ใช้ในการแยกความยาวคลื่น
3. ภาพขณะบรรจूसารตัวอย่าง
4. ตัวตรวจรู้ (Sensor) และ ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) ซึ่งเปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นสัญญาณที่สามารถวัดได้โดยปกติจะเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า
5. ส่วนประมวลผลและแสดงผล



รูปที่ 2 ส่วนประกอบของระบบสเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

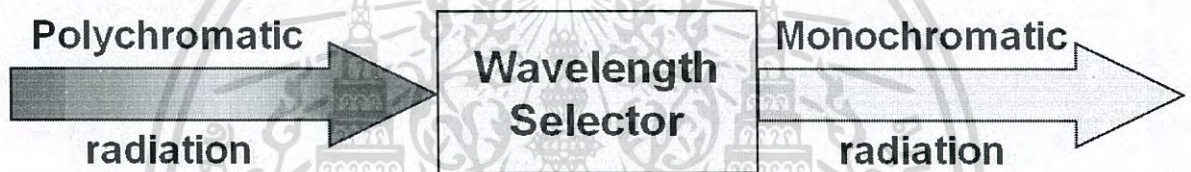
แหล่งกำเนิดแสง

ในระบบออปติกคอลสเปกโทรสโกปี (Optical spectroscopy) ใช้ทั้ง Continuous Sources และ Line sources

1. Continuous Sources ให้รังสีแบบต่อเนื่องในช่วงที่ต้องการ ใช้ในกระบวนการดูดกลืนแสงของโมเลกุล (Molecular absorption methods)
2. Line Sources ใช้ในการเรืองแสงและการวัดการดูดกลืนแสงระดับอะตอมนอกจากนี้ยังใช้ในรามานสเปกโทรสโกปี (Raman spectroscopy) รีแฟรกโทเมทรี (Refractometry) และ โพลาริเมทรี (Polarimetry)

ส่วนที่ใช้ในการเลือกแสง (Wavelength Selector)

ทำหน้าที่แยกรังสีหลายความยาวคลื่น (Polychromatic radiation) ให้เป็นรังสีความยาวคลื่นเดียว (Monochromatic radiation)



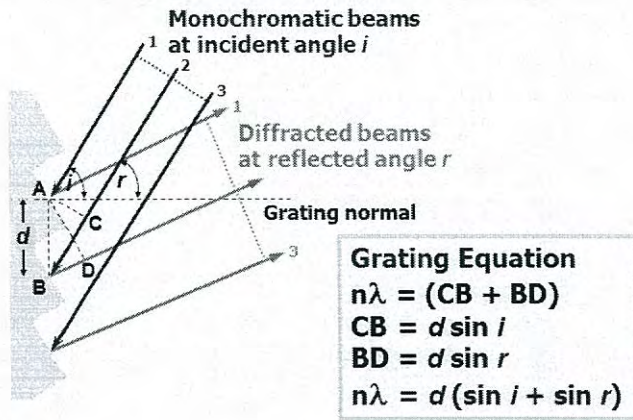
รูปที่ 3 แสดงการทำงานของส่วนที่ใช้ในการเลือกแสง

เกรตติง (Grating)

เกรตติงแยกแสงโดยอาศัยหลักการแทรกสอดเสริมและการแทรกสอดหักล้างของรังสี เกรตติงที่ใช้ในช่วงยูวีถึงช่วงที่ตามองเห็นมักมี 300 - 2000 ช่อง/mm ที่นิยมใช้ที่สุดคือเกรตติงที่มี 1200 - 1400 ช่อง/mm

Echelle Grating

เป็นเกรตติงแบบสะท้อน (Reflection grating) ชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมาก ช่องด้านหนึ่งมีหน้ากว้างและอีกด้านหนึ่งหน้าแคบ การสะท้อนแสง (Reflection) จะเกิดขึ้นที่หน้ากว้าง อาจถือว่าแต่ละพื้นผิวของเกรตติง (Board face) เป็นจุดกำเนิดของลำแสง ให้ลำแสงสะท้อน (Reflected beam) 1, 2, 3 ซึ่งแทรกสอดซึ่งกันและกัน ถ้าจะให้เกิดระยะทางของการแทรกสอดของแสง (Constructive interference path lengths) ต้องต่างกันเป็นจำนวน n เท่าของ ความยาวคลื่นของแสงตกกระทบ (Wavelength of incident beam)



