

ระบบวัดสีของวัตถุ



นางสาว ดรีงดา พูนเกษม
นางสาว รังสิมา สุขวัฒน์
นางสาว ศศิ รักใคร่

โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์

คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2543

รพ. / ๐๓/๑๖๘ / ๘๕๒๓

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 40206

วัน, เดือน, ปี 20 ต.ค. 2544

b..... 11092486

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Color Measurement System



A Special Project Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirement for the Degree of Bachelor of Science
Department of Applied Physics
Faculty of Science
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ

ระบบวัดสีของวัตถุ

โดย

น.ส. ตรึงตา พูนเกษม รหัส 40054015

น.ส. รังสิมา สุขวัฒน์รหัส 40054041

น.ส. ศศิรักโคร์ รหัส 40054050

ภาควิชา

ฟิสิกส์ประยุกต์

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. สุวรรณ คูสำราญ

ผศ. อนุพงศ์ สรงประภา

ดร. จิติ หนูแก้ว

ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง อนุมัติให้โครงการพิเศษฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

(ผศ. วิชาญ เตชิตธีระ)

หัวหน้าภาค

คณะกรรมการโครงการพิเศษ

(อ.วิชาญ เพชรภา)

ประธานกรรมการ

(รศ. สุวรรณ คูสำราญ)

กรรมการ

(ผศ.ดร. จิติ หนูแก้ว)

กรรมการ

(อ. สหรัย คุณีพงศ์)

กรรมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อภินันท์ จินดาจิธาวัฒน์
(อ. ภูมิินทร์ จินดาจิธาวัฒน์)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ	ระบบวัดสีของวัตถุ		
โดย	น.ส. ตรึงตา	พูนเกษม	รหัส 40054015
	น.ส. รังสิมา	สุขวัฒน์	รหัส 40054041
	น.ส. ศศิ	รักใคร่	รหัส 40054050
ภาควิชา	ฟิสิกส์ประยุกต์		
อาจารย์ที่ปรึกษา	รศ. สุวรรณ	คุณำราญ	
	ผศ. อนุพงศ์	สรงประภา	
	ผศ.ดร. จิติ	หนูแก้ว	
ปีการศึกษา	2543		

บทคัดย่อ

สีต่างๆ ที่เรามองเห็นนั้นประกอบไปด้วยองค์ประกอบสีพื้นฐาน 3 สีคือ สีแดง เขียว และน้ำเงิน ในสัดส่วนค่าต่างๆ กันไป ดังนั้นในการที่จะจำแนกหรือระบุสีของวัตถุให้ถูกต้อง ก็ควรจะบอกค่าออกมาเป็นสัดส่วนขององค์ประกอบสีดังกล่าว ซึ่งในโครงการพิเศษนี้จะทำการวัดสีของวัตถุต่างๆ ด้วยวิธีดังกล่าว ซึ่งทำได้โดยการใช้ Si PIN diode s7505 ของบริษัทฮามามัตซี ซึ่งภายในมีตัวกรองแสงสีปฐมภูมิอยู่เป็นตัวตรวจวัด ซึ่งค่าที่ได้ออกจะมาเป็นสัดส่วนของสีองค์ประกอบ 3 สีดังกล่าว และในส่วนของ การแสดงผลทางหน้าจอและภาคการคำนวณ จะใช้โปรแกรม visual basic ในการประมวลผล

Special project title	Colos Measurement System	
Name	Miss Trungta	Poonkasem
	Miss Rangsimma	Sukhawat
	Miss Sasi	Rukkrai
Special Project Adviser	Assoc. Prof. Suwan	Kusamran
	Asst. Prof. Anupong	Srongprapa
	Asst.Dr. Jiti	Nukeaw
Department	Applied Physics, King Mongkut's Institute of Technology Lardkrabang	
Academic Year	2000	

Abstract

All color consists of three primary color which are red, green and blue . Thus, the correct and appropriate way to specify color of colored object is measuring the portion of these three primary color. Photodetector, Si PIN photodiode s7505 is used in this project, within this photodetector is set three primary color filter. As the output of the photodetector provides the value of each primary color. And in the display section, visual basic program is required to calculate and display on the monitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เนื่องด้วยความอนุเคราะห์จากหลายฝ่ายด้วยกัน ดังนี้

บิดามารดา และผู้ปกครอง	ผู้ให้กำเนิด ให้กำลังใจและความห่วงใยเสมอมา
รองศาสตราจารย์ สุวรรณ คุณสำราญ	ผู้ให้การสั่งสอน ถ่ายทอดวิชาความรู้ในเรื่องเกี่ยวกับแสง และให้คำแนะนำต่างๆ เสมอมา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ อนุพงศ์ สรงประภา และ ผศ.ดร.จิตติ หนูแก้ว	สำหรับความรู้ และความช่วยเหลือในเรื่องอุปกรณ์ในการทำงาน และให้คำปรึกษา
พี่อไมท์	สำหรับคำแนะนำและช่วยเหลืออุปกรณ์ในการทำงาน
คณาจารย์ทุกท่าน	ผู้ถ่ายทอดวิชาความรู้มาโดยตลอด
ห้องปฏิบัติการทางอิเล็กทรอนิกส์	สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับโครงการพิเศษ
ห้องสมุดวิทยาศาสตร์	เป็นแหล่งค้นคว้าเพิ่มเติม
เพื่อนๆ ทุกคน	ผู้ให้กำลังใจ และความช่วยเหลือต่างๆ เป็นอย่างดี
ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์	ที่ให้สิ่งดีๆ มาโดยตลอด 4 ปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อปัญหาพิเศษภาษาไทย	ก
บทคัดย่อปัญหาพิเศษอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญ	ง
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักเกณฑ์ที่เกี่ยวข้อง	3
2.1 ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีการวัดสี	3
2.2 ระบบการวัดสี	10
2.3 ตัวตรวจวัดสีในระบบ	17
2.4 วงจรขยาย	26
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	31
3.1 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการศึกษา	31
3.2 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการทดลอง	31
3.2.1 การจัดอุปกรณ์ในการทดลอง	32
3.2.2 วิธีการทดลอง	34
บทที่ 4 ผลการทดลอง	38
4.1 ผลการทดลองจากการใช้ RGB color sensor ในการจำแนกสี	39
4.2 กราฟแสดงผลการทดลอง	75
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	88
ภาคผนวก ก	
โปรแกรมที่ใช้งาน	
ภาคผนวก ข	
วงจรที่ใช้งาน	
ข้อมูลของ RGB color sensor	
ข้อมูลของ LF 412A	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลของ CD4066BC

ข้อมูลของ 89C51

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 แสดงการรับรู้สีของมนุษย์	3
รูปที่ 2.2 แสดง spectrum ของรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า	4
รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายพลังงานของแสงแดด บริเวณต่างๆ	5
รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสง ชนิดต่างๆ	5
รูปที่ 2.5 แสดงปรากฏการณ์การ scattering และการ absorption	6
รูปที่ 2.6 แสดงปรากฏการณ์เมื่อแสงส่องกระทบวัตถุ ต่างชนิดกัน	7
รูปที่ 2.7 แสดงภาคตัดขวางของตามนุษย์	8
รูปที่ 2.8 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิด แสงมาตรฐาน CIE ต่างๆกัน	9
รูปที่ 2.9 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D55, D65 และ D75	9
รูปที่ 2.10 แสดง reflectance curve ของวัสดุสีต่างๆ	10
รูปที่ 2.11 แสดงการทดลองหาปริมาณการตอบสนองของตามนุษย์ ต่อแสงสีแดง เขียว และน้ำเงิน โดยการเทียบสี	12
รูปที่ 2.12 แสดง 2° , 10° 1964 CIE standard observer	12
รูปที่ 2.13 แสดงการมองวัตถุที่มุม 2° และ 10°	12
รูปที่ 2.14 แสดง CIE Tristimulus Value	13
รูปที่ 2.15 แสดง CIE Chromaticity Diagram	14
รูปที่ 2.16 แสดง MacAsdam Ellipse	15
รูปที่ 2.17 แสดง CIELAB 1976 ซึ่งแสดง L, a, b color space	16
รูปที่ 2.18 แสดงโครงสร้างและแถบพลังงานของ PIN Diode	17
รูปที่ 2.19 แสดงวงจรมูลของ Si Photodiode	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้.

รูปที่ 2.20	แสดงวงจรรขยายที่ใช้กับ PIN Photodiode	23
รูปที่ 2.21	แสดงวงจรรขยายที่ใช้กับ PIN Photodiode	25
รูปที่ 2.22	แสดงสัญลักษณ์ลักษณะของออปแอมป์	26
รูปที่ 2.23	แสดงการบ่อนกลับแบบลบ	27
รูปที่ 2.24	แสดงวงจรรขยายแบบไม่กลับเฟส	28
รูปที่ 2.25	แสดงรูป RGB color sensor	30
รูปที่ 3.1	Diagram ของระบบวัดสี	32
รูปที่ 3.2	การจัดอุปกรณ์ในการวัดองค์ประกอบสี	33
รูปที่ 3.3	แสดงระบบวัดสีของวัตถุ	33
รูปที่ 3.4	Interface Circuit	36
รูปที่ 4.1	กราฟค่าองค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิด Full Color LED เมื่อปรับให้แหล่งกำเนิดจ่ายแสงขาว	74
รูปที่ 4.2	แสดงกราฟการกระจายพลังงานของทั้งสแตนเมื่อใช้ RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจวัด	75
รูปที่ 4.3	แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงกับค่าองค์ประกอบสีของแสงที่วัดได้	76
รูปที่ 4.4	แสดงกราฟการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน	77
รูปที่ 4.5	แสดงแผนภูมิแท่งขององค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสแตน	78
รูปที่ 4.6	แสดงกราฟการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร	79
รูปที่ 4.7	แสดงการกระจายพลังงานของแสงที่ทะลุผ่าน Filter สีม่วง ที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร	80
รูปที่ 4.8	แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆที่ทะลุผ่าน	81
รูปที่ 4.9	แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่ทะลุผ่าน Filter สีเหลือง	82
รูปที่ 4.10	แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่ทะลุผ่าน Filter สีเขียว	83
รูปที่ 4.11	แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่ทะลุผ่าน Filter สีน้ำเงิน	84

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 แสดงแผนภูมิแท่งองค์ประกอบสีของแสงที่ทะลุผ่าน Filter แบบต่างๆ เมื่อใช้ ทั้งสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสง	85
รูปที่ 4.13 แสดงแผนภูมิขององค์ประกอบสีของแสงสีที่ได้จาก Full Color LED	86
รูปที่ 4.14 แสดงแผนภูมิแท่งขององค์ประกอบสีของแสงที่ทะลุผ่าน Filter สีต่างๆ	87



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบสี R G B ของแสงขาวจากหลอด full color	39
ตารางที่ 4.2 แสดงการกระจายพลังงานของแสงโดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เป็นเครื่องวัด	40
ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มของแสงที่สัมพันธ์กับค่าองค์ประกอบของสี	42
ตารางที่ 4.4 แสดงการกระจายพลังงานของแสงจากหลอดทั้งสแตน ที่ความยาวคลื่นต่างๆ	43
ตารางที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบสีของหลอดทั้งสแตน โดยใช้ RGB color sensorเป็นตัวตรวจวัด	45
ตารางที่ 4.6 แสดงการกระจายพลังงานของแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้ RGB เป็นตัวรับแสง	47
ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากระแสวัดด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ของแสงแต่ละสี ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ	62
ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและองค์ประกอบสีของ Filter สีต่างๆ เมื่อจัดการทดลองเป็นแบบสะท้อน	65
ตารางที่ 4.9 แสดงค่ากระแสและองค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง Full Color LED ซึ่งประกอบด้วย สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน	66
ตารางที่ 4.10 แสดงค่ากระแสและองค์ประกอบสีของ Filter สีต่างๆ เมื่อให้แหล่งกำเนิดแสงเป็นทั้งสแตน	68

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาของโครงการพิเศษ

ในปัจจุบันการจำแนกวัตถุต่าง ๆ นั้นสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งการจำแนกด้วยสีก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจ “เครื่องมือวัดสีหรือเครื่องมือเทียบสี” นับเป็นเทคโนโลยีที่สามารถเพิ่มศักยภาพในอุตสาหกรรมต่างๆ ดังนั้นโครงการนี้จึงได้เล็งเห็นความสำคัญของการจำแนกวัตถุด้วยสี ดังนั้นจึงได้ทำการศึกษาทดลองและพัฒนาการจำแนกโดยการเทียบสีของวัตถุ โดยการใช้ RGB color sensor แต่อย่างไรก็ตาม การที่จะสร้างเครื่องมือวัดหรือเทียบสีให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดนั้นควรจะต้องมีพื้นฐานความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีการวัดเทียบสี เพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ได้ถูกต้อง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1.2.1 เพื่อศึกษาข้อมูล รายละเอียดการใช้งานของ RGB color sensor
- 1.2.2 เพื่อศึกษาทฤษฎี การวัดค่าความแตกต่างของสี และตัวแปรที่ใช้ในการวัดค่าความแตกต่าง
- 1.2.3 เพื่อศึกษาถึงการเชื่อมต่อไมโครคอมพิวเตอร์และการส่งข้อมูลจากเครื่องมือวัดสีของวัตถุ โดยโปรแกรม Visual Basic

1.3 ขอบเขตการดำเนินงาน

ในขั้นแรกจะเป็นการศึกษาถึงทฤษฎีการวัดสี การวัดค่าความแตกต่างทางสี และตัวแปรที่ใช้วัดค่าความแตกต่าง ในขั้นที่สอง เป็นการศึกษาอุปกรณ์ที่ใช้จำแนกความแตกต่างของสี ซึ่งก็คือ RGB color sensor ในขั้นที่สามจะเป็นการทดสอบการจำแนกสีของวัตถุ ด้วยการวัดสีโดยการใช้ RGB color sensor และทำการเก็บข้อมูลเพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับค่ามาตรฐาน CIE อีกทั้งทำการศึกษาโปรแกรมเพื่อช่วยในการรับข้อมูลที่ได้จากการวัดค่าของ RGB color sensor และนำไปทำการคำนวณเปรียบเทียบการวัดและการเทียบสีของวัตถุ ขั้นตอนสุดท้ายเป็นการทดสอบโปรแกรมและทำการแก้ไข รวมไปถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่ได้จาก RGB color sensor

1.1 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ได้รับความรู้เกี่ยวกับสี ทฤษฎีต่างๆทางสีเพิ่มมากขึ้น
- 1.4.2 ช่วยเพิ่มความน่าเชื่อถือและมาตรฐานในการจำแนกวัตถุ ด้วยการวัดและเทียบสี จากข้อมูลที่วัดได้กับค่ามาตรฐาน CIE
- 1.4.3 รู้จักการค้นคว้าและการวิเคราะห์ข้อมูล
- 1.4.4 ได้ศึกษาโปรแกรมทางฐานข้อมูลและการวิเคราะห์ผล
- 1.4.5 ได้รู้จักการทำงานอย่างมีระบบและสามารถแก้ปัญหาได้อย่างมีหลักการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

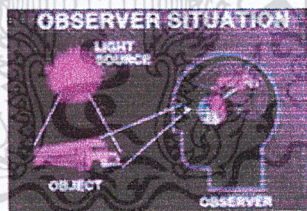
บทที่ 2

ทฤษฎีเบื้องต้นเกี่ยวกับการวัดสี

สี เป็นส่วนสำคัญที่ทำให้วัตถุเป็นที่สนใจต่อผู้พบเห็น แม้แต่ในการเลือกใช้วัตถุใดๆ อาจกล่าวได้ว่าในปัจจุบันสีของวัตถุที่เหมาะสม สวยสม่าเสมอนับเป็นจุดสำคัญต่อการเลือกใช้หรือเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ต่างๆ อย่างไรก็ตามในกระบวนการการผลิต การควบคุมคุณภาพวัตถุ หรือควบคุมผลิตภัณฑ์ให้มีสีที่เหมาะสม สม่าเสมอ รวมทั้งการเลือกใช้วัตถุหรือผลิตภัณฑ์ก็ยังคงต้องใช้สายตาของมนุษย์ในการตัดสิน แต่การมองเห็นที่เกิดจากตาหรือสมองเป็นตัวสั่งการของแต่ละบุคคลจะแตกต่างกันไปตามอายุ เพศ และประสบการณ์ที่เคยได้รับ ดังนั้นเพื่อเป็นการกำจัดข้อขัดแย้งต่างๆ เกี่ยวกับการมองเห็น และเพื่อเป็นการทำความเข้าใจเกี่ยวกับระบบสีสากล จึงได้มีการพัฒนาการวัดสีในระบบตัวเลขซึ่งเรียกว่า objective และการที่จะเข้าใจถึงวิธีการวัดสีที่ให้ค่าเป็นตัวเลข จำเป็นต้องทำความเข้าใจกับทฤษฎีสีเบื้องต้นเสียก่อน

2.1 ปัจจัยที่ทำให้เกิดการมองเห็น

โดยทั่วไปมนุษย์สามารถมองเห็นวัตถุได้ก็เนื่องมาจากปัจจัย 3 อย่างคือ แหล่งกำเนิดแสง วัตถุมีสี และสายตามนุษย์ ดังรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงการรับรู้สีของมนุษย์

แสงสว่างที่ตกกระทบวัตถุจะเกิดการสะท้อนเข้าสู่ตาของผู้มอง แสงดังกล่าวจะไปกระตุ้นการทำงานของบนเรตินา ซึ่งประกอบไปด้วย rod cell ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีความไวต่อแสงแต่จะไม่เกิดการรับรู้สีของวัตถุและ cone cell ซึ่งเป็นเซลล์ที่มีความไวต่อแม่สีทางแสง 3 สี ได้แก่ สีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน และส่งสัญญาณไปยังสมองเพื่อทำการแปลหรือวิเคราะห์สีนั้นๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

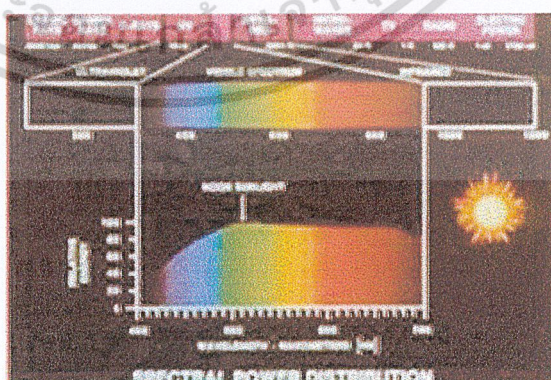
1.1 แหล่งกำเนิดแสง (light Source) : แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการมองเห็นวัตถุและสีของวัตถุมี 2 ชนิดคือ แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ และแหล่งกำเนิดแสงที่ประดิษฐ์ขึ้นมา

A. แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติ

แหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติเช่น แสงแดด (daylight) ก่อนที่จะส่องผ่านมายังโลกจะเกิดการกระเจิง (scattering) ของแสง หรือถูกดูดกลืนบางส่วนไว้ในชั้นบรรยากาศที่ห่อหุ้มโลกอยู่เช่น ไอน้ำ โอโซน เป็นต้น จากนั้นจึงส่องผ่านมายังโลก เมื่อเราให้แสงแดดซึ่งเป็นแสงขาวส่องผ่านปริซึม แสงแดดจะถูกแยกออกเป็นแถบแสงที่มีสีต่างๆ โดยมีความยาวคลื่นอยู่ระหว่าง 400 ถึง 700 นาโนเมตร (Visible Light)

ความยาวคลื่น	400 – 430	nm	เป็นแสงสี	ม่วง
“	430 – 460	“	“	น้ำเงิน
“	460 – 500	“	“	เขียวแกมน้ำเงิน
“	500 – 530	“	“	เขียว
“	530 – 560	“	“	เขียวแกมเหลือง
“	560 – 590	“	“	เหลือง
“	590 – 620	“	“	ส้ม
“	620 – 700	“	“	แดง

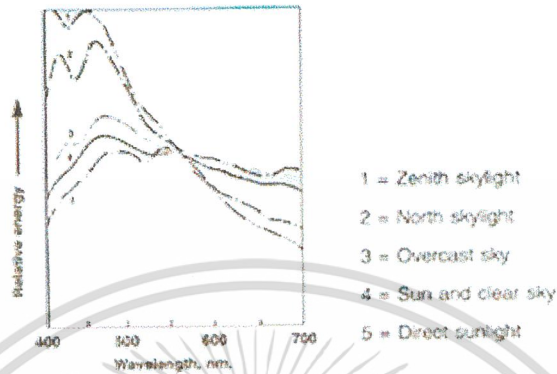
แสงที่มองเห็นได้นี้จะเป็นเพียงส่วนหนึ่งของสเปกตรัมรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ในช่วงความยาวคลื่นระหว่าง 400 – 700 นาโนเมตร ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดง spectrum ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงแดดตามธรรมชาติจะมีการกระจายพลังงาน (Spectral Power Distribution : SPD) แตกต่างกันไปตามภูมิประเทศ ภูมิอากาศ ฤดู และช่วงเวลา ดังรูปที่ 3



รูปที่ 2.3 แสดงการกระจายพลังงานของแสงแดดบริเวณต่างๆ

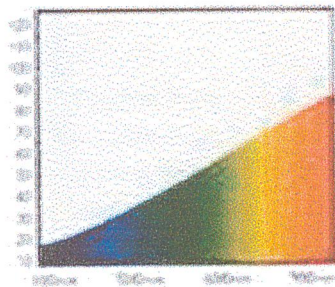
จากรูปที่ 3 แสดงให้เห็นว่าแสงแดดบริเวณ Zenith จะมีสีฟ้ามากที่สุด และสีฟ้าจะลดลงมากสำหรับแสงแดดในบริเวณซีกโลกเหนือ (North Skylight) ดังนั้นการมองเห็นแสงแดดที่เวลาต่างกัน บริเวณต่างกันจะทำให้เกิดการรับสีได้ต่างกัน

B. แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์

แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่ใช้อยู่ในปัจจุบันมีด้วยกันหลายชนิด ได้แก่

- หลอดไฟ (Incandescence)

แหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้เกิดจากการให้ความร้อนแก่โลหะของหลอดจนกระทั่งของหลอดปล่อยรังสีอินฟราเรดออกมา หลังจากให้ความร้อนเรื่อยๆ โลหะของหลอดจะคุ้แดงตุ้ๆ จากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสีแดงสด สีเหลือง และสีฟ้า สีของแสงที่ปล่อยออกมาจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของโลหะ กล่าวคือความยาวคลื่นของแสงสามารถลดลงเมื่ออุณหภูมิของโลหะเพิ่มขึ้น ดังนั้นการกระจายพลังงานของแสงจากหลอดไฟ Incandescence จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของโลหะที่เพิ่มขึ้น

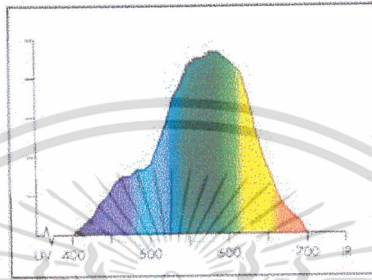


รูปที่ 2.4 แสดงการกระจายพลังงานของหลอด Incandescence

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- หลอดทังสเตน (Tungsten Filament Lamp)

แหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้เกิดจากการให้ความร้อนแก่ลวดทังสเตน โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในหลอดแก้วที่บรรจุก๊าซเฉื่อย หรือลดความดันอากาศลงเพื่อให้ลวดทังสเตนเกิดการออกซิเดชันน้อยที่สุด การให้ความร้อนแก่ลวดทังสเตนนี้ จะทำให้เกิดพลังงานออกมาตลอดความยาวคลื่นตั้งแต่ 400 – 700 นาโนเมตรและมีการกระจายอย่างสม่ำเสมอ



รูปที่ 2.5 แสดงการกระจายพลังงานของหลอดทังสเตน

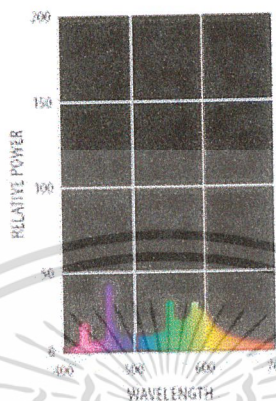
- หลอดทังสเตน – ฮาโลเจน (Tungsten – Halogen Lamp)

แหล่งกำเนิดแสงประเภทนี้มีข้อดีกว่าหลอดทังสเตนแบบเดิม กล่าวคือหลอดไฟทังสเตนแบบเดิมเมื่อได้รับความร้อนแล้ว ไอระเหยของทังสเตนจะไปเกาะที่ผนังด้านข้างของหลอดแก้ว ทำให้หลอดแก้วดำขึ้นเรื่อยๆ และทำให้ความสว่างของหลอดแก้วลดลงเมื่อใช้ไปนานๆ แต่เมื่อมีแก๊สฮาโลเจน เช่น ไอโอดีน หรือ โบรมีนอยู่ในหลอดในปริมาณเล็กน้อย ก็จะทำให้ไอระเหยของทังสเตนไปรวมกับฮาโลเจน เกิดเป็นทังสเตนเฮไลด์แทนที่จะไปเกาะที่ผนังของหลอดแก้ว และเมื่อทังสเตนเฮไลด์มากระทบกับลวดทังสเตนจะเกิดการแยกตัว โดยทังสเตนจะไปเกาะติดอยู่ที่บริเวณไส้หลอด ส่วนฮาโลเจนจะกลายเป็นแก๊สไหลวนอยู่ภายในหลอดแก้ว ทำให้หลอดแก้วไม่ดำ นอกจากนี้หลอดทังสเตน – ฮาโลเจนก็จะมีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้นด้วย แสงจากหลอดทังสเตน – ฮาโลเจน จะเป็นแสงที่มีการกระจายพลังงานอย่างต่อเนื่อง

- หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescence Lamp)

พลังงานของหลอดฟลูออเรสเซนต์จะเกิดจากการที่ไอปรอทแผ่รังสีที่มีความยาวคลื่นในช่วงพลังงานแสงที่มองเห็นได้ (Visible) และรังสีอัลตราไวโอเล็ต (Nonvisible Ultraviolet Ray) โดยพลังงานที่มีความยาวคลื่นบางช่วงจะส่องผ่านผงฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบอยู่ด้านในของหลอดออกไป ในขณะที่เดียวกับที่รังสีอัลตราไวโอเล็ตที่เกิดขึ้นจะถูกผงฟลูออเรสเซนต์ดูดไว้ และปล่อยพลังงานใน

ช่วงพลังงานแสงที่มองเห็นได้ (Visible Region) เป็นแถบสเปกตรัมต่อเนื่องทำให้เกิดการเรืองแสงได้



รูปที่ 2.6 แสดงการกระจายพลังงานของหลอด Fluorescence

หลอดฟลูออเรสเซนต์ในทางการค้ามีอยู่หลายชนิด ซึ่งจะให้สเปกตรัมที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับผงฟลูออเรสเซนต์ที่เคลือบภายในหลอด เช่น metal tungsten, silicates, borates, arsenates, halophosphates เป็นต้น ตัวอย่างเช่น ถ้าใช้ halophosphates จะปล่อยพลังงานแสงออกมาในช่วงแสงสีเหลือง – เขียว แต่จะมีปริมาณของสีแดงที่ต่ำมาก เป็นต้น

- อุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ

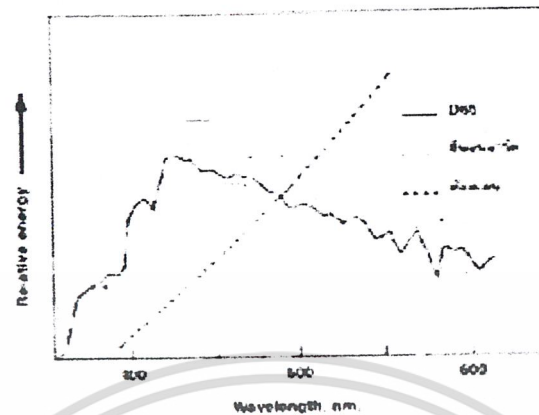
ซึ่งอาศัยการเคลื่อนที่ของพาหะนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้เกิดเป็นแหล่งกำเนิดแสงได้ เช่น ไฟโตไดโอดชนิดต่างๆ, Full Color LED, Laser Diode เป็นต้น

- หลอดไฟซีนอนอาร์ค (Xenon Arc Lamp)

การให้แสงของหลอดซีนอนอาร์คเกิดจากการให้กระแสไฟฟ้าผ่านแก๊ส ทำให้เกิดแสงที่มีการกระจายพลังงานอยู่ระหว่างช่วงรังสีอัลตราไวโอเลตและรังสีอินฟราเรด และเมื่อเราใช้ที่กรองแสงเพื่อลดรังสีอัลตราไวโอเลตอย่างสม่ำเสมอ และใช้ที่กรองความร้อนลดความเข้มของรังสีอินฟราเรดให้ต่ำลงแล้ว จะทำให้หลอดไฟซีนอนอาร์คเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายพลังงานที่ใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐานของ CIE D65 หรือแสงแดดในตอนกลางวัน

นอกจากนี้หลอดไฟซีนอนอาร์คที่ให้ไฟกระพริบ (Xenon Flash Lamps) จะมีข้อได้เปรียบคือจะให้แสงที่มีความเข้มสูงซึ่งอยู่ในช่วงระยะสั้น ทำให้ขึ้นตัวอย่างที่ทำงานไม่ร้อนมากจนเกิดการเปลี่ยนสี ซึ่งการกระจายพลังงานของหลอดไฟหรือแหล่งกำเนิดแสงแต่ละชนิดก็จะมีลักษณะต่างกันไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงชนิดต่างๆ

2.1.2 วัตถุมีสี (Colored Object)

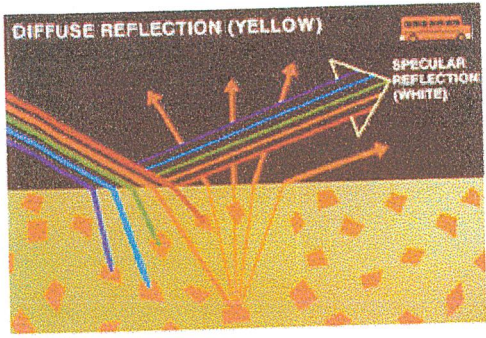
เมื่อให้แสงส่องผ่านไปทั่ววัตถุจะสามารถเกิดปรากฏการณ์ต่างๆ ดังต่อไปนี้

- Specular Reflection

เป็นปรากฏการณ์การสะท้อนของแสงที่พื้นผิวของวัตถุที่มีความเงามัน ซึ่งปรากฏการณ์นี้จะเกิดขึ้นได้กับวัตถุที่เป็นโลหะที่มีพื้นผิวที่เงามัน (Opaque Metal)

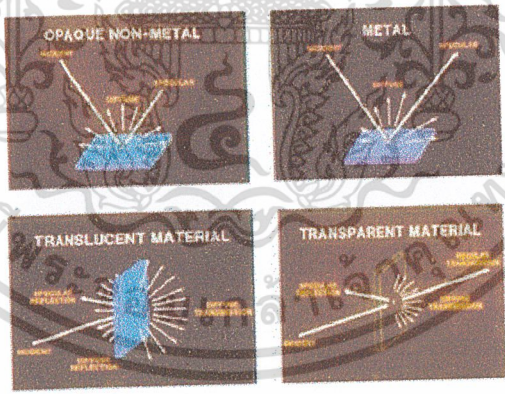
- Diffuse Reflection

เป็นปรากฏการณ์การสะท้อนของวัตถุที่พื้นผิวไม่เรียบ ไม่มีความมันเงา เช่น วัตถุสิ่งทอ ซึ่งการมองเห็นวัตถุและสีของวัตถุจะเกิดขึ้นได้เมื่อมีแสงส่องผ่านเข้าไปในวัตถุสิ่งทอนั้น ก็จะเกิดการกระเจิงแสง (Scattering) ซึ่งภายในวัตถุสิ่งทอจะมีอนุภาคของสีข้มอยู่ อนุภาคของสีข้มจะดูดกลืนแสง บางช่วงความยาวคลื่นไว้ (Absorption) และสะท้อนแสงบางช่วงความยาวคลื่นออกมาทำให้เกิดการรับรู้สีของวัตถุได้แตกต่างกันตามความยาวคลื่นที่สะท้อนออกมา



รูปที่ 2.8 แสดงปรากฏการณ์ Scattering และการ Absorption

- Diffuse Transmission
เป็นปรากฏการณ์ที่แสงส่องผ่านวัตถุที่มีความโปร่งแสง (Transparent Material) และเกิดการกระเจิงแสง (Scattering) ที่พื้นผิวนั้น
- Regular Transmission
เป็นปรากฏการณ์ที่แสงจะเกิดการสะท้อนผ่านวัตถุที่มีความโปร่งใส เช่น กระดาษใต หรือ สารละลายสีขุ่น เป็นต้น



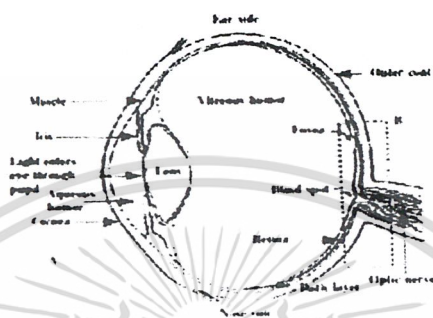
รูปที่ 2.9 แสดงปรากฏการณ์เมื่อแสงตกกระทบวัตถุชนิดต่างๆ

2.1.3 ผู้สังเกตการณ์

ผู้สังเกตการณ์มีส่วนสำคัญต่อการมองเห็นหรือการรับรู้ดี กล่าวคือเมื่อแสงส่องกระทบวัตถุแล้วสะท้อนเข้าตามนุษย์ในดวงตาบริเวณเรตินา (Retina) จะมีส่วนที่ไวแสงแตกต่างกันอยู่ 2 ชนิดคือ ส่วนที่แยกความแตกต่างระหว่างความมืดกับความสว่าง ซึ่งเรียกว่า rods cell และส่วนที่สามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แยกสีได้ซึ่งเรียกว่า cones cell โดยที่ cones cell จะแบ่งเป็น 3 ชนิดคือ ส่วนที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน โดยแสงจะไปกระตุ้น cones cell ให้ส่งสัญญาณผ่านเส้นประสาทตา (Optical Nerves) ไปยังสมองและแปลออกมาเป็นสีที่มองเห็นนั่นเอง



รูปที่ 2.10 แสดงภาคตัดขวางของตามนุษย์

2.2 ระบบการวัดสี

โดยทั่วไปมนุษย์จะระบุลักษณะสีของวัตถุที่มองเห็นเป็น 3 ลักษณะ คือ Hue, Value, Chroma โดยที่

HUE หมายถึง สีที่ปรากฏให้เห็นเช่น สีแดง เขียว และน้ำเงิน เป็นต้น
 VALUE(Lightness) หมายถึง ความสว่างของสี โดยดูที่การสะท้อนสีต่างๆ กันไป
 CHROMA(Saturation) หมายถึง ความสดใสความเข้ม(Strength)หรือความบริสุทธิ์ของสี

ระบบ CIE : ระบบ CIE ได้รับการพัฒนาขึ้นในปี ค.ศ. 1913 เมื่อ Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) ได้เห็นความจำเป็นที่จะต้องมียระบบการวัดสีในรูปของ Objective ที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสี โดยจะวัดสีออกมาเป็นตัวเลขซึ่งมีข้อดีอยู่หลายประการคือ

- เป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคล ทำให้ลดปัญหาความขัดแย้งลงได้
- เป็นระบบการวัดสีออกมาเป็นตัวเลข ดังนั้นแม้ชิ้นงานตัวอย่างจะสีซีดลงตามกาลเวลา แต่ตัวเลขที่มีอยู่ก็จะยังคงบอกได้ว่าสีเดิมเป็นอย่างไร
- เป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณและทำนายสูตรการผสมสีได้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปัจจัยในการรับรู้สีของมนุษย์ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดแสง วัตถุที่มีสี และสายตามนุษย์หรือผู้สังเกต ดังนั้นระบบ CIE จึงมีแนวคิดว่าการที่จะวัดค่าองค์ประกอบสีออกมาเป็นตัวเลขได้นั้นก็จะต้องสามารถวัดปัจจัยทั้ง 3 อย่างออกมาเป็นตัวเลขได้เช่นกัน