รูปที่ 4 ลำดับการเลี้ยวเบนของแสงจากเกรตติง

เมื่อลำแสงขนานของรังสีความยาวคลื่นเดี่ยวตกกระทบบนเกรตติงที่มีมุมตกกระทบบน i กับเส้นปกติของเกรตติง จะเกิดการเลี้ยวเบน (Diffraction) ของแสงเนื่องจากเกรตติงสะท้อนแสง

การเลี้ยวเบนของลำแสง (Diffracted beam) อาจเกิดการแทรกสอด (Interference) ซึ่งกันและกัน การแทรกสอดเสริม (Constructive interference) จะสูงสุดที่มุมสะท้อน r ซึ่งสัมพันธ์กับความยาวคลื่น (λ)

ตั้งสมการ $n\lambda = d(\sin i + \sin r)$ (สมการที่ 2.2)

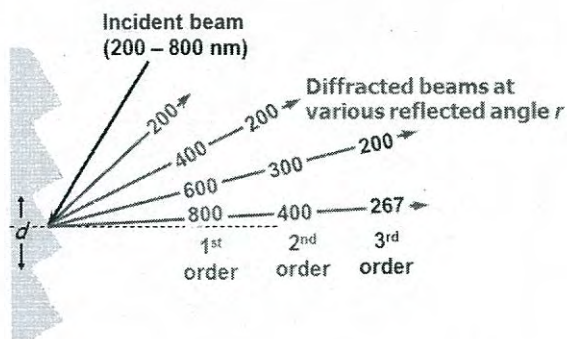
เมื่อ $n =$ ลำดับการเลี้ยวเบน (Diffraction order) $= \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$

$d =$ ระยะระหว่างพื้นผิวที่เกิดการสะท้อน

$i =$ มุมตกกระทบบน (Incident angle)

$r =$ มุมสะท้อน (Reflected angle)

จากสมการ $n\lambda = d(\sin i + \sin r)$ แสดงว่า มีความยาวคลื่นหลายค่าสำหรับมุมเลี้ยวเบน r แต่ละค่า เช่น ถ้าพบลำดับแรกของการเลี้ยวเบน [First-order line ($n = 1$)] ความยาวคลื่น 800 nm ที่มุม r จะพบลำดับที่สองของการเลี้ยวเบน [Second-order (400 nm)] และลำดับที่สามของการเลี้ยวเบน [Third-order (267 nm) lines] ที่มุมนี้ด้วย

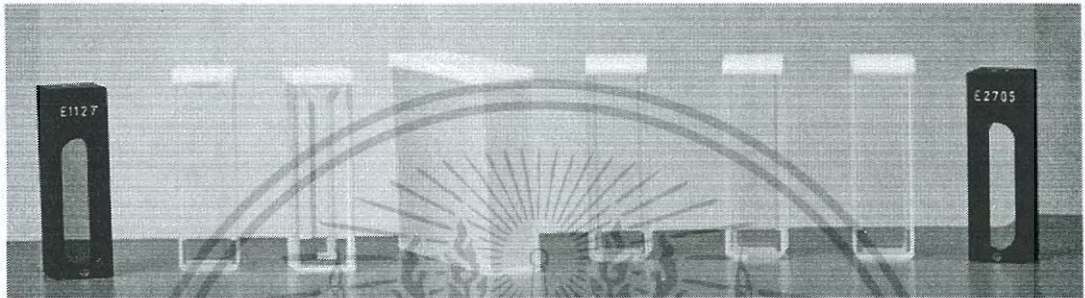


รูปที่ 5 การพิจารณาลำดับการเลี้ยวเบนของแสงจากเกรตติงเพียงลำดับเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คิวเวทท์ (Cuvette)

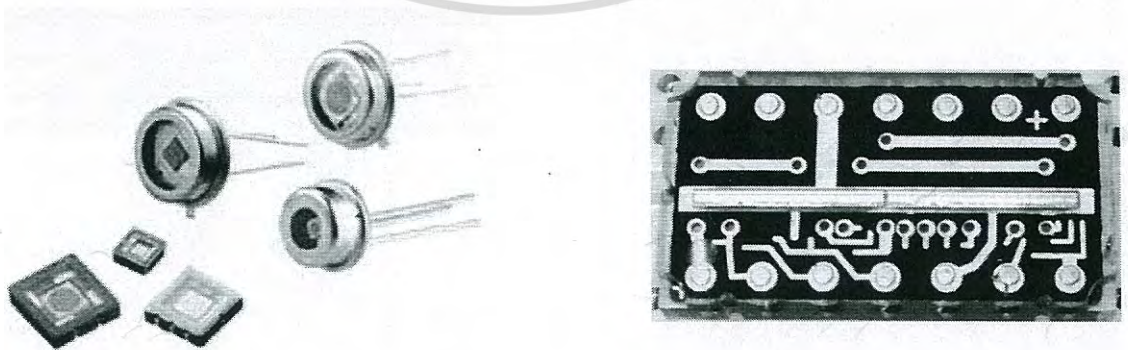
คิวเวทท์ที่ใช้มีทั้งชนิดทรงกระบอก และชนิดสี่เหลี่ยม คิวเวทท์ชนิดสี่เหลี่ยมมีความเหมาะสมในการใช้งานมากกว่า เนื่องจากลดการกระเจิงของแสงตกกระทบ (Light scattering) ได้มากกว่าคิวเวทท์ชนิดกลม คิวเวทท์ที่ทำจากควอตซ์สามารถใช้งานได้ในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 190 นาโนเมตรขึ้นไป จนถึง 2,700 นาโนเมตร คิวเวทท์ที่ทำจากแก้วชนิดบอโรซิลิเกต (Borosilicate glass) สามารถใช้งานได้เมื่อแสงตกกระทบมีความยาวคลื่นมากกว่า 320 นาโนเมตรขึ้นไป จนถึง 2,500 นาโนเมตร คิวเวทท์พลาสติกสามารถใช้งานได้ในช่วงคลื่น แต่ต้องระวังการมีสารรบกวนแสงที่เจือปนอยู่ ซึ่งอาจทำให้เกิดการรบกวนในบางช่วงคลื่นของการวัดแสง



รูปที่ 6 คิวเวทท์รูปแบบต่างๆ

อุปกรณ์ตรวจจับแสง (Photodetectors)

ในการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของแสง เริ่มต้นจากการค้นพบทฤษฎีโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟ็ค (Photoelectric effect) ที่กล่าวได้เบื้องต้นคือ เมื่อโลหะได้รับพลังงานโฟตอนที่มีขนาดมากกว่าหรือเท่ากับระดับพลังงานของโลหะนั้นๆ จะทำให้อิเล็กตรอนของโลหะนั้นอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้น จากทฤษฎีนี้ ทำให้เกิดการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจับแสง เช่น โฟโตไดโอดสุญญากาศ (Vacuum photodiode) และหลอดโฟโตมัลติพลีเออร์ (Photo multiplier tube) นอกจากนี้ การศึกษาคุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำยังทำให้เกิดการพัฒนาของอุปกรณ์ตรวจจับแสงขึ้นอีก เช่น P-N junction diode, PIN diode และ Avalanche photodiode