2.2.1 แหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน (Illuminants)

แหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ในการวัดสีนั้นเราสามารถวัดการกระจายพลังงานที่แต่ละความยาวคลื่น (Spectral Power Distribution, SPD) ได้โดยใช้เครื่อง spectroradiometer

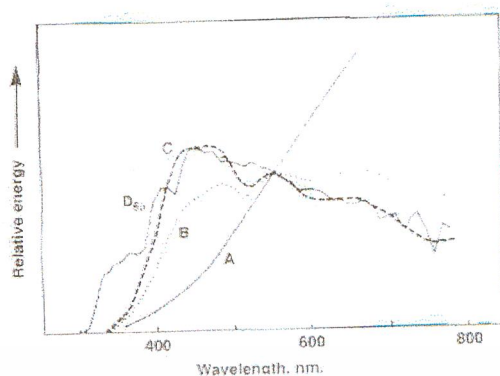
เนื่องจากการรับรู้สีของวัตถุจากแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติจะมีความแตกต่างกัน โดยเฉพาะการรับรู้สีของวัตถุจากแหล่งกำเนิดแสงตามธรรมชาติจะมีความแตกต่างกันไปตามวัน เวลา ภูมิภาค ภูมิภาค ดังนั้นในการตรวจสอบตัวอย่างสีในทางอุตสาหกรรม จึงต้องใช้แหล่งกำเนิดแสงประดิษฐ์ที่สามารถทำการเปรียบเทียบมาตรฐานได้ และมีคุณภาพของแสงที่คงที่ ระบบ CIE จึงจำเป็นต้องกำหนดมาตรฐานของแหล่งกำเนิดแสงดังนี้

- A. Illuminant A มีการกระจายพลังงานแต่ละความยาวคลื่น (SPD) ใกล้เคียงกับหลอดทังสแตน หรือแหล่งกำเนิดแสง incandescence อื่นๆ ที่มี color temperature ประมาณ 2848 K
- B. Illuminant B เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากการนำ Illuminant A มาผ่านแผ่นกรองแสง มี color temperature ประมาณ 4900K โดย Illuminant B จะใช้แทนแสงแดดตอนเที่ยง แต่ปัจจุบันไม่เป็นที่นิยมแล้ว
- C. Illuminant C เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ได้จากการนำ Illuminant A มาผ่านแผ่นกรองแสง มี color temperature ประมาณ 6700K โดย Illuminant C จะใช้แทนแสงแดดตอนกลางวัน
- D. Illuminant D เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายพลังงานแต่ละความยาวคลื่น (SPD) ใกล้เคียงกับแสงแดดตอนกลางวันเช่นกัน แต่จะแบ่งละเอียดตาม color temperature จากสีเหลืองจนถึงสีน้ำเงิน เช่น D55, D60, D65, D75 เป็นต้น โดยที่

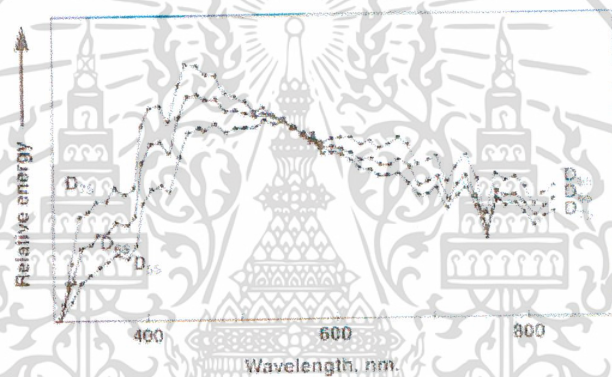
D65 : D = Daylight
65 = color temperature ของแสงแดดตอนกลางวัน 6500K

D75 : D = Daylight
75 = color temperature ของแสงแดดตอนกลางวัน 7500K

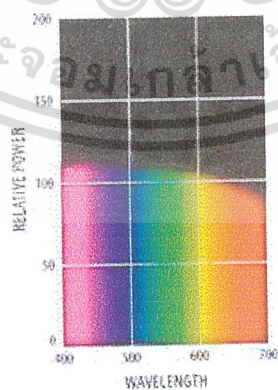
Illuminant D ที่มีตัวเลขน้อยต่อท้ายจะมีสีเหลืองออกมามากกว่าที่มีตัวเลขมากๆ ต่อท้าย และ Illuminant D ยิ่งมีตัวเลขมากเท่าไรก็จะมีสีฟ้าหรือสีน้ำเงินมากขึ้นเท่านั้น อย่างไรก็ตาม Illuminant D65 ก็เป็นที่นิยมใช้กันมากที่สุด



รูปที่ 2.11 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน CIE ต่างๆกัน



รูปที่ 2.12 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D55, D65, D75



รูปที่ 2.13 แสดงการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงมาตรฐาน D65

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 วัตถุที่มีสี

แสงที่สะท้อนออกมาจากวัตถุสามารถวัดออกมาเป็นตัวเลขได้โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า spectrometer ซึ่งจะวัดปริมาณการสะท้อนแสงของวัตถุเปรียบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิงได้เป็น reflectance curve ดังรูปที่ 14 วัตถุที่มีสีแตกต่างกันจะมี reflectance curve ต่างกันด้วยเช่น

วัตถุสีขาว	สะท้อนแสงที่ทุกความยาวคลื่น ตั้งแต่ 400 – 700 นาโนเมตร
วัตถุสีน้ำเงิน	สะท้อนแสงมากที่ความยาวคลื่น 430 – 460 นาโนเมตร
วัตถุสีเขียว	สะท้อนแสงมากที่ความยาวคลื่น 500 – 530 นาโนเมตร
วัตถุสีเหลือง	สะท้อนแสงมากที่ความยาวคลื่นของแสงสีเขียว สีเหลือง และสีแดง แต่จะมีการสะท้อนแสงต่ำมากที่ค่าความยาวคลื่นของแสงสีน้ำเงิน
วัตถุสีแดง	สะท้อนแสงมากที่ความยาวคลื่น 620 – 700 นาโนเมตร
วัตถุสีดำ	มีการสะท้อนแสงต่ำมากที่ทุกความยาวคลื่น ตั้งแต่ 400 – 700 นาโน

เมตร



รูปที่ 2.14 แสดง Reflectance curve ของวัตถุสีต่างๆ

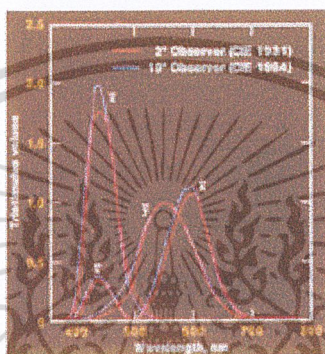
2.2.3 ผู้สังเกตการณ์มาตรฐาน

การวัดสีออกมาเป็นตัวเลขต้องสามารถหาปริมาณการตอบสนองของตามมนุษย์ต่อแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินได้ โดยนักวิทยาศาสตร์ 2 ท่านคือ Wright และ Guild ได้ทำการทดลองโดยการฉายแสงตัวอย่างตลอดความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ลงบนจอสีขาวด้านล่าง ส่วนจอด้านบนจะส่องด้วยแสงปฐมภูมิสีแดงที่มีความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร แสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

546.1 นาโนเมตร และแสงสีน้ำเงินที่ความยาวคลื่น 435.8 นาโนเมตร จากนั้นให้ผู้สังเกตการณ์ 17 คน มองผ่านช่องเล็กๆ และทำการเทียบสี (Color Match) แสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินที่ส่องมา ผลมกันปริมาณที่แตกต่างกัน ที่จอด้านบนกับแสงตัวอย่างที่จอด้านล่าง

ผลการทดลองดังกล่าวสามารถนำมาหาค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียว และน้ำเงิน ได้ค่าที่เรียกว่า CIE color-matching function curve 3 curve หรือเรียก 2° 1931 CIE Standard Observer ดังรูปที่ 15



รูปที่ 2.15 แสดง 2°, 10° 1964 CIE Standard Observer

โดยที่ \bar{X} เป็นเส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง
 \bar{Y} เป็นเส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีเขียว
 \bar{Z} เป็นเส้นกราฟแสดงค่าเฉลี่ยการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีน้ำเงิน

2.2.4 CIE Tristimulus Value

จากการที่สามารถหาปริมาณการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสง การสะท้อนของวัตถุ และการตอบสนองของตามนุษย์ที่ไวต่อแสงสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงิน เป็นตัวเลขได้ดังกล่าวข้างต้น จึงทำให้สามารถคำนวณสี หรือระบุนสีของวัตถุได้ออกมาเป็นตัวเลข โดยนำค่าทั้ง 3 ที่แต่ละความยาวคลื่นเดียวกันคูณกัน จากนั้นนำมารวมกันตลอดความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร ได้เป็นตัวเลข 3 ค่า คือ X, Y, Z

ดังสมการต่อไปนี้

$$X = \sum_{400}^{700} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{x}(\lambda)$$

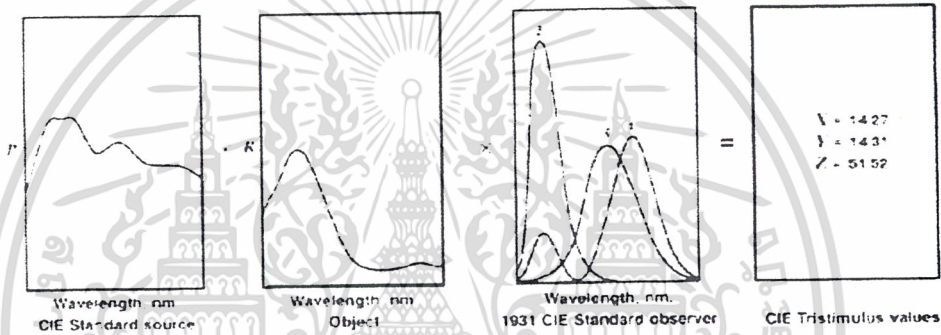
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$Z = \sum_{400}^{700} S(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{z}(\lambda)$$

โดยที่

- $S(\lambda)$: Illuminant
- $R(\lambda)$: Sample
- $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$: Eyes

ค่า X, Y, Z ที่ได้เรียกว่า CIE Tristimulus Value โดยที่ X จะบอกความเป็นสีแดงของวัตถุ Y บอกความเป็นสีเขียวของวัตถุ และ Z บอกความเป็นสีน้ำเงินของวัตถุ ซึ่งจะแสดงดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แสดง CIE Tristimulus Value

จากรูปที่ 2.16 กราฟของ Y จะคล้ายคลึงกับกราฟแสดง Human Sensitivity ต่อสเปกตรัมอย่างมาก จึงสามารถใช้ค่า CIE Tristimulus Value, Y บอกทั้งความสว่าง (Lightness) และความเป็นสีเขียวของวัตถุได้

2.2.5 CIE Chromaticity Coordinates

แม้จะสามารถระบุสีของวัตถุโดยใช้ค่า CIE Tristimulus Value หรือ X, Y, Z ได้ก็ตามแต่เราก็ยังจำเป็นต้องเข้าใจหรือหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวกับลักษณะของสีที่มองเห็นเช่น hue, value, chroma ด้วย ดังนั้นการระบุสีโดยใช้ค่า X, Y, Z นั้นจึงยังไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้มากนัก และเพื่อการระบุสีโดยใช้ตัวเลขสามารถสื่อความหมายของสีได้ชัดเจนยิ่งขึ้น จึงได้มีการคำนวณค่า CIE Chromaticity Coordinates จากค่า Tristimulus Value ดังนี้คือ

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}$$

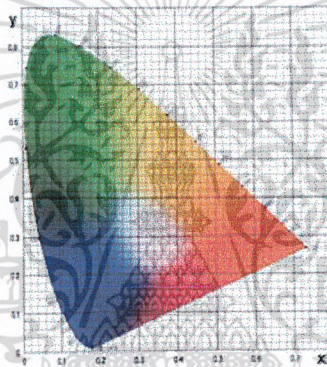
$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z}$$

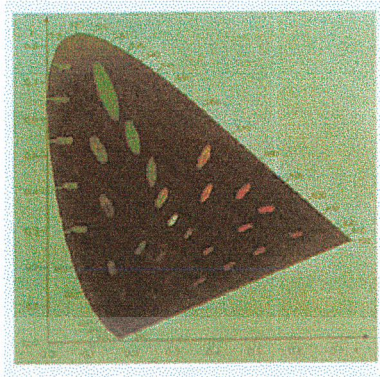
$$z = \frac{Z}{X + Y + Z}$$

โดยค่า x , y , z คือ CIE Chromaticity Coordinates โดย $x+y+z = 1$ เมื่อนำค่า x และ y มาพล็อตกราฟ จะได้แผนผังที่ใช้บอกสีเรียกว่า CIE Chromaticity Diagram ซึ่งมีลักษณะคล้ายเกือบสามเหลี่ยม ดังรูปที่ 15 CIE Chromaticity Diagram นี้จะบอกได้เพียงลักษณะของสีที่ปรากฏให้เห็น (Hue) และความสดใสของสี (Chroma) เท่านั้น แต่ถ้าต้องการบอกลักษณะของสีที่หมายถึงความสว่างของสี (Value หรือ Lightness) จะต้องทำการกำหนดค่าด้วย CIE Tristimulus Value, Y ดังนั้นในการระบุสีจึงต้องสามารถระบุด้วยค่า x , y , z จึงจะได้ลักษณะสีที่ครบถ้วน



รูปที่ 2.17 แสดง CIE Chromaticity Diagram

อย่างไรก็ตามการระบุสีด้วยค่า CIE Chromaticity Coordinates (x และ y) จาก CIE Chromaticity Diagram ยังมีข้อบกพร่อง เนื่องจากวัตถุประสงค์อย่างหนึ่งของการวัดสีก็คือเพื่อที่จะบอกค่าของสีที่คลาดเคลื่อนออกไปจากมาตรฐาน ซึ่งในทางทฤษฎีเราจะเห็นว่าความแตกต่างของสี 2 สี ที่เป็นตัวเลข (Dx และ Dy) บอกความคลาดเคลื่อนของสีที่ออกไปจากมาตรฐานได้ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว พบว่าสายตามนุษย์สามารถมองเห็นความแตกต่างของสี ณ จุดต่างๆ บน CIE Chromaticity Diagram ได้ไม่เท่ากัน



รูปที่ 2.18 แสดง MacAdam Ellipse

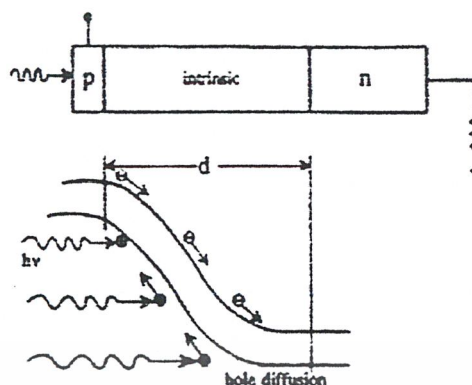
จากรูปที่ 2.18 แสดงให้เห็นว่าที่ช่วงความยาวคลื่นหรือ Chromaticity Diagram หนึ่งๆ สายตามนุษย์จะบอกความแตกต่างของสีได้ไม่เท่ากัน เพราะเส้นขอบเขตที่แสดงความสามารถในการบอกความแตกต่าง (Just Noticeable Color Difference, j.n.d) นั้นเป็นวงรีและมีขนาดไม่เท่ากัน กล่าวคือ ในบริเวณที่เป็นสีเขียวใบไม้ (Green) จะเป็นบริเวณที่ใหญ่ที่สุด ส่วนบริเวณที่เป็นสีน้ำเงิน (Blue) จะเป็นบริเวณที่เล็กที่สุด แสดงว่าค่า x, y (Chromaticity Coordinates) ของสีเขียวจะเปลี่ยนไปมากโดยที่สายตามนุษย์ยังไม่สามารถเห็นความแตกต่างได้ง่าย หากสายตามนุษย์สามารถบอกความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอแล้ว เส้นขอบเขตที่แสดง j.n.d. ควรจะต้องเป็นวงกลมที่มีขนาดเท่ากัน ดังนั้นจึงไม่เป็นการเหมาะที่จะนำค่า Chromaticity Coordinates (x, y, z) มาเป็นหลักในการประเมินคุณภาพความแตกต่างของสี

2.3 ตัวตรวจจับสีในระบบ RGB

2.3.1 พีไอเอ็น โฟโตไดโอด (PIN Photodiode)

โฟโตไดโอดเป็นไดโอดที่มีเขตปลอดพาหะอยู่ในตัวของไดโอดเอง ซึ่งเป็นชั้นของซิลิกอนเรียกว่าชั้น intrinsic จะอยู่ระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับชนิดเอ็น ซึ่งจะเรียกว่าพีไอเอ็น โฟโตไดโอด ความหนาของชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์จะสอดคล้องกับประสิทธิภาพเชิงควอนตัม ช่วงความถี่ตอบสนองและช่วงการตอบสนองของแสงโดยที่เขตปลอดพาหะสามารถจะขยายออกไปในเนื้อสารทั้งชนิดเอ็นและพี การเพิ่มขึ้นของชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์จะทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของเขตปลอดพาหะลดลงและเพิ่มเขตปริมาตรการดูดกลืน(เขตปลอดพาหะ) รูปแบบของพีไอเอ็นโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งมีกำแพงศักย์แบบชอตต์กี, การแพร่ซึมแบบระนาบและแบบ Side Illuminated PIN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 แสดงโครงสร้างและแถบพลังงานของ PIN Diode

จากรูปจะเห็นได้ว่าชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีมีขนาดบางมากจนอาจจะละการดูดกลืนแสงของบริเวณนี้ออกไปได้ สำหรับเขตปลอดพาหะจะต้องมีความหนาพอที่จะตรวจจับหรือดูดกลืนแสงส่วนใหญ่ได้ แต่จะต้องไม่มากเกินไปกว่าค่า transit time ของพาหะที่จะข้ามเขตปลอดพาหะไปได้ สำหรับพีไอเอ็นโฟโตไดโอดแต่ละชนิดก็จะทำรอยต่อไอหมิมิกที่ชั้น n^+ กับชั้นอะลูมิเนียม รังสีที่ตกกระทบจะถูกดูดกลืนในบริเวณเขตปลอดพาหะและทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลขึ้น เขตปลอดพาหะยังคงอยู่เนื่องจากสนามไฟฟ้าจากการแพร่ของพาหะข้างน้อยข้ามรอยต่อระหว่างชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดพีกับชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์ เมื่อให้ค่าศักย์ไฟฟ้าภายนอกกับไดโอด เขตปลอดพาหะจะขยายออกทั้ง 2 ด้าน ซึ่งชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์จะไม่มีพาหะอยู่เลยจึงสภาพต้านทานไฟฟ้าสูง ซึ่งจะทำให้ความต่างศักย์สูญเสียไปและทำให้บริเวณเขตปลอดพาหะมีค่าสนามไฟฟ้ามากตกคร่อมอยู่เป็นสาเหตุให้เกิดการแยกกันของอิเล็กตรอน - โฮล และทำให้พาหะมีความเร็วสูงตลอดช่วงเขตปลอดพาหะ

กระแสมีด (เมื่อไม่มีโฟตอนตกกระทบ) อาจเกิดจาก 2 แหล่ง

- 1.) การเกิด - การรวมตัวของกระแสมีดในเขตปลอดพาหะ
- 2.) กระแสรั่วที่ผิวอุปกรณ์

เนื่องจากบริเวณชั้นซิลิกอนสามารถลดขนาดลงได้โดยการใช้ซิลิกอนที่มีความบริสุทธิ์สูงและระมัดระวังเรื่องการเกิดจุดบกพร่องภายในผลึกเนื่องจากกระบวนการผลิต กระแสรั่วไหลที่ผิวของอุปกรณ์อาจจะลดลงได้โดยการใช้เทคนิค Passivation Techniques

นอกจากนั้นกระแสก็ยิ่งเปลี่ยนแปลงไปตามอุณหภูมิ ดังความสัมพันธ์

$$i_0 \propto \exp\left\{\frac{-0.7\text{eV}}{kT}\right\}$$

ในช่วงอุณหภูมิห้องถึง 70°C ค่าของกระแสจะเพิ่มขึ้นทุกๆ 30°C

2.3.2 ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมของพีไอเอ็นไฟโตไดโอด

โดยทั่วไปชั้นของซิลิกอนบริสุทธิ์จะมีสภาพต้านทานไฟฟ้าสูงกว่าชั้นที่มีการเจือปน การไบอัสย้อนกลับจะตกคร่อมบริเวณชั้นของซิลิกอนบริสุทธิ์ เนื่องจากสนามไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนแปลงตาม dV/dX และสนามไฟฟ้าจะอยู่ในชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์ สนามไฟฟ้าตามธรรมชาติของอุปกรณ์จะไม่มีไบอัสจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งมีค่ามากพอที่จะเชื่อได้ว่า การไบอัสกลับจะสามารถควบคุมกระแสของพาหะในชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์ได้ แต่ในทางตรงกันข้ามเนื่องจากมีความต่างศักย์เพียงเล็กน้อยที่ตกคร่อมบริเวณสารกึ่งตัวนำชนิดพีและเอ็น ทำให้กระแสแพร่ซึมโดดเด่นขึ้น

เนื่องจากในบริเวณชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีอาจเกิดการดูดกลืนแสงได้ ดังนั้นในบริเวณจึงถูกออกแบบมาให้มีความบางมาก พาหะที่เกิดจากแสงยังไม่จำเป็นต้องเคลื่อนที่ตามกระแสแพร่ซึมซึ่งจะนำไปสู่ชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์ กระแสทั้งหมดจะแสดงดังสมการ

$$i = (1-r)\Phi_p q \left(1 - \frac{e^{-ad}}{1+aL_n}\right)$$

เมื่อ r คือสัมประสิทธิ์การสะท้อนของเฟสเนล

a คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน

L_n คือระยะการแพร่ซึมของโฮล

d คือความกว้างรวมของเขตปลอดพาหะ

ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพเชิงควอนตัม η ดังสมการ

$$\eta = \frac{i}{q\Phi_p} = (1-r) \left[1 - \frac{e^{-ad}}{1+aL_n}\right]$$

สำหรับซิลิกอนที่มีความยาวคลื่น $\lambda \leq 1.1 \mu\text{m}$ และ $aL_n \ll 1$ จะสามารถละพจน์ที่เป็นตัวหารได้ ถ้ามีการขบสารลดการสะท้อนที่ผิวหน้าของตัวตรวจจับ ความกว้างเขตปลอดพาหะจะเป็นตัวแปรสำคัญซึ่งจะได้ว่า $\eta \approx 1 - e^{-ad}$ ถ้าเขตปลอดพาหะมีความกว้างมากกว่าระยะการดูดซึม ($1/a$) ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพเชิงควอนตัมประมาณ 85%

2.3.3 ช่วงเวลาการตอบสนอง

สามปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อช่วงเวลาการตอบสนองของตัววัดแสงคือ

- 1) ช่วงเวลาทรานสิท (Transit Time) ที่เกิดจากแสง
- 2) การถูกจับของพาหะที่เกิดจากแสง
- 3) ค่าคงที่เวลา RC ของวงจรสมมูล

ช่วงเวลาทรานสิทเป็นผลรวมของเวลาที่พาหะข้างน้อยที่เกิดเนื่องจากแสง เคลื่อนที่ออกจากรอยต่อ กับเวลาที่พาหะข้างมากเคลื่อนที่ไปสู่รอยต่อโอห์มมิก ถ้าพีไอเอ็นโพโตไดโอดมีความหนา 5 มิลลิเมตร อาจมีช่วงเวลาทรานสิทเป็น 5 นาโนวินาที ถ้าศักย์ดาไฟฟ้าที่ไดโอดมีค่าพอที่จะทำให้ไดโอดแสดงสมบัติเขตปลอดพาหะอย่างสมบูรณ์

เมื่อเปรียบเทียบพีไอเอ็น โพโตไดโอดซึ่งมีช่วงเวลาทรานสิทในช่วงไมโครวินาทีแล้ว (ความนำไฟฟ้าเชิงแสงมีค่ามิลลิวินาทีถึงไมโครวินาที ตัวตรวจวัดอุณหภูมิจะมีค่าในช่วงมิลลิวินาที) จะเห็นว่าพีไอเอ็น โพโตไดโอดมีช่วงเวลาทรานสิทที่สั้นมาก

ผลเนื่องจากการถูกจับ (โดยกับดักประจุ) ที่สถานะลึกในซิลิกอนอาจจะเนื่องมาจากพาหะมีช่วงชีวิตนาน ปัญหานี้อาจแก้ไขโดยการเลือกใช้วัสดุที่มีความบริสุทธิ์สูงๆ และการเลือกวัสดุที่ใช้ผลิตด้วย ซึ่งอาจเป็นผลให้ค่าคงตัวเวลาอยู่ในช่วงที่น้อยกว่าเศษส่วนของไมโครวินาทีได้

วงจรซึ่งอาจจะได้ค่าคงที่เวลาของการตอบสนอง $\tau = R_L C_d$ ซึ่งเป็นเวลาที่กระแสมีค่าเป็น 67% ของค่าที่สมดุลหลังจากให้แสงหรือหยุดให้แสง ถ้าความจุไฟฟ้าของไดโอดมีค่า 100 พิโคฟารัด และความต้านทานพาหะมีค่าเป็น 1 กิโลโอห์ม จะได้ค่าคงที่เวลาประมาณ 1×10^{-7} วินาที แม้ว่าในช่วงเวลาทรานสิทของตัวเองอาจจะมีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าว แต่ช่วงเวลาการตอบสนองก็อาจจะโดดเด่น และอาจแสดงได้ว่าเป็นช่วงเวลาการตอบสนองของระบบ

การเลือกความต้านทานพาหะจะมีผลกระทบต่อความเร็วในการตอบสนองและความไวต่อแสงที่ความเข้มต่ำ การตอบสนองเร็วจะต้องการพาหะที่มีความต้านทานต่ำ ระบบที่ต้องการสภาวะความไวสูงจะต้องการความต้านทานพาหะที่สูงกว่า

ความกว้างของชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์จะมีผลต่อช่วงเวลาทรานสิทเช่นกัน โดยจะมีผลต่อช่วงความกว้างของความถี่ทางไฟฟ้าของพีไอเอ็น โพโตไดโอด โดยทั่วไปโฟตอนที่ตกกระทบจะถูกดูดกลืนที่บริเวณขอบบริสุทธิ์ของซิลิกอน ($d \gg 1/a$) ประมาณได้ว่าศักย์ดาไฟฟ้าที่ให้กับไดโอดจะตกคร่อมที่ชั้นซิลิกอนบริสุทธิ์ มีค่าพอที่จะให้ความเร็วเฉลี่ยเนื่องจากสนามไฟฟ้าถึงจุดอิมิตัว (V_s) ถ้าแสงที่ตกกระทบไม่สม่ำเสมอ ให้ความหนาแน่นกระแสที่เกิดขึ้นที่ผิวหน้าของไดโอดกลายเป็นคลื่นระนาบ แสดงได้ดังสมการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$J(x) = q(1-r)E_q e^{j(\omega t - kx)}$$

$$= q(1-r)E_q e^{j(\omega t - x/V_s)}$$

ดังนั้นกระแสรวมก็คือความหนาแน่นของกระแสเฉลี่ยตลอดช่วงซีลิกอนบริสุทธิ์

$$J = \frac{1}{d} \int_0^d J(x) dx$$

$$= q(1-r)E_q e^{j\omega t} \text{sinc} \left[\frac{fd}{V_s} \right]$$

ฟังก์ชัน sinc จะแสดงถึงช่วงเวลาการตอบสนองของระบบ บริเวณที่เป็นกำลังสองของความหนาแน่นที่ตอบสนอง J^2 จะลดลงเป็นครึ่งหนึ่งของค่าสูงสุด $\text{sinc}^2(fd/V_s) = 1/2$ คือที่จุด 3 - dB ซึ่ง $fd/V_s = 0.44$ ดังนั้นที่ 3 - dB จะได้ความถี่เนื่องจากความเร็วของพาหะ เนื่องจากสนามไฟฟ้า f_{drift} จะได้

$$f_{\text{drift}} = 0.44V_s/d$$

สำหรับซีลิกอน $V_s = 10^7$ และให้อยู่ในหน่วยของ cm จะได้

$$f_{\text{drift}} = (4.4 \times 10^6)/d$$

ถ้าเซตปลอดพาหะในพีไอเอ็น โฟโตไดโอดที่มีซีลิกอนเป็นสาร intrinsic มีความหนาเท่ากับ 10 ไมโครเมตร ที่ 3- dB จะได้ความถี่เป็น 1.1 GHz

ความกว้างของชั้นซีลิกอนบริสุทธิ์อาจมีผลกระทบต่อค่าคงที่เวลา RC ได้โดยง่าย ซึ่งความกว้างก็จะมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้า นั่นคือ $C = \epsilon A/d$ สำหรับซีลิกอน และ $\epsilon = 11.8\epsilon_0$ เมื่อ ϵ_0 เป็นค่าคงที่ไดอิเล็กตริกของสุญญากาศและถ้าความยาวกับพื้นที่รับแสงอยู่ในหน่วยเซนติเมตร จะได้ช่วงความถี่ RC เป็น

$$f_{RC} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1 \cdot d}{2\pi R \epsilon_0 \epsilon A}$$

$$= (1 \times 10^{11}) \frac{d}{RA}$$

จะเห็นได้ว่า RA เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความเร็วของการตอบสนองของระบบ

2.3.4 Performance Expected

สัญญาณรบกวนของพีไอเอ็น โฟโตไดโอดจะขึ้นอยู่กับไฟฟ้ากระแสตรงที่ไหลอยู่ตลอดช่วงของพีไอเอ็น โฟโตไดโอดนั่นเอง และช่วงความถี่ของอุปกรณ์ แต่สัญญาณรบกวนจะมีผลเกี่ยวกับความกว้างของชั้นซีลิกอนบริสุทธิ์ (รวมไปถึงสัมประสิทธิ์เชิงควอนตัมด้วย) สัญญาณรบกวนได้แก่ shot noise และ Johnson noise เมื่อไฟฟ้ากระแสตรงเนื่องจากความหนาแน่นของสัญญาณ I_{sig} กระแสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากความหนาแน่นเบื้องหลัง i_{bkg} และกระแสมีด i_0 (สำหรับกรณีที่ไม่ใช่สอปกรณด้วยความต่างศักย์ขนาดมากๆ) จะได้กระแสรบกวนสุทธิ

$$i_n^2 = \sqrt{2q(i_{sig} + i_{eq})\Delta f}$$

เมื่อ
$$i_{eq} = i_{bkg} + i_0 + \frac{2kT}{qR_{eq}}$$

และ
$$R_{eq} = R_L // R_d$$

ที่ความถี่ต่ำ ($f < 1$ kHz) จะพบสัญญาณรบกวน $1/f$

โดยทั่วไปโฟโตไดโอด แบบชอตต์กีจะมีสัญญาณรบกวน $1/f$ ต่ำกว่าชนิดแพร่ซึมในแนวระนาบ และจะได้อัตราส่วนของสัญญาณต่อสัญญาณรบกวน, SNR เป็น

$$\frac{S}{N} = \frac{i_{sig}}{\sqrt{2q(i_{sig} + i_{eq})\Delta f}}$$

ถ้า $i_{sig,NEP}$ เป็นกระแสสัญญาณที่เกิดขึ้นซึ่งจะตอบสนองต่อความหนาแน่นของแสงที่ตกกระทบจะมีค่าเท่ากับสัญญาณรบกวนเนื่องจากแหล่งกำเนิดกำลัง (NEP) ซึ่งหาได้โดยการจัดให้ SNR มีค่าเท่ากับ 1 จะได้

$$i_{sig,NEP}^2 = (2q\Delta f)i_{sig,NEP} + (2q\Delta f)i_{eq}$$

$$i_{sig,NEP}^2 - (2q\Delta f)i_{sig,NEP} - (2q\Delta f)i_{eq} = 0$$

จะได้

$$i_{sig,NEP} = (q\Delta f) \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2i_{eq}}{q\Delta f}} \right]$$

ขนาดของความหนาแน่นของแสงที่ตกกระทบ ที่จำเป็นต่อการเกิด $i_{sig,NEP}$ หาได้จาก

$$i_{sig,NEP} = q\eta \frac{\lambda}{hc} NEP = (q\Delta f) \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2i_{eq}}{q\Delta f}} \right]$$

$$NEP = \frac{hc}{\eta\lambda} \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2i_{eq}\Delta f}{q}} \right]$$

สำหรับกรณีที่เกิดขึ้นบ่อยๆ ซึ่งสัญญาณรบกวนเด่นกว่าสัญญาณที่ป้อนให้กับระบบจะได้ $i_{eq} > q\Delta f/2$ และ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$NEP = \left[\frac{hc}{\eta\lambda} \Delta f \right] \left[1 + \sqrt{1 + \frac{2i_{eq}}{q\Delta f}} \right]$$

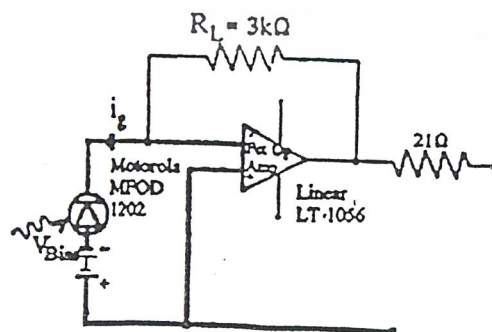
และ specific detectivity D^* เป็น

$$D^* = \frac{\eta\lambda}{hc} \sqrt{\frac{qAd}{2i_{eq}}}$$

จะเห็นว่าสภาพการตอบสนองจะแปรตามความยาวคลื่นที่เปลี่ยนแปลงไปของแสงที่มาตกกระทบบนอย่างชัดเจน เนื่องจากคุณสมบัติการสะท้อนและการดูดกลืนของซิลิกอนเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น ความต่างศักย์ที่ไบอัสให้กับไดโอดมีผลกระทบต่อกระแสสมพาทะในซิลิกอน และอุณหภูมิจะมีผลกระทบต่อทั้งค่าคงที่เชิงแสงและกระบวนการผสมประจุในซิลิกอน จึงมีผลต่อสภาพการตอบสนอง แต่สำหรับความต่างศักย์ที่ให้อุณหภูมิกลับทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไม่มากนัก

2.3.5 การเชื่อมต่อกับพีไอเอ็น โฟโตไดโอด

โดยความหมายทั่วไปแล้วอาจเปรียบเทียบพีไอเอ็น โฟโตไดโอดได้กับแหล่งกำเนิดกระแสที่ให้กระแสคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งปริมาณของกระแสขึ้นอยู่กับปริมาณของแสงที่ตกกระทบบนและการเปลี่ยนแปลงสภาพการตอบสนองกับความเข้มของแสงเป็นแบบเชิงเส้น ค่าการเบี่ยงเบนจากความเป็นเชิงเส้นมากที่สุดเกินขอบเขตของสภาพการตรวจวัดเมื่อความเข้มแสงมีค่าตั้งแต่ 10^{-13} W/m^2 ถึง 10^{-3} W/m^2 ประมาณ 5% ถ้าแสงที่มีความเข้มมากกว่า 10 mW/cm^2 การเบี่ยงเบนจากความเป็นเชิงเส้นก็จะเกิดได้กับพีไอเอ็น โฟโตไดโอดทั้งแบบกึ่งวงจรรวมและแบบแพ็คเกจซีพอสตัทท์ และแบบแพ็คเกจซีพอสตัทท์ สำหรับแสงที่มีความเข้มในระดับสูงขึ้นไป เซลล์เชิงแสงควรจะได้รับไบอัสแบบ back biased เพื่อความเป็นเชิงเส้นที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น และศักย์ไฟฟ้าที่ให้กับอุปกรณ์ควรมีค่ามากกว่า 50V เมื่อระบบได้รับแสงที่มีความเข้มมากกว่า 10 mW/cm^2