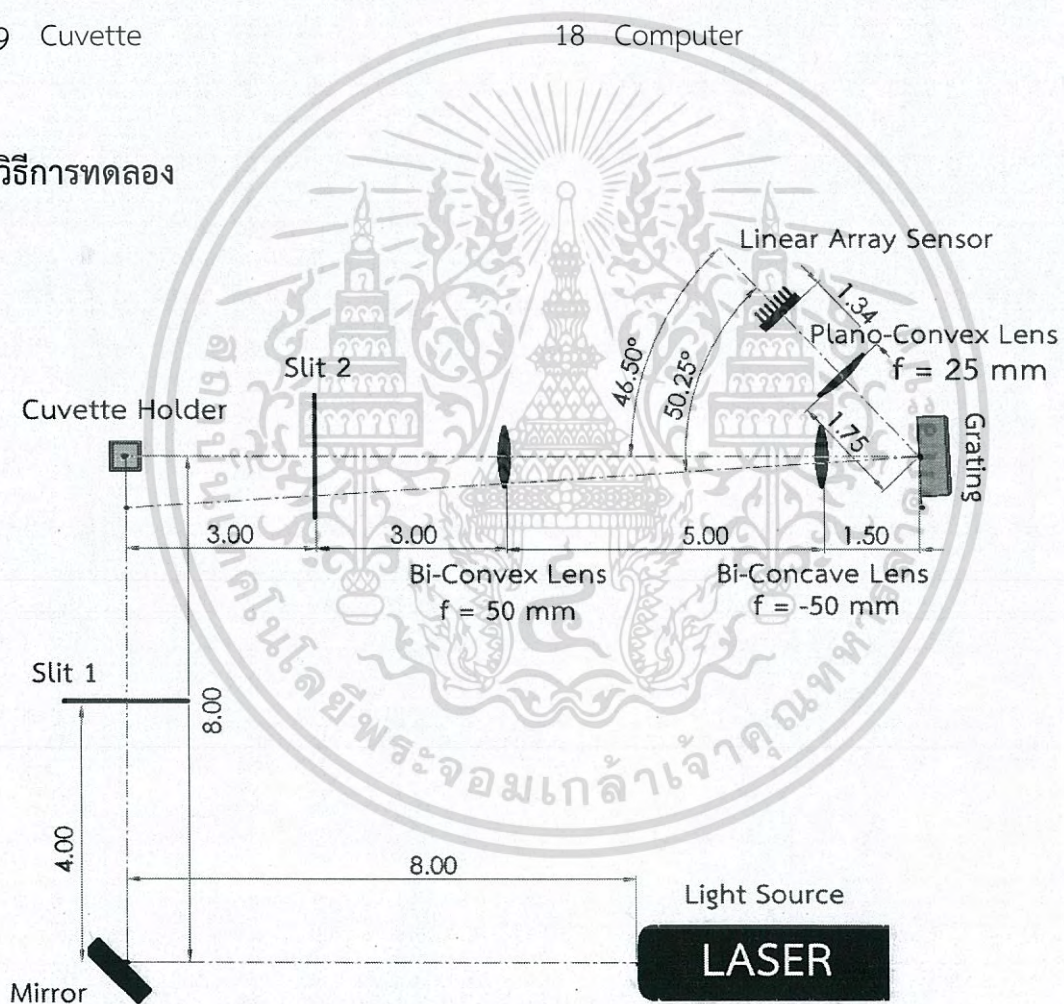
รูปที่ 7 อุปกรณ์ตรวจจับแสง และ(ขวา) Linear Array Sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วัสดุและอุปกรณ์

- | | |
|-------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Performance Breadboard | 10 Bi-Convex Lens, $f = 50.0$ mm |
| 2 He: Ne LASER | 11 Bi-Concave Lens, $f = -50.0$ mm |
| 3 Green Diode LASER | 12 Plano-Convex Lens, $f = 25.0$ mm |
| 4 Blue Diode LASER | 13 Lens Tubes |
| 5 Mirror | 14 Extension Tube Slip Ring |
| 6 Kinematic Mirror Mount | 15 Grating |
| 7 Adjustable Mechanical Slits | 16 Linear Array Sensor TSL1402R |
| 8 Optical Post | 17 Arduino UNO R3 |
| 9 Cuvette | 18 Computer |

วิธีการทดลอง



รูปที่ 8 การจัดระบบโฟโตนิกส์เลนส์สเปกโทรสโกปี

1. เตรียมสารละลาย
2. นำสารละลาย ใส่คิวเวทท์และปิดด้วยเทปกาว (Sealing Film)
3. นำคิวเวทท์ไปวางที่แท่นวางคิวเวทท์ (Cuvette Holder)
4. ใช้เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสงในการกระตุ้นสารละลายให้เปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. เชื่อมต่อระบบ LPA เข้ากับคอมพิวเตอร์
6. บันทึกผลการทดลองในแบบ Real Time Mode (โดยการจับภาพหน้าจอ) และ Raw Data Mode (กราฟในรูปแบบโปรแกรม Excel)