รูปที่ 2.20 แสดงวงจรสมมูลของซิลิกอนโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 20 แสดงวงจรสมมูลของอุปกรณ์ทั้งแบบกำแพงศักย์ขอตติ์ และแบบแพร์ซีมในแนวระนาบ ซึ่งมีความจุไฟฟ้าที่เขตปลอดพาหะ C_d , ความต้านทานไฟฟ้าที่ขนานกับรอยต่อ, R_d (เป็นความต้านทานของเขตปลอดพาหะ) และความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ออนุกรมกับรอยต่อ R_s (เป็นความต้านทานของชั้นสารที่นอกเหนือเขตปลอดพาหะ) และ I_0 เป็นกระแสที่เกิดเมื่อแสงที่มีความเข้มจำนวนหนึ่งตกกระทบบนอุปกรณ์

ถ้าพีไอเอ็น โฟโตไดโอดทำงานในแบบลัดวงจร (คือ $R = 0$) กระแสที่เกิดขึ้นจะมีความสัมพันธ์เป็นเชิงเส้นกับแสงที่ตกกระทบบน และเมื่อ R_L มีค่าเพิ่มขึ้น ระบบของอุปกรณ์จะแสดงความสัมพันธ์ที่เบี่ยงเบนไปจากความสัมพันธ์ที่เป็นแบบเชิงเส้น จนกระทั่ง R_L มีค่าเป็นอนันต์ ($R_L = \infty$) หรือเปิดวงจร ความต่างศักย์ที่ได้ออกมาเมื่อวงจรอยู่ในสภาพเปิดจะสอดคล้องกับลอการิทึม (log) ของความเข้มแสงตกกระทบบน ค่ากระแสมืดที่น้อยที่สุดยังคงอยู่ในระบบ ความต่างศักย์เชิงแสงซึ่งทำให้ระบบนี้เป็นอุดมคติสำหรับการวัดในระดับแสงต่ำๆ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของกระแสมืดมีผลต่อกระแสรวมที่ได้ทั้งหมด

การทำงานในแบบการให้ไบอัสย้อนกลับ ความสัมพันธ์ที่ระบบแสดงออกมาจะอยู่ในรูปแบบเชิงเส้น ถ้าแสงมีความเข้มไม่มากไปกว่า 10 mW/cm^2 และค่าความต่างศักย์ที่ให้กับระบบเพื่อจะไบอัสต้องมีค่ามากกว่าผลคูณระหว่างค่ากระแสสูงสุด กับความต้านทานพาหะ ($i_g R_L V_B$)

สำหรับระบบที่ต้องการตรวจวัดสัญญาณที่มีกำลังสูงๆ พีไอเอ็น โฟโตไดโอดต้องการความต้านทานพาหะ R_L ที่มีค่าสูงมากเช่นเดียวกัน ซึ่งจะทำให้มีสภาพการตอบสนองต่อความถี่ (ช่วงกว้างของความถี่) สูง เช่น ถ้าช่วงกว้างของกำลังขยายมีค่าคงที่ ระบบจะไม่ขึ้นกับสิ่งรบกวนภายนอกมากนัก ซึ่งค่านี้จะมีความสัมพันธ์แบบผกผันกับความจุไฟฟ้าของรอยต่อ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีค่าประมาณ 10^{18}

พีไอเอ็น โฟโตไดโอดที่ทำงานในแบบการไบอัสย้อนกลับจะแสดงพฤติกรรมเหมือนกับแหล่งกำเนิดกระแสที่ความต้านทานชั้น (ขนาน) สูงๆ ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าไม่มากนัก รวมถึงความต้านทานที่ต่ออนุกรมอยู่กับรอยต่อมีค่าไม่มากนัก สำหรับการขยายสัญญาณควรจะทำในแบบการขยายสัญญาณด้านความต่างศักย์ถ้าความต้านทานพาหะมีค่าสูงๆ ซึ่งโดยทั่วไปแล้วพีไอเอ็น โฟโตไดโอดถ้าถูกต่อโดยตรงกับช่องรับสัญญาณของวงจรรขยาย อาจเกิดปัญหาเนื่องจากความไม่เข้ากันของสภาพต้านทานไฟฟ้า จนอาจทำให้สัญญาณถูกลดทอนลงได้ อาจแก้ปัญหาได้โดยการให้ Trans Impedance Amplifier , TIA ดังรูป ซึ่งจะทำการแปลงสัญญาณจากกระแสให้เป็นความต่างศักย์ เพราะว่าค่าความต้านทานของรอยต่อของการทำงานโดยการไบอัสย้อนกลับมีค่ามากกว่า Operation Amplifier, Op Amp ที่ใช้สำหรับวงจรรขยายควรจะเป็นแบบที่ความต้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทานขาเข้ามีค่าสูง หรือแบบ FET input กระแสเชิงแสงที่เกิดขึ้น จะไหลผ่านตัวต้านทานป้อนกลับ R_L ที่ทำหน้าที่คล้ายๆ พาหะสำหรับโฟโตไดโอด และเนื่องจากช่องรับสัญญาณแบบเปลี่ยนค่ากลับ จะแสดงคุณสมบัติเสมือนว่าเป็นกราวด์ จะได้ความต่างศักย์ที่ได้จากวงจรขยายเป็น

$$V_o = -i_g R_L$$

จะได้กำลังเฉลี่ย P_{av} เป็น

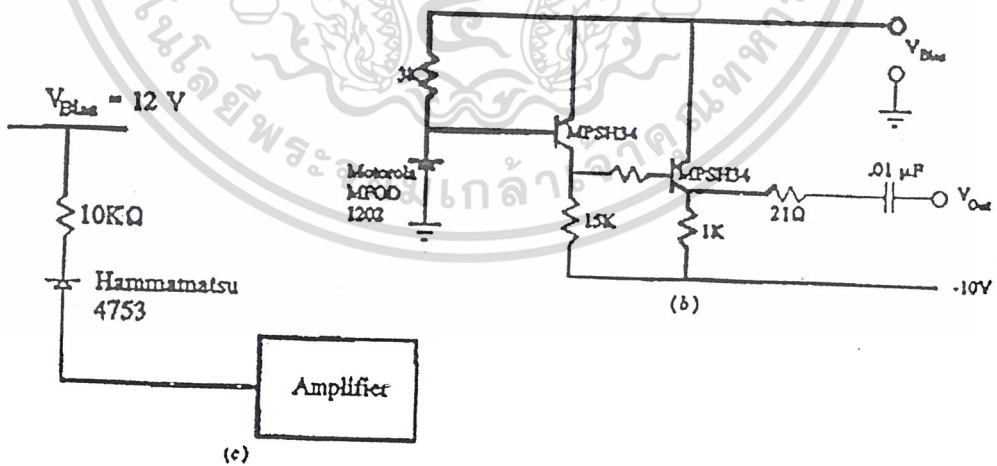
$$P_L = \frac{V_o^2}{R_{out}} = \frac{i_g^2 R_L^2}{R_{out}}$$

เปรียบเทียบกับกำลังที่ R_L คือ

$$P_L = R_L i_s^2 = \frac{i_g^2 R_L^2}{1 + \omega^2 (R_s + R_L)^2 C_d^2}$$

กำลังงานที่ได้จะเพิ่มโดยองค์ประกอบของ $R_L / 4R_{out}$ ซึ่งโดยทั่วไป $R_L = 1 \text{ M}$
 $R_{out} = 100 \Omega$ จะได้กำลังงานเป็น 2500 เท่าของกำลังงานที่ให้เข้าไป

สามารถแสดงตัวอย่างวงจรที่ใช้กับพีไอเอ็น โฟโตไดโอดได้ดังรูป



รูปที่ 2.21 แสดงวงจรขยายที่ใช้กับพีไอเอ็นโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 วงจรขยายสัญญาณ

ในวงจรขยายขยาย อุปกรณ์ที่ใช้ในการขยายสัญญาณคือ ออปแอมป์ซึ่งเป็นไอซีเชิงเส้นชนิดหนึ่งที่เป็นวงจขยาย (ไฟตรง) อัตราการขยายสูง ใช้งานในช่วงความถี่ 0 ถึง 1 MHz เพียงแต่ต่อตัวต้านทานต่างๆ แก่ออปแอมป์ก็สามารถปรับอัตราขยายแรงดันและแบนด์วิดท์ตามที่ต้องการได้ มีออปแอมป์ในท้องตลาดมากกว่า 2,000 ชนิด เกือบทั้งหมดเป็นไอซีเชิงเส้น ที่อุณหภูมิห้องมีกำลังสูญเสียน้อยกว่า 1 W ออปแอมป์นอกจากจะเป็นวงจขยายโดยตรงแล้ว อาจต่อและดัดแปลงในการทำงานอย่างอื่นได้มากมาย

2.4.1 ต้นกำเนิดของออปแอมป์

ภาคแรกของออปแอมป์ส่วนใหญ่จะเป็นวงจขยายผลต่าง (Differential Amplifier) และภาคสุดท้ายมักเป็นวงจขยายคลาส B พุช - พูล อิมิตเตอร์โฟลโลเวอร์รูปที่ 2.18 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์ มี 2 อินพุต 1 เอาท์พุท อินพุตตัวบนเรียกว่า อินพุตไม่กลับเฟส (Noninverting Input) มีเครื่องหมายเป็นลบซึ่งแสดงว่า V_{out} จะกลับเฟสกับ V_2 180° โดยสมมุติให้แรงดันทั้งหมดของออปแอมป์เป็น

$$V_{out} = A(V_1 - V_2)$$



รูปที่ 2.22 แสดงสัญลักษณ์ของออปแอมป์

นั่นคือแรงดันเอาท์พุทเท่ากับอัตราขยายแรงดันคูณกับผลต่างของแรงดันของอินพุททั้งสอง ไอซีออปแอมป์ตัวแรกผลิตขึ้นในปี ค.ศ. 1965 คือ μA 709 ออปแอมป์ในตระกูล 709 มีมากมาย เช่น MC 1709, LM 709 ฯลฯ ในตระกูล 709 ยังแบ่งออกเป็น 709, 709A, 709B และ 709C โดยเหมือนกันในลักษณะวงจร แต่ต่างกันที่ความทนทาน 709 มีความทนทานสูงสุด ราคาแพงที่สุด 709C มีความทนทานต่ำที่สุด ราคาต่ำที่สุด

ตระกูล 709 เป็นตระกูลแรกของออปแอมป์ซึ่งมีข้อเสียหลายอย่างได้แก่

- 1.) ไม่มีการป้องกันการลัดวงจร หากลัดวงจรปลายเอาท์พุทลงกราวด์ ออปแอมป์จะเสียหายและพังได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.) ต้องต่อกับอุปกรณ์ภายนอกหลายตัว ทำให้ลำบากยุ่งยาก

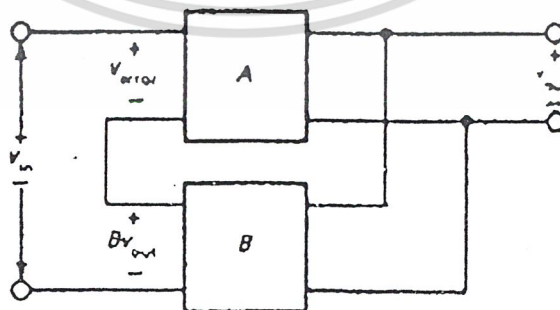
ตระกูล 741 เป็นตระกูลที่ 2 ของออปแอมป์ซึ่งมีการป้องกันการลัดวงจร และอุปกรณ์ภายนอกที่ต้องนำมาต่อร่วมน้อย มีอินพุทอิมพีแดนซ์สูง (มากกว่า $1\text{ M}\Omega$) เอมท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำลง (75Ω) อัตราขยายแรงดันมากขึ้น (200,000) ราคาไม่แพง ใช้งานจึงเป็นที่นิยมสูง ออปแอมป์จะมีลักษณะดังนี้ คือ

- 1.) มีผลตอบสนองความถี่ในย่านสัญญาณไฟตรงถึงความถี่สูงๆ
- 2.) อินพุทอิมพีแดนซ์สูง เอาท์พุทอิมพีแดนซ์ต่ำ อัตราขยายแรงดันสูง
- 3.) การใช้ออปแอมป์ต้องมีการต่ออุปกรณ์นอกเพิ่มเติมเสมอก่อนจะใช้งาน การป้อนกลับแบบลบ (Negative Feedback)

การป้อนกลับแบบลบ หมายถึงสัญญาณบางส่วนของเอาท์พุทที่ถูกส่งไปยังอินพุทจะมีเฟสตรงข้ามกับสัญญาณอินพุท ประโยชน์ของการป้อนสัญญาณแบบลบคือทำให้อัตราขยายคงที่ เปลี่ยนแปลงค่าอินพุทอิมพีแดนซ์ให้ดีขึ้น สามารถลดการผิดเพี้ยนไม่เป็นเชิงเส้น และเพิ่มแบนด์วิดท์

แนวคิดพื้นฐาน

รูปที่ 23 เป็นตัวอย่างของวงจรรายขยายป้อนกลับแบบลบ อินพุทที่เข้าไปในวงจร (บล็อก A) เรียกว่าแรงดันเออร์เรอร์ (Error Voltage) ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างสัญญาณอินพุท V_{in} กับสัญญาณป้อนกลับ Bv_{out} ในระบบป้อนกลับแบบลบ แรงดันเออร์เรอร์จะมีค่าเข้าใกล้ศูนย์ เนื่องจากอัตราขยาย A มีค่าประมาณ 10,000 ถึงมากกว่า 1,000,000 และแรงดันเอาท์พุทมักจะมีค่าน้อยกว่า 10V ดังนั้นในบางครั้งแรงดันเออร์เรอร์จะมีค่าเป็นไมโครโวลต์ (ที่ความถี่ต่ำ) เมื่อเทียบแรงดันอื่นๆ ในวงจรแล้ว V_{error} จึงน้อยมาก



รูปที่ 2.23 แสดงการป้อนกลับแบบลบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

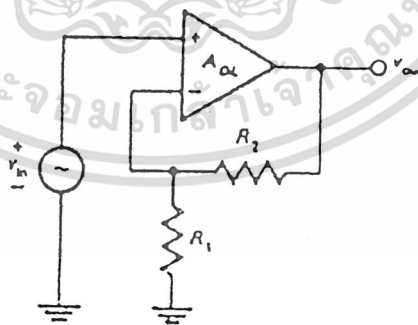
อัตราขยายภายในวงจรเป็น A เพิ่มขึ้นเนื่องจากอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงหรือเหตุผลอื่นๆ แรงดันเอาต์พุตก็จะเพิ่มขึ้นตาม นั่นคือแรงดันที่ถูกป้อนกลับไปยังอินพุตก็จะเพิ่มขึ้นด้วย บล็อก B มักจะเป็นตัวแบ่งแรงดันที่มีอัตราขยายเท่ากับ B (ระหว่าง 0 ถึง 1) ดังนั้นสัญญาณป้อนกลับ BV_{out} เป็นส่วนหนึ่งของแรงดันเอาต์พุต สัญญาณที่ป้อนกลับไปยังอินพุตจะถูกกลับเฟสให้ตรงข้ามกับสัญญาณอินพุต V_{in} จึงทำให้ V_{error} ลดลง ซึ่งจะไปชดเชยกับการเพิ่มขึ้นของอัตราขยาย A พอดี ผลก็คือ V_{out} เกือบจะไม่เพิ่มขึ้นเลย

และในกรณีที่อัตราขยาย A ลดลงก็เช่นเดียวกันคือ เมื่อ A ลดลง V_{out} ก็ลดลง BV_{out} ก็จะลดลงด้วยจึงทำให้ V_{error} เพิ่มขึ้นซึ่งจะไปชดเชยกับการลดลงของอัตราขยาย A พอดี ผลก็คือ V_{out} ไม่ลดลงเลยหรืออาจจะลดลงก็เพียงเล็กน้อย

การพยายามที่จะเปลี่ยนแปลงแรงดันเอาต์พุตที่ป้อนกลับให้แก่เอาต์พุตเป็นสาเหตุให้ต้องทำแรงดันเออเรอร์เปลี่ยนแปลงในทิศทางตรงข้ามคือ การป้อนกลับแบบลบ ผลที่เกิดขึ้นคือแรงดันเอาต์พุตจะเสมือนไม่ได้ขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงภายในที่ทำให้อัตราขยาย A เปลี่ยนไป จะสังเกตได้ว่า สัญญาณเอาต์พุตจะมีเฟสตรงกับสัญญาณอินพุต นั่นคือระบบเป็นวงจขยายแบบไม่กลับเฟส (Noninverting Amplifier) ที่การป้อนกลับแบบลบ

2.4.2 วงจขยายแบบไม่กลับเฟส

รูปที่ 2.24 แสดงการต่อออปแอมป์เป็นวงจขยายที่มีการป้อนกลับแบบลบ สัญญาณอินพุตจะเข้าที่อินพุต บวกรของออปแอมป์



รูปที่ 2.24 แสดงวงจขยายแบบไม่กลับเฟส

ออปแอมป์ที่มีอัตราขยายภายในเป็น A_{OL} และมีตัวต้านทานภายนอกเป็น R_1, R_2 เพื่อเป็นตัวแปลงแรงดันให้ป้อนกลับ เนื่องจากแรงดันที่ป้อนกลับนี้เข้าออปแอมป์ที่อินพุทลบซึ่งตรงข้ามกับสัญญาณอินพุท เรียกว่าเกิดการป้อนกลับแบบลบขึ้นนั่นเอง

2.4.3 อัตราขยายแรงดัน

หาค่า B เพื่อที่จะใช้ในการหาอัตราขยายแรงดัน

$$B = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

ดังนั้นอัตราขยายลูป-ปิดจะมีค่าประมาณเท่ากับ

$$A_{cl} = \frac{1}{B} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

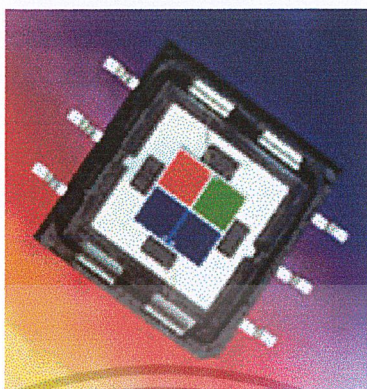
$$A_{cl} = \frac{R_2}{R_1} + 1$$

จะเห็นว่าอัตราขยายลูป-ปิด จะขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของตัวต้านทานที่ใช้ในการป้อนกลับของสัญญาณ ซึ่งเราสามารถใส่ตัวต้านทานด้วยการกำหนดค่าได้ถูกต้อง จึงทำให้ค่าอัตราขยายลูป-ปิด ที่ถูกต้องด้วย แม้ว่าอุณหภูมิหรือปัจจัยอื่นๆ จะเกิดการเปลี่ยนแปลง แต่อัตราขยายลูป-ปิดจะยังคงที่เสมอ

2.4.4 คุณสมบัติของ RGB Color Sensor

RGB Color Sensor เป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับวัดแสง ซึ่งมีเบอร์เป็น s7505 ของบริษัท HAMAMATSU ประเทศญี่ปุ่น ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดชนิด si PIN photodiode ที่มีโครงสร้างและคุณสมบัติดังนี้

โครงสร้างของ RGB Color Sensor จะเป็นสี่เหลี่ยมขนาด 9×9.6 มม. ประกอบด้วยเซลล์ 3 เซลล์ คือ เซลล์สีแดง เซลล์สีเขียว และเซลล์สีน้ำเงิน โดยเซลล์สีน้ำเงินจะมีพื้นที่มากกว่าเซลล์อีก 2 สีเป็น 2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แสดงรูป RGB Color Sensor



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

การศึกษาทดลองถึงระบบวัดสีของวัตถุโดยใช้ RGB color sensor ในโครงการพิเศษนี้ เราได้ทำการแบ่งการดำเนินการวิจัยออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้ คือ

3.1 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการศึกษา

เป็นการศึกษาค้นคว้า และรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับทฤษฎีของแสงสี หลักการผสมของแสงสี รวมทั้งแหล่งกำเนิดของแสงต่างๆที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไป เพื่อที่จะได้เลือกมาใช้ในการศึกษาทดลองในโครงการนี้ และศึกษาถึงระบบวัดสี CIE เพื่อนำมาใช้คำนวณและทำนายสูตรสีผสม เพื่อที่จะหาสัดส่วนของแม่สีของสีต่างๆ

3.2 การดำเนินการวิจัยในขั้นตอนการทดลอง

การใช้ RGB color sensor ในการจำแนกสีของวัตถุ ซึ่งในการจำแนกสีของวัตถุโดยใช้ RGB color sensor นั้นแหล่งกำเนิดมีความสำคัญมาก เพราะสัดส่วนขององค์ประกอบสีของวัตถุ นั้นขึ้นอยู่กับค่าสัดส่วนขององค์ประกอบสีของแหล่งกำเนิด ดังนั้นขั้นตอนในการศึกษาทดลองและดำเนินการจะต้องควบคุมตัวแปรต่างๆ เช่น แสงรบกวนจากภายนอก อัตราขยายของวงจรขยายที่ใช้ในการทดลองต้องมีค่าที่เที่ยงตรงเท่ากันในทุกๆองค์ประกอบสี คือ R, G, B ซึ่งขั้นตอนในการทดลองมีดังต่อไปนี้

3.2.1 การเตรียมอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

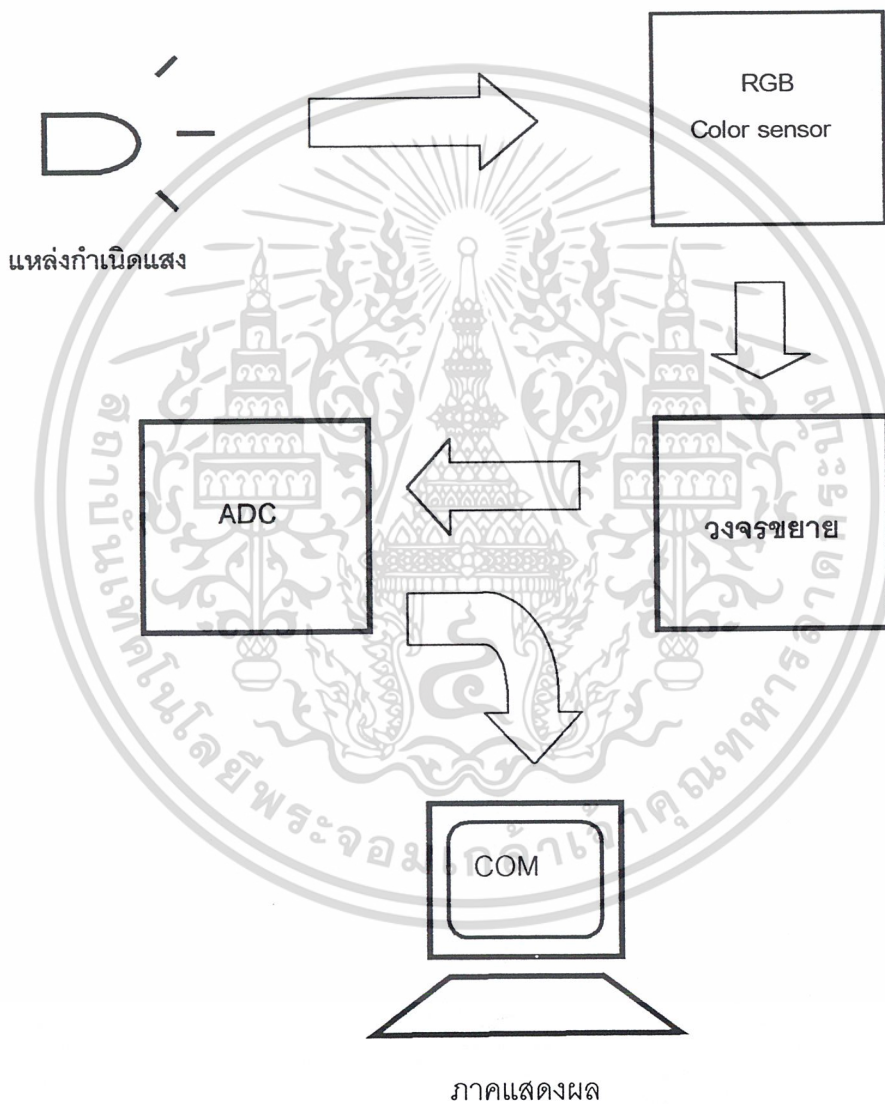
ซึ่งจะประกอบไปด้วยอุปกรณ์ต่อไปนี้ คือ

1. RGB color sensor
2. วงจรขยาย (LF412A)
3. แหล่งกำเนิดแสง
 - หลอดทังสเตน
 - Full Color RGB
4. กล้องทีบแสง
5. Filter สีต่างๆ
6. Interface Circuit

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

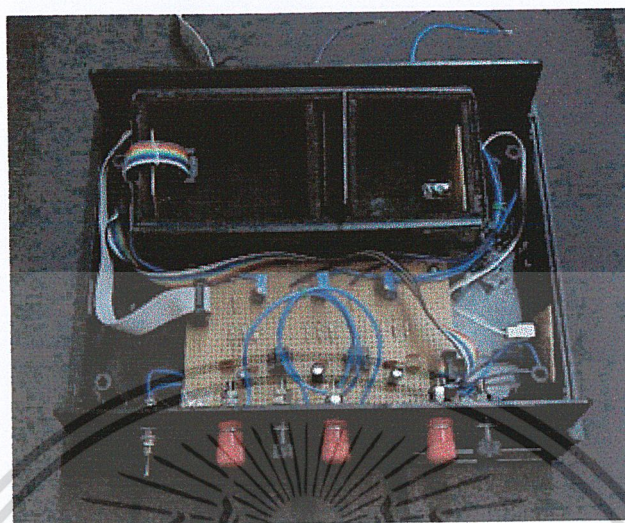
3.2.1 การจัดอุปกรณ์ในการทดลอง

การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของแหล่งกำเนิด, RGB color sensor, และการจำแนกสีของวัตถุ จะจัดอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปไดอะแกรมต่อไปนี้

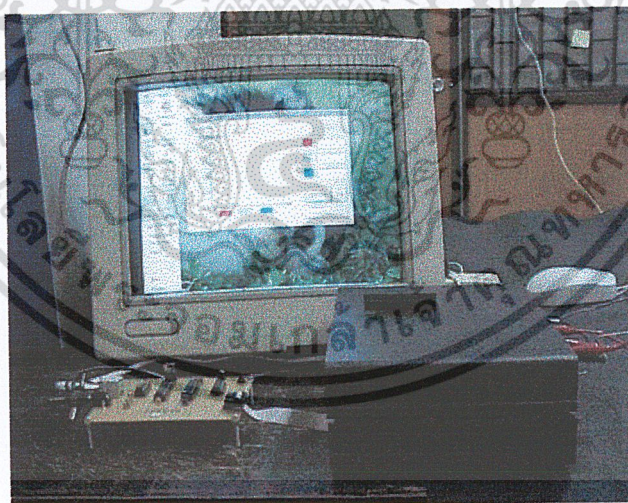


รูปที่ 3.1 Diagram ของระบบวัดสี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 การจัดอุปกรณ์ในการวัดองค์ประกอบสี



รูปที่ 3.3 แสดงระบบวัดสีของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองจะแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอนใหญ่ๆ ดังนี้

- ทำการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติของ Full Color LED

1. ทำการออกแบบวงจรสำหรับ Full Color LED เพื่อใช้ในการปรับแหล่งกำเนิดแสงให้ได้แหล่งกำเนิดแสงขาวที่เหมาะสมต่อการใช้งาน
2. ทำการทดลองเพื่อหาระยะห่างระหว่างตัวแหล่งกำเนิดแสง Full Color LED กับตัวตรวจวัด RGB Color Sensor ที่เหมาะสมเพื่อว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่ตัวตรวจวัดจะไม่เป็นกระแสไฟฟ้าในช่วงอิ่มตัวหรือรั่วไหล

- ทำการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติของ RGB color sensor

1. ทำการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติของ sensor โดยการนำไปวัดค่าความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบที่จะให้ค่ากระแสไฟฟ้ามากที่สุด แล้วนำไปเปรียบเทียบกับค่าใน data sheet เพื่อเป็นการสอบเทียบตัว sensor
2. ทำการทดลองเพื่อศึกษาเกี่ยวกับผลของความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงที่มีการเปลี่ยนแปลงว่ามีผลต่อการทำงานของตัวตรวจวัดหรือไม่ อย่างไร โดยใช้ Full Color LED เป็นแหล่งกำเนิดแสงจากนั้นทำการปรับความต้านทานของแหล่งกำเนิดแสงเป็นค่าต่างๆ แล้วทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าจากตัวตรวจวัดที่ค่าความต้านทานแต่ละค่า เพื่อนำผลที่ได้มาทำการเปรียบเทียบกัน

- ทำการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน

1. ทำการทดลองเพื่อศึกษาการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนที่ใช้ โดยสเปกโตรมิเตอร์และ pmt เป็นตัวตรวจวัด แล้วทำการบันทึกค่าที่ได้จากตัวตรวจวัดที่ความยาวคลื่นของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนแต่ละค่า
2. ทำการทดลองเพื่อวัดองค์ประกอบสีของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน โดยใช้ RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจวัด คำนวณค่าที่วัดได้ด้วยวิธีการตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE แล้วเปรียบเทียบค่าองค์ประกอบสีแต่ละสีของแหล่งกำเนิด
3. ทำการทดลองเพื่อวัดค่าองค์ประกอบสีของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนที่แต่ละความยาวคลื่น โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์ในการแยกความยาวคลื่นของแสงจากแหล่งกำเนิด และใช้ RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจวัด นำค่าที่ได้จากการวัดไปคำนวณตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE และนำค่าที่ได้จากการคำนวณมาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิดทั้งสแตนที่แต่ละความยาวคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ทำการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติการดูดกลืนของ filter

1. ทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้ เพื่อศึกษาการดูดกลืนแสงของ filter แต่ละสี โดยใช้ เครื่องสเปกโตรมิเตอร์แยกแสงขาวที่ให้กับ filter และใช้ pmt เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ทะลุผ่าน จาก filter แต่ละสี บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากตัวตรวจวัด แล้วนำค่าที่ได้ไปพล็อตกราฟ ระหว่างค่าที่วัดได้กับค่าความยาวคลื่น
2. วิเคราะห์สเปกตรัมที่ได้ เพื่อดูแนวโน้มขององค์ประกอบสีของ filter แต่ละสี เพื่อเปรียบเทียบกับค่าที่วัดได้ในกรณีที่ใช้ RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจวัด

- ทำการทดลองเพื่อวัดค่าองค์ประกอบสีของวัตถุ

จัดการทดลองเป็น 2 แบบ คือ แบบการสะท้อน และ แบบทะลุผ่าน

แบบสะท้อน

1. จัดอุปกรณ์ให้เป็นการทดลองแบบสะท้อน โดยหาดำแหน่งแสงตกกระทบและแสงสะท้อนที่เหมาะสม ตามกฎของสเนล ใช้ทั้งสเดนเป็นแหล่งกำเนิดแสง และใช้ RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจวัด
2. ทำการวัดองค์ประกอบสีของ filter แต่ละสี บันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวตรวจวัด นำค่าที่ได้ไปคำนวณตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE แบบทะลุผ่าน

1. จัดอุปกรณ์ให้เป็นการทดลองแบบทะลุผ่าน ใช้ Full Color LED เป็นแหล่งกำเนิดแสง(สี) และ RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจวัด

2. ปรับ Full Color LED ให้เป็นแม่สีทางแสงทีละสี และวัดค่าองค์ประกอบของสี
3. บันทึกค่าที่วัดได้จากตัวตรวจวัด และนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE
4. เปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงจาก Full Color LED เป็นทั้งสเดน วัดค่าองค์ประกอบสีของ filter แต่ละสี โดยนำแผ่น filter วางคั่นระหว่างแสงที่ส่องผ่านระหว่างแหล่งกำเนิดกับตัวตรวจวัด
5. บันทึกค่าที่วัดได้จากตัวตรวจวัด และนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE

- ทำการวิเคราะห์และเปรียบเทียบผลการทดลองที่ได้

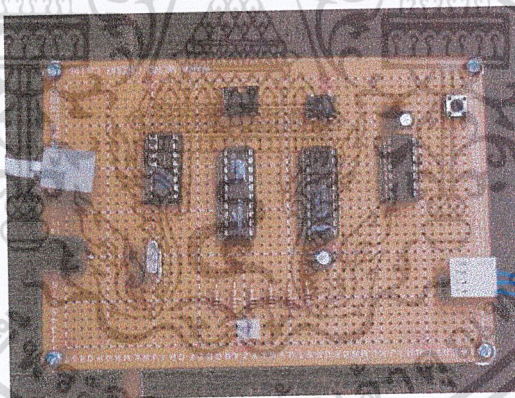
1. เปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองกับตารางองค์ประกอบสีของแหล่งกำเนิดทั้งสเดนที่แต่ละความยาวคลื่น
2. วิเคราะห์ความผิดพลาดของผลที่ได้จากการทดลอง และพิจารณาหาสาเหตุของความผิดพลาด

- ทำการศึกษาการใช้โปรแกรมในการวิเคราะห์และแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับค่าที่วัดได้จากตัวตรวจวัด RGB Color Sensor นี้จะวัดได้เป็นค่ากระแสไฟฟ้า 3 ค่า ดังนั้นจึงเป็นการลำบากต่อการวัดค่าเพราะต้องใช้เครื่องวัดถึง 3 เครื่อง และค่าที่ได้ก็ยังคงต้องนำไปคำนวณตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE เสียก่อนจึงจะนำมาวิเคราะห์ได้ ซึ่งก่อให้เกิดความลำบากต่อการนำเสนอผลงานเช่นกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการสะดวกต่อการทำการทดลองและการนำเสนอผลงานที่น่าสนใจ จึงได้มีการศึกษาเกี่ยวกับโปรแกรมและส่วนแสดงผล ซึ่งเมื่อใช้การนำเสนอในรูปแบบนี้สามารถที่จะรับค่าที่วัดได้พร้อมกันทั้ง 3 ค่า และทำการคำนวณค่าได้พร้อมกันทั้ง 3 ค่าเช่นกัน สำหรับโปรแกรมที่เลือกมาใช้ในการนำเสนอโครงการนี้คือโปรแกรม Visual Basic เนื่องจากใช้งานง่ายเพราะสามารถทำงานได้บนระบบปฏิบัติการ Window และมีรูปแบบการนำเสนอที่น่าสนใจ ซึ่งขั้นตอนในการศึกษาและดำเนินงานมีดังนี้

1. ทำการศึกษาและออกแบบวงจรที่ใช้เชื่อมต่อระหว่างตัวตรวจวัดกับคอมพิวเตอร์ เนื่องจากค่าที่วัดได้จากตัวตรวจวัดจะเป็นค่าอนาล็อก แต่คอมพิวเตอร์จะรับสัญญาณที่เป็นดิจิตอล ดังนั้นวงจรที่ใช้จึงต้องได้รับการออกแบบมาเพื่อที่จะให้ทำหน้าที่เป็นทั้งส่วนเชื่อมต่อและส่วนแปลงสัญญาณดังกล่าวด้วย ซึ่งวงจรมีดังกล่าวดังแสดงดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 Interface Circuit

ค่าที่รับมาจากตัวตรวจวัดจะยังเป็นข้อมูลดิบอยู่ ยังไม่สามารถนำข้อมูลนี้ไปทำการวิเคราะห์หรือใช้งานใดๆ ได้ การที่จะนำค่าดังกล่าวไปใช้งานได้ต้องนำค่าที่ได้ไปคำนวณตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE ก่อน ดังนั้นจึงต้องเขียนโปรแกรมให้สามารถคำนวณหรือประมวลผลของค่าข้อมูลดิบที่ได้รับให้เป็นค่าที่สามารถนำไปใช้งานได้หรือเรียกว่าค่า Normalize โดยมีพื้นฐานวิธีการคำนวณมาจากทฤษฎีดังกล่าว โดยปกติแล้ววิธีการแบบระบบวัดสี CIE จะมีกระบวนการที่ค่อนข้างยุ่งยาก แต่ในโครงการพิเศษชิ้นนี้จะทำการคำนวณอย่างๆ แต่ที่ยึดหลักการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ของระบบวัดสี CIE อยู่ โดยจะอนุมานว่าค่ากระแสที่วัดได้จากตัวตรวจวัดก็คือค่า Tristimulus Value นั้นเอง จากนั้นจะนำค่าดังกล่าวไปคำนวณหาค่า Chromaticity Coordinate ต่อไป ตามทฤษฎีการคำนวณของระบบวัดสี CIE จะใช้ค่ากระแสไฟฟ้าที่วัดได้มาใช้ในการคำนวณ ซึ่งแม้ว่าค่าที่โปรแกรมรับเข้าไปคำนวณจะเป็นค่าแรงดันที่วัดได้ ไม่ใช่ค่ากระแสก็ตาม พบว่าค่าที่คำนวณได้มานั้นให้ผลที่เป็นไปในแนวทางเดียวกัน เนื่องจากค่ากระแสไฟฟ้าและแรงดันมีความสัมพันธ์กันเป็นแบบเชิงเส้น สำหรับวงจรดังกล่าวได้แสดงไว้ในส่วนของภาคผนวกแล้ว สำหรับการแสดงผลทางหน้าจอ เราสามารถเลือกรูปแบบการนำเสนอได้อย่างเหมาะสม