วิธีการใช้งานโปรแกรม

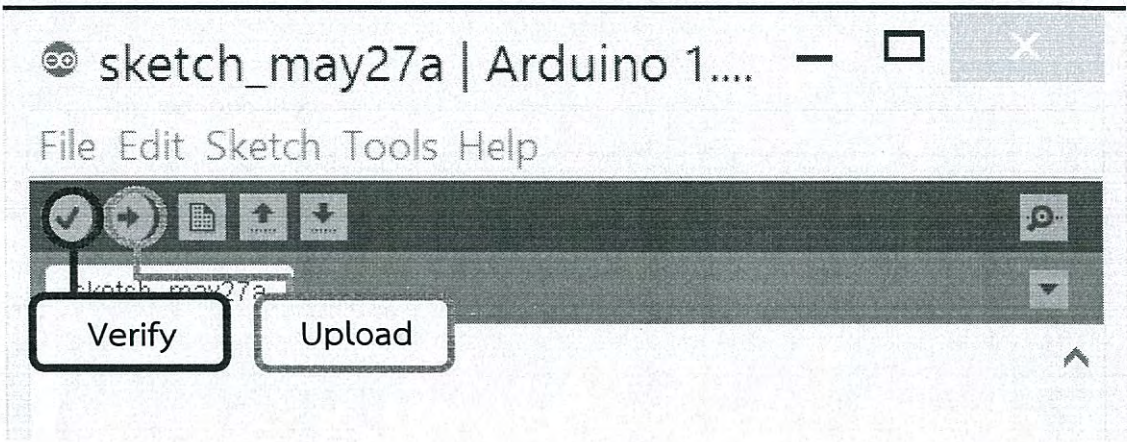
- Real Time Mode

1. เปิดโปรแกรม Arduino-1.0.6
2. เปิดไฟล์โปรแกรม PL LAB > MODEL PL-31-003 > CODE MODEL PL-31-003 > PL-Driver_Real-mode_PL-31-003_Arduino
3. ปรับ Speed Shutter ในโปรแกรมย่อยสุดท้าย
4. กดปุ่ม Verify และ Upload
5. เปิดโปรแกรม Processing-2.2.1
6. เปิดไฟล์โปรแกรม PL LAB > MODEL PL-31-003 > CODE MODEL PL-31-003 > PL-Monitor_PL-31-003_Processing
7. กดปุ่ม Run
8. เมื่อได้กราฟที่ต้องการ กดปุ่ม Print screen

- Raw Data Mode

1. เปิดโปรแกรม Arduino-1.0.6
2. เปิดไฟล์โปรแกรม PL LAB > MODEL PL-31-003 > CODE MODEL PL-31-003 > PL-Driver_Raw-Data-mode_PL-31-003_Arduino
3. ปรับ Speed Shutter ในโปรแกรมย่อยสุดท้าย
4. คลิก Verify และ Upload
5. Copy ข้อมูลใน Wavelength of Pixels ลงในโปรแกรม notepad (เพื่อใช้เป็นแกนความยาวคลื่น)
6. คลิก Tools > Serial Monitor
7. รอให้โปรแกรมเก็บค่าทั้งหมด 5 ครั้ง
8. Copy ข้อมูลบน Serial Monitor ลงในโปรแกรม notepad (บรรทัดต่อมา)
9. Save ข้อมูลโดยใช้นามสกุลของไฟล์เป็น .csv
10. เปิดไฟล์ดังกล่าวด้วยโปรแกรม Excle

NOTE: ห้าม Save โปรแกรมทับไฟล์เดิมเด็ดขาด



รูปที่ 9 หน้าต่างโปรแกรม Arduino-1.0.6



รูปที่ 10 หน้าต่างโปรแกรม Processing-2.2.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้