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลอง

ในส่วนของผลที่วัดได้ตามลำดับขั้นตอนของวิธีการทดลองจะแสดงได้เป็นสองส่วนคือ

4.1 ผลที่ได้จากการใช้ RGB color sensor เป็นตัวตรวจวัด

การวัดค่าองค์ประกอบสีของแสงสีต่างๆ ทำการจัดอุปกรณ์เป็น 2 แบบคือ แบบสะท้อน และแบบทะลุผ่าน

การจัดอุปกรณ์แบบสะท้อน จะใช้แหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดทั้งสแตน โดยผลที่วัดได้จะเป็น

4.1.1 ค่าองค์ประกอบสีของแสงที่ตกกระทบวัตถุสีต่างๆแล้วสะท้อนมายัง RGB color sensor

การจัดอุปกรณ์แบบทะลุผ่าน จะใช้แหล่งกำเนิด 2 ชนิด คือ full color LED และ หลอดทั้งสแตน ผลการทดลองที่วัดได้จะเป็น

4.1.2 ค่าองค์ประกอบสีของแสงจากหลอด full color เมื่อทำการปรับให้แสงออกมาเป็น 3 สี โดยปรับให้แสงออกมาทีละสี

4.1.3 ค่าองค์ประกอบสีของแสงจากหลอดทั้งสแตน โดยมี filter สีต่างๆกรองแสงที่ทะลุผ่านออกมา

4.2 กราฟแสดงผลค่าที่วัดได้โดยการจัดอุปกรณ์ตามกรณีต่างๆ

ตารางที่ 4.1 แสดงองค์ประกอบสี R G B ของแสงขาวจากหลอด Full Color LED

ครั้งที่	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี		
	R	G	B	X	Y	Z
1	13.3	6.8	26.5	0.285	0.146	0.569
2	13.5	6.7	26.6	0.288	0.143	0.568
3	13.4	6.7	26.5	0.288	0.144	0.569
4	13.2	6.8	26.4	0.284	0.147	0.569
5	13.2	6.7	26.4	0.285	0.145	0.570
6	13.4	6.9	26.6	0.286	0.147	0.567
7	13.2	6.8	26.4	0.284	0.147	0.569
8	13.3	6.8	26.5	0.285	0.146	0.569
9	13.2	6.9	26.6	0.283	0.148	0.570
10	13.2	6.8	26.5	0.284	0.146	0.570
			เฉลี่ย	0.285	0.146	0.569

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการกระจายพลังงานของแสงจากหลอดทั้งสแตน โดยใช้เครื่องสเปกโตรมิเตอร์เป็นเครื่องวัด

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	R	G	B	R	G	B
700	2.39	1.57	1.23	2.32	1.56	1.25
690	2.46	1.56	1.23	4.46	1.59	1.27
680	4.29	1.57	1.24	9.14	1.56	1.29
670	7.68	1.55	1.26	10.25	1.56	1.29
660	10.24	1.56	1.27	9.8	1.56	1.29
650	10.25	1.57	1.28	9.32	1.58	1.28
640	9.87	1.56	1.27	8.81	1.55	1.29
630	9.3	1.56	1.27	8.06	1.52	1.27
620	8.52	1.57	1.27	7.36	1.52	1.25
610	8.01	1.55	1.25	5.25	1.44	1.26
600	6.19	1.51	1.25	3.18	1.25	1.21
590	1.97	1.02	1.24	1.26	1.24	0.76
580	0.87	0.52	1.24	0.77	1.24	0.16
570	0.7	0.12	1.24	0.7	1.25	0.22
560	0.67	0.38	1.25	0.7	1.25	0.68
550	0.68	0.72	1.26	0.67	1.3	0.84
540	0.67	0.87	1.33	0.68	1.41	0.8
530	0.69	0.72	1.45	0.65	0.39	1.63
520	0.67	0.29	1.63	0.65	0.37	1.92
510	0.68	0.66	2.12	0.61	0.81	2.44
500	0.64	0.93	2.45	0.66	1.19	2.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (นาโนเมตร)	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2		
	R	G	B	R	G	B
490	0.7	1.28	2.85	0.6	1.41	3.09
480	0.63	1.44	3.02	0.67	1.47	3.16
470	0.7	1.46	3.11	0.61	1.49	3.05
460	0.63	1.48	3.14	0.64	1.55	2.73
450	0.7	1.53	2.95	0.61	1.56	2.44
440	0.63	1.55	2.78	0.66	1.54	2.11
430	0.69	1.55	2.44	0.6	1.57	1.78
420	0.63	1.55	2.16	0.66	1.57	1.66
410	0.69	1.56	1.94	0.63	1.59	1.65
400	0.63	1.57	1.64	0.68	1.69	5.52

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงความเข้มของแหล่งกำเนิดที่มีผลกระทบต่อตัวตรวจวัด

ความต้านทาน (โอห์ม)	องค์ประกอบสี่ (R)
300	4
400	3.5
500	3.2
600	2.9
700	2.7
800	2.6
900	2.5
1000	2.3
1100	2.25
1200	2.2
1300	2.1
1500	2

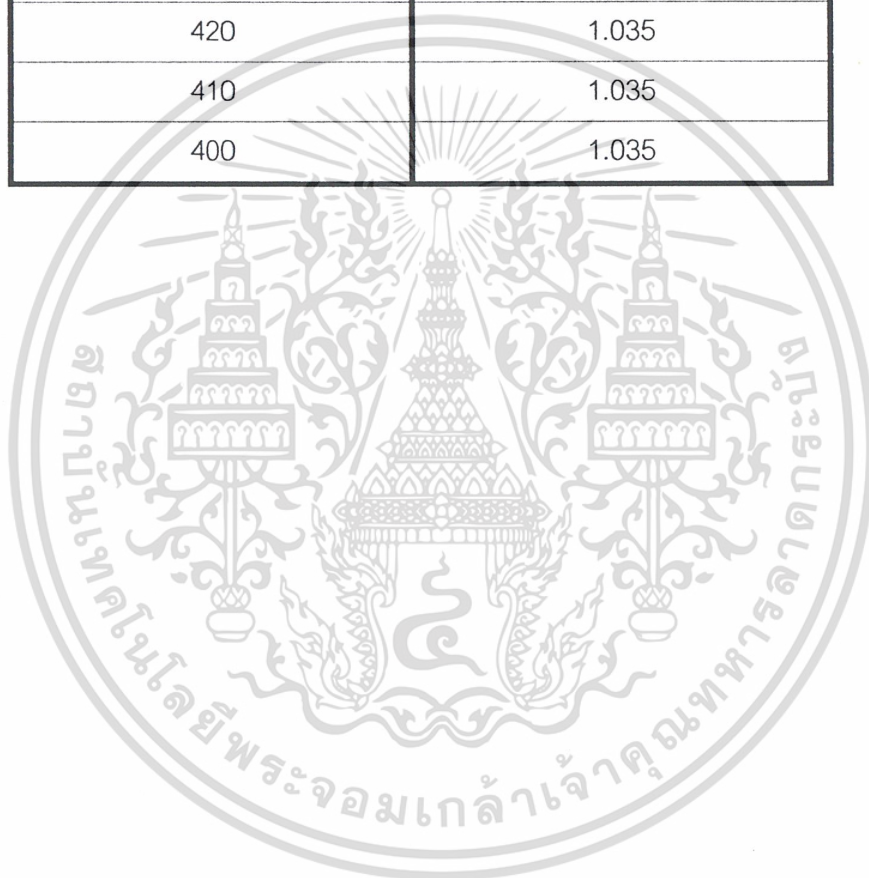
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 แสดงการกระจายพลังงานของหลอดทั้งสแตนท์ที่ความยาวคลื่น
ต่างๆ

ความยาวคลื่น(nm)	I(mA)
700	1.044
690	1.042
680	1.041
670	1.041
660	1.041
650	1.041
640	1.041
630	1.041
620	1.041
610	1.04
600	1.04
590	1.04
580	1.039
570	1.035
560	1.031
550	1.032
540	1.036
530	1.035
520	1.033
510	1.033
500	1.036
490	1.034

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น(nm)	I(mA)
480	1.036
470	1.034
460	1.035
450	1.034
440	1.033
430	1.034
420	1.035
410	1.035
400	1.035



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.5 แสดงองค์ประกอบสีของหลอดทั้งสแตน โดยใช้ RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจวัด

ครั้งที่	I (mA)			ค่า Normalize		
	R	G	B	x	y	z
1	31.70	25.80	31.20	0.36	0.29	0.35
2	31.10	26.50	31.70	0.35	0.30	0.35
3	31.00	26.30	31.30	0.35	0.30	0.35
4	31.10	26.20	31.20	0.35	0.30	0.35
5	30.90	26.10	31.20	0.35	0.30	0.35
6	30.90	26.30	31.20	0.35	0.30	0.35
7	30.90	26.50	31.20	0.35	0.30	0.35
8	31.00	25.30	31.10	0.35	0.29	0.36
9	30.80	26.80	31.10	0.35	0.30	0.35
10	31.20	25.10	31.10	0.36	0.29	0.36
11	30.90	25.10	31.10	0.35	0.29	0.36
12	31.20	26.50	31.10	0.35	0.30	0.35
13	31.10	26.70	31.10	0.35	0.30	0.35
14	30.80	25.30	31.10	0.35	0.29	0.36
15	30.80	26.40	31.20	0.35	0.30	0.35
16	31.00	24.90	31.20	0.36	0.29	0.36
17	30.80	26.80	31.20	0.35	0.30	0.35
18	31.00	25.30	31.20	0.35	0.29	0.36

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งที่	I (mA)			ค่า Normalize		
	R	G	B	x	y	z
19	31.10	25.40	31.40	0.35	0.29	0.36
20	31.10	25.80	31.10	0.35	0.29	0.35
AVG	31.00	25.83	31.17	0.35	0.29	0.35



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.6 แสดงองค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนท์ที่ค่าความยาวคลื่นต่างๆ

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
400	1.060	1.520	0.570	3.150	0.337	0.483	0.181
401	1.050	1.530	0.630	3.210	0.327	0.477	0.196
402	1.060	1.530	0.620	3.210	0.330	0.477	0.193
403	1.060	1.530	0.750	3.340	0.317	0.458	0.225
404	1.050	1.530	0.700	3.280	0.320	0.466	0.213
405	1.060	1.530	0.710	3.300	0.321	0.464	0.215
406	1.050	1.530	0.620	3.200	0.328	0.478	0.194
407	1.060	1.530	0.690	3.280	0.323	0.466	0.210
408	1.060	1.530	0.690	3.280	0.323	0.466	0.210
409	1.060	1.530	0.640	3.230	0.328	0.474	0.198
410	1.050	1.530	0.680	3.260	0.322	0.469	0.209
411	1.060	1.530	0.650	3.240	0.327	0.472	0.201
412	1.060	1.530	0.760	3.350	0.316	0.457	0.227
413	1.060	1.530	0.740	3.330	0.318	0.459	0.222
414	1.060	1.530	0.910	3.500	0.303	0.437	0.260
415	1.060	1.530	0.990	3.580	0.296	0.427	0.277
416	1.050	1.530	1.000	3.580	0.293	0.427	0.279
417	1.060	1.520	0.980	3.560	0.298	0.427	0.275
418	1.060	1.530	1.040	3.630	0.292	0.421	0.287
419	1.060	1.530	1.020	3.610	0.294	0.424	0.283
420	1.060	1.530	0.980	3.570	0.297	0.429	0.275

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
421	1.060	1.530	1.070	3.660	0.290	0.418	0.292
422	1.060	1.530	1.230	3.820	0.277	0.401	0.322
423	1.060	1.530	1.190	3.780	0.280	0.405	0.315
424	1.060	1.530	1.270	3.860	0.275	0.396	0.329
425	1.060	1.520	1.340	3.920	0.270	0.388	0.342
426	1.070	1.520	1.320	3.910	0.274	0.389	0.338
427	1.070	1.520	1.440	4.030	0.266	0.377	0.357
428	1.060	1.520	1.460	4.040	0.262	0.376	0.361
429	1.060	1.520	1.510	4.090	0.259	0.372	0.369
430	1.060	1.520	1.490	4.070	0.260	0.373	0.366
431	1.070	1.520	1.420	4.010	0.267	0.379	0.354
432	1.060	1.520	1.460	4.040	0.262	0.376	0.361
433	1.070	1.520	1.580	4.170	0.257	0.365	0.379
434	1.070	1.520	1.660	4.250	0.252	0.358	0.391
435	1.060	1.520	1.610	4.190	0.253	0.363	0.384
436	1.060	1.510	1.660	4.230	0.251	0.357	0.392
437	1.060	1.520	1.760	4.340	0.244	0.350	0.406
438	1.060	1.510	1.790	4.360	0.243	0.346	0.411
439	1.060	1.500	1.810	4.370	0.243	0.343	0.414
440	1.070	1.510	1.790	4.370	0.245	0.346	0.410

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
441	1.070	1.510	1.880	4.460	0.240	0.339	0.422
442	1.070	1.520	1.880	4.470	0.239	0.340	0.421
443	1.070	1.510	1.910	4.490	0.238	0.336	0.425
444	1.070	1.520	2.010	4.600	0.233	0.330	0.437
445	1.060	1.510	1.980	4.550	0.233	0.332	0.435
446	1.060	1.510	1.950	4.520	0.235	0.334	0.431
447	1.060	1.510	2.060	4.630	0.229	0.326	0.445
448	1.060	1.510	2.050	4.620	0.229	0.327	0.444
449	1.080	1.510	2.110	4.700	0.230	0.321	0.449
450	1.070	1.510	2.170	4.750	0.225	0.318	0.457
451	1.080	1.500	2.240	4.820	0.224	0.311	0.465
452	1.070	1.500	2.340	4.910	0.218	0.305	0.477
453	1.080	1.490	2.390	4.960	0.218	0.300	0.482
454	1.080	1.490	2.580	5.150	0.210	0.289	0.501
455	1.070	1.480	2.760	5.310	0.202	0.279	0.520
456	1.080	1.490	2.730	5.300	0.204	0.281	0.515
457	1.080	1.480	2.690	5.250	0.206	0.282	0.512
458	1.080	1.470	2.750	5.300	0.204	0.277	0.519
459	1.080	1.470	2.720	5.270	0.205	0.279	0.516
460	1.080	1.460	2.770	5.310	0.203	0.275	0.522

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
461	1.080	1.460	2.660	5.200	0.208	0.281	0.512
462	1.080	1.450	2.730	5.260	0.205	0.276	0.519
463	1.080	1.450	2.830	5.360	0.201	0.271	0.528
464	1.080	1.440	2.820	5.340	0.202	0.270	0.528
465	1.080	1.430	2.910	5.420	0.199	0.264	0.537
466	1.080	1.420	2.970	5.470	0.197	0.260	0.543
467	1.080	1.410	3.040	5.530	0.195	0.255	0.550
468	1.080	1.400	3.100	5.580	0.194	0.251	0.556
469	1.080	1.390	3.120	5.590	0.193	0.249	0.558
470	1.080	1.380	3.340	5.800	0.186	0.238	0.576
471	1.080	1.370	3.300	5.750	0.188	0.238	0.574
472	1.080	1.360	3.330	5.770	0.187	0.236	0.577
473	1.080	1.360	3.330	5.770	0.187	0.236	0.577
474	1.080	1.350	3.300	5.730	0.188	0.236	0.576
475	1.080	1.350	3.280	5.710	0.189	0.236	0.574
476	1.080	1.350	3.230	5.660	0.191	0.239	0.571
477	1.090	1.340	3.210	5.640	0.193	0.238	0.569
478	1.080	1.340	3.190	5.610	0.193	0.239	0.569
479	1.080	1.330	3.180	5.590	0.193	0.238	0.569
480	1.080	1.330	3.220	5.630	0.192	0.236	0.572

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
481	1.080	1.320	3.150	5.550	0.195	0.238	0.568
482	1.090	1.310	3.130	5.530	0.197	0.237	0.566
483	1.080	1.300	3.240	5.620	0.192	0.231	0.577
484	1.090	1.280	3.140	5.510	0.198	0.232	0.570
485	1.090	1.270	3.110	5.470	0.199	0.232	0.569
486	1.090	1.250	3.080	5.420	0.201	0.231	0.568
487	1.090	1.230	3.120	5.440	0.200	0.226	0.574
488	1.080	1.220	2.980	5.280	0.205	0.231	0.564
489	1.080	1.190	2.940	5.210	0.207	0.228	0.564
490	1.090	1.150	2.880	5.120	0.213	0.225	0.563
491	1.090	1.110	2.880	5.080	0.215	0.219	0.567
492	1.090	1.070	2.810	4.970	0.219	0.215	0.565
493	1.090	1.000	2.750	4.840	0.225	0.207	0.568
494	1.090	0.950	2.590	4.630	0.235	0.205	0.559
495	1.090	0.870	2.470	4.430	0.246	0.196	0.558
496	1.090	0.780	2.610	4.480	0.243	0.174	0.583
497	1.090	0.750	2.450	4.290	0.254	0.175	0.571
498	1.090	0.670	2.490	4.250	0.256	0.158	0.586
499	1.100	0.570	2.540	4.210	0.261	0.135	0.603
500	1.090	0.540	2.550	4.180	0.261	0.129	0.610

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
501	1.090	0.460	2.400	3.950	0.276	0.116	0.608
502	1.080	0.420	2.280	3.780	0.286	0.111	0.603
503	1.090	0.340	2.260	3.690	0.295	0.092	0.612
504	1.090	0.240	2.210	3.540	0.308	0.068	0.624
505	1.090	0.180	2.160	3.430	0.318	0.052	0.630
506	1.090	0.070	2.190	3.350	0.325	0.021	0.654
507	1.090	0.020	2.060	3.170	0.344	0.006	0.650
508	1.090	0.040	2.070	3.200	0.341	0.013	0.647
509	1.090	0.170	1.880	3.140	0.347	0.054	0.599
510	1.100	0.260	1.860	3.220	0.342	0.081	0.578
511	1.090	0.280	1.820	3.190	0.342	0.088	0.571
512	1.100	0.470	1.760	3.330	0.330	0.141	0.529
513	1.100	0.600	1.660	3.360	0.327	0.179	0.494
514	1.090	0.720	1.600	3.410	0.320	0.211	0.469
515	1.090	0.860	1.480	3.430	0.318	0.251	0.431
516	1.100	0.980	1.410	3.490	0.315	0.281	0.404
517	1.090	1.030	1.330	3.450	0.316	0.299	0.386
518	1.090	1.120	1.370	3.580	0.304	0.313	0.383
519	1.100	1.290	1.240	3.630	0.303	0.355	0.342
520	1.100	1.470	1.190	3.760	0.293	0.391	0.316

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
521	1.100	1.580	1.150	3.830	0.287	0.413	0.300
522	1.100	1.680	1.200	3.980	0.276	0.422	0.302
523	1.100	1.800	1.280	4.180	0.263	0.431	0.306
524	1.100	1.850	1.280	4.230	0.260	0.437	0.303
525	1.100	1.870	1.080	4.050	0.272	0.462	0.267
526	1.100	2.000	1.140	4.240	0.259	0.472	0.269
527	1.100	2.060	1.140	4.300	0.256	0.479	0.265
528	1.100	2.070	1.100	4.270	0.258	0.485	0.258
529	1.110	2.110	1.160	4.380	0.253	0.482	0.265
530	1.100	2.210	1.120	4.430	0.248	0.499	0.253
531	1.110	2.220	1.090	4.420	0.251	0.502	0.247
532	1.110	2.150	1.110	4.370	0.254	0.492	0.254
533	1.110	2.140	1.040	4.290	0.259	0.499	0.242
534	1.100	2.300	0.970	4.370	0.252	0.526	0.222
535	1.100	2.350	0.910	4.360	0.252	0.539	0.209
536	1.100	2.450	0.920	4.470	0.246	0.548	0.206
537	1.110	2.370	1.020	4.500	0.247	0.527	0.227
538	1.110	2.420	1.040	4.570	0.243	0.530	0.228
539	1.110	2.480	1.200	4.790	0.232	0.518	0.251
540	1.100	2.500	1.070	4.670	0.236	0.535	0.229

๙

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
541	1.110	2.290	0.900	4.300	0.258	0.533	0.209
542	1.110	2.400	0.750	4.260	0.261	0.563	0.176
543	1.110	2.520	0.820	4.450	0.249	0.566	0.184
544	1.110	2.320	0.920	4.350	0.255	0.533	0.211
545	1.110	2.400	0.890	4.400	0.252	0.545	0.202
546	1.110	2.240	0.980	4.330	0.256	0.517	0.226
547	1.110	2.330	0.910	4.350	0.255	0.536	0.209
548	1.110	2.240	1.300	4.650	0.239	0.482	0.280
549	1.110	2.190	1.110	4.410	0.252	0.497	0.252
550	1.110	2.110	1.260	4.480	0.248	0.471	0.281
551	1.110	2.120	1.240	4.470	0.248	0.474	0.277
552	1.110	2.090	1.320	4.520	0.246	0.462	0.292
553	1.110	2.070	1.300	4.480	0.248	0.462	0.290
554	1.110	2.040	1.180	4.330	0.256	0.471	0.273
555	1.110	2.030	1.310	4.450	0.249	0.456	0.294
556	1.110	1.970	1.260	4.340	0.256	0.454	0.290
557	1.110	1.880	1.210	4.200	0.264	0.448	0.288
558	1.110	1.750	1.250	4.110	0.270	0.426	0.304
559	1.110	1.800	1.200	4.110	0.270	0.438	0.292
560	1.120	1.750	1.230	4.100	0.273	0.427	0.300

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
561	1.120	1.630	1.070	3.820	0.293	0.427	0.280
562	1.120	1.840	0.990	3.950	0.284	0.466	0.251
563	1.120	1.740	0.970	3.830	0.292	0.454	0.253
564	1.120	1.640	0.910	3.670	0.305	0.447	0.248
565	1.130	1.370	1.070	3.570	0.317	0.384	0.300
566	1.140	1.180	1.210	3.530	0.323	0.334	0.343
567	1.140	1.010	1.120	3.270	0.349	0.309	0.343
568	1.150	1.020	1.050	3.220	0.357	0.317	0.326
569	1.160	0.920	1.020	3.100	0.374	0.297	0.329
570	1.170	0.780	0.770	2.720	0.430	0.287	0.283
571	1.200	0.660	1.030	2.890	0.415	0.228	0.356
572	1.220	0.620	0.940	2.780	0.439	0.223	0.338
573	1.240	0.580	0.910	2.730	0.454	0.212	0.333
574	1.270	0.470	0.810	2.550	0.498	0.184	0.318
575	1.300	0.380	0.720	2.400	0.542	0.158	0.300
576	1.320	0.230	0.700	2.250	0.587	0.102	0.311
577	1.380	0.130	0.510	2.020	0.683	0.064	0.252
578	1.460	0.150	0.680	2.290	0.638	0.066	0.297
579	1.610	0.110	0.690	2.410	0.668	0.046	0.286
580	1.590	0.070	0.490	2.150	0.740	0.033	0.228

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
581	1.670	0.060	0.470	2.200	0.759	0.027	0.214
582	1.780	0.120	0.450	2.350	0.757	0.051	0.191
583	1.900	0.210	0.440	2.550	0.745	0.082	0.173
584	2.080	0.260	0.410	2.750	0.756	0.095	0.149
585	2.110	0.240	0.380	2.730	0.773	0.088	0.139
586	2.210	0.380	0.430	3.020	0.732	0.126	0.142
587	2.460	0.410	0.440	3.310	0.743	0.124	0.133
588	2.640	0.490	0.490	3.620	0.729	0.135	0.135
589	2.890	0.560	0.440	3.890	0.743	0.144	0.113
590	3.190	0.630	0.490	4.310	0.740	0.146	0.114
591	3.510	0.700	0.470	4.680	0.750	0.150	0.100
592	3.900	0.780	0.430	5.110	0.763	0.153	0.084
593	4.750	0.930	0.450	6.130	0.775	0.152	0.073
594	5.090	1.010	0.080	6.180	0.824	0.163	0.013
595	5.570	1.070	0.100	6.740	0.826	0.159	0.015
596	5.970	1.120	0.010	7.100	0.841	0.158	0.001
597	6.420	1.150	0.080	7.650	0.839	0.150	0.010
598	6.670	1.180	0.050	7.900	0.844	0.149	0.006
599	6.960	1.200	0.080	8.240	0.845	0.146	0.010
600	7.270	1.210	0.000	8.480	0.857	0.143	0.000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
601	7.470	1.230	0.040	8.740	0.855	0.141	0.005
602	7.840	1.250	0.010	9.100	0.862	0.137	0.001
603	8.050	1.250	0.040	9.340	0.862	0.134	0.004
604	8.300	1.280	0.100	9.680	0.857	0.132	0.010
605	8.520	1.290	0.100	9.910	0.860	0.130	0.010
606	8.820	1.300	0.100	10.220	0.863	0.127	0.010
607	9.000	1.310	0.120	10.430	0.863	0.126	0.012
608	9.260	1.320	0.120	10.700	0.865	0.123	0.011
609	9.380	1.330	0.070	10.780	0.870	0.123	0.006
610	9.950	1.340	0.270	11.560	0.861	0.116	0.023
611	10.110	1.330	0.240	11.680	0.866	0.114	0.021
612	10.460	1.340	0.240	12.040	0.869	0.111	0.020
613	10.710	1.350	0.220	12.280	0.872	0.110	0.018
614	10.870	1.350	0.230	12.450	0.873	0.108	0.018
615	10.740	1.350	0.230	12.320	0.872	0.110	0.019
616	10.810	1.370	0.250	12.430	0.870	0.110	0.020
617	11.220	1.360	0.260	12.840	0.874	0.106	0.020
618	11.430	1.370	0.280	13.080	0.874	0.105	0.021
619	11.590	1.360	0.270	13.220	0.877	0.103	0.020
620	11.700	1.370	0.350	13.420	0.872	0.102	0.026

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
621	11.850	1.370	0.310	13.530	0.876	0.101	0.023
622	11.990	1.360	0.330	13.680	0.876	0.099	0.024
623	12.090	1.360	0.350	13.800	0.876	0.099	0.025
624	12.190	1.370	0.320	13.880	0.878	0.099	0.023
625	12.260	1.370	0.320	13.950	0.879	0.098	0.023
626	11.800	1.370	0.310	13.480	0.875	0.102	0.023
627	12.140	1.370	0.310	13.820	0.878	0.099	0.022
628	12.190	1.370	0.300	13.860	0.880	0.099	0.022
629	12.330	1.370	0.320	14.020	0.879	0.098	0.023
630	12.080	1.370	0.290	13.740	0.879	0.100	0.021
631	12.460	1.360	0.350	14.170	0.879	0.096	0.025
632	12.490	1.360	0.320	14.170	0.881	0.096	0.023
633	12.640	1.360	0.340	14.340	0.881	0.095	0.024
634	12.580	1.360	0.240	14.180	0.887	0.096	0.017
635	12.420	1.360	0.380	14.160	0.877	0.096	0.027
636	12.310	1.370	0.370	14.050	0.876	0.098	0.026
637	12.840	1.360	0.340	14.540	0.883	0.094	0.023
638	13.060	1.369	0.420	14.849	0.880	0.092	0.028
639	13.170	1.360	0.330	14.860	0.886	0.092	0.022
640	13.270	1.360	0.450	15.080	0.880	0.090	0.030

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
641	13.380	1.360	0.070	14.810	0.903	0.092	0.005
642	13.480	1.350	0.400	15.230	0.885	0.089	0.026
643	13.590	1.360	0.400	15.350	0.885	0.089	0.026
644	13.550	1.360	0.430	15.340	0.883	0.089	0.028
645	13.440	1.360	0.440	15.240	0.882	0.089	0.029
646	13.660	1.350	0.460	15.470	0.883	0.087	0.030
647	13.410	1.360	0.430	15.200	0.882	0.089	0.028
648	13.940	1.350	0.430	15.720	0.887	0.086	0.027
649	13.890	1.340	0.490	15.720	0.884	0.085	0.031
650	14.140	1.350	0.480	15.970	0.885	0.085	0.030
651	14.200	1.350	0.490	16.040	0.885	0.084	0.031
652	13.900	1.350	0.470	15.720	0.884	0.086	0.030
653	14.120	1.350	0.560	16.030	0.881	0.084	0.035
654	14.160	1.350	0.560	16.070	0.881	0.084	0.035
655	14.220	1.340	0.570	16.130	0.882	0.083	0.035
656	14.290	1.350	0.570	16.210	0.882	0.083	0.035
657	14.400	1.350	0.590	16.340	0.881	0.083	0.036
658	14.470	1.350	0.600	16.420	0.881	0.082	0.037
659	14.500	1.340	0.610	16.450	0.881	0.081	0.037
660	14.490	1.350	0.630	16.470	0.880	0.082	0.038

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
661	14.460	1.350	0.610	16.420	0.881	0.082	0.037
662	14.380	1.350	0.580	16.310	0.882	0.083	0.036
663	14.310	1.350	0.580	16.240	0.881	0.083	0.036
664	14.100	1.350	0.580	16.030	0.880	0.084	0.036
665	13.780	1.360	0.580	15.720	0.877	0.087	0.037
666	13.320	1.360	0.560	15.240	0.874	0.089	0.037
667	12.790	1.370	0.560	14.720	0.869	0.093	0.038
668	12.100	1.380	0.570	14.050	0.861	0.098	0.041
669	11.200	1.390	0.620	13.210	0.848	0.105	0.047
670	10.340	1.400	0.600	12.340	0.838	0.113	0.049
671	9.690	1.410	0.620	11.720	0.827	0.120	0.053
672	9.200	1.410	0.620	11.230	0.819	0.126	0.055
673	8.730	1.430	0.640	10.800	0.808	0.132	0.059
674	8.200	1.440	0.620	10.260	0.799	0.140	0.060
675	7.890	1.450	0.620	9.960	0.792	0.146	0.062
676	7.300	1.460	0.660	9.420	0.775	0.155	0.070
677	6.860	1.460	0.660	8.980	0.764	0.163	0.073
678	6.480	1.470	0.670	8.620	0.752	0.171	0.078
679	6.080	1.470	0.660	8.210	0.741	0.179	0.080
680	5.640	1.490	0.660	7.790	0.724	0.191	0.085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น	กระแส (mA)			X+Y+Z=A	องค์ประกอบสี		
	R	G	B		x	y	z
681	5.290	1.490	0.650	7.430	0.712	0.201	0.087
682	4.980	1.490	0.650	7.120	0.699	0.209	0.091
683	4.640	1.510	0.670	6.820	0.680	0.221	0.098
684	4.280	1.520	0.720	6.520	0.656	0.233	0.110
685	3.990	1.520	0.740	6.250	0.638	0.243	0.118
686	3.780	1.520	0.740	6.040	0.626	0.252	0.123
687	3.580	1.530	0.750	5.860	0.611	0.261	0.128
688	3.400	1.530	0.730	5.660	0.601	0.270	0.129
689	3.280	1.530	0.730	5.540	0.592	0.276	0.132
690	3.060	1.540	0.720	5.320	0.575	0.289	0.135
691	2.930	1.540	0.710	5.180	0.566	0.297	0.137
692	2.770	1.540	0.690	5.000	0.554	0.308	0.138
693	2.650	1.540	0.720	4.910	0.540	0.314	0.147
694	2.580	1.540	0.740	4.860	0.531	0.317	0.152
695	2.480	1.540	0.730	4.750	0.522	0.324	0.154
696	2.350	1.540	0.700	4.590	0.512	0.336	0.153
697	2.310	1.560	0.950	4.820	0.479	0.324	0.197
698	2.240	1.560	0.950	4.750	0.472	0.328	0.200
699	2.180	1.560	0.950	4.690	0.465	0.333	0.203
700	2.150	1.560	0.950	4.660	0.461	0.335	0.204

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 แสดงค่ากระแสจากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์เมื่อทำการวัด Filter แต่ละสีที่ความยาวคลื่นต่างๆของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน

ความยาวคลื่น (nm)	กระแสเมื่อแสงผ่าน filter สีต่างๆ (mm)				
	แดง	เขียว	เหลือง	น้ำเงิน	ม่วง
700	1041	854	1045	139	1007
695	1042	849	1046	138	1001
690	1042	847	1047	139	990
685	1043	847	1048	131	974
680	1043	850	1048	125	944
675	1043	853	1048	118	894
670	1042	854	1047	112	845
665	1039	855	1047	108	783
660	1035	855	1047	103	427
655	1033	857	1047	98	398
650	1016	862	1047	95	370
645	990	868	1046	93	331
640	957	872	1046	96	304
635	921	888	1045	109	275
630	877	930	1044	148	246
625	772	914	1043	217	137
620	370	920	1042	287	120
615	253	927	1040	291	108
610	214	937	1038	371	189
605	188	944	1035	566	182

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	กระแสน้ำแสงผ่าน filter สีต่างๆ (nm)				
	แดง	เขียว	เหลือง	น้ำเงิน	ม่วง
600	153	950	1032	739	175
595	145	954	1029	807	168
590	128	957	1026	834	163
585	112	957	1019	854	153
580	96	956	1012	905	144
575	80	956	1005	914	134
570	74.85	952	1000	919	124
565	69.7	948	993	901	140
560	64.55	937	984	930	156
555	59.4	919	972	916	170
550	55.7	897	960	930	188
545	53.4	878	930	936	288
540	51.5	861	901	938	388
535	47.4	822	870	937	489
530	46.3	693	842	926	590
525	45.5	387	813	929	634
520	44.3	230	782	931	679
515	43.5	162	751	923	725
510	43.1	99.4	723	921	769
505	42.8	76.4	630	924	809

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความยาวคลื่น (nm)	กระแสน้ำแสงผ่าน filter สีต่างๆ (nm)				
	แดง	เขียว	เหลือง	น้ำเงิน	ม่วง
500	42.6	69.2	455	921	827
495	46	89	322	916	834
490	55	112	190	912	842
485	69	160	164	908	847
480	82	215	143	908	850
475	109	312	132	908	850
470	120	406	121	906	851
465	110	412	124	904	852
460	132	435	126	893	852
455	162	410	121	903	853
450	148	426	116	929	852
445	130	381	112	934	852
440	134	325	109	912	856
435	123	249	109	903	858
430	104	253	109	900	858
425	82	238	110	881	850
420	60	210	110	872	839
415	46	254	110	858	835
410	43	267	110	840	832
405	42.4	234	111	838	822
400	42	209	111	839	819

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.8 แสดงค่ากระแสไฟฟ้าและองค์ประกอบสีของ Filter สีต่างๆ เมื่อจัดการทดลองเป็นแบบสะท้อน

การทดลองครั้งที่ 1

กระแส (mA)	filter				
	red	yellow	green	blue	violet
X	1.43	1.34	0.99	2.54	2.57
Y	0.97	1.17	0.99	2.1	2.45
Z	1.55	1.21	1.65	2.43	2.97

การทดลองครั้งที่ 2

กระแส (mA)	filter				
	red	yellow	green	blue	violet
X	1.45	1.36	1	2.54	2.57
Y	0.97	1.17	0.99	2.1	2.45
Z	1.55	1.21	1.65	2.43	2.97

การทดลองครั้งที่ 3

กระแส (mA)	filter				
	red	yellow	green	blue	violet
X	1.24	1.28	1.02	2.45	2.45
Y	1.02	1.25	0.89	2.23	2.31
Z	1.67	1.34	1.59	2.47	2.85

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 แสดงค่ากระแสและองค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิดแสง Full Color LED ซึ่งประกอบด้วย สีแดง สีเหลือง และสีน้ำเงิน

การทดลองครั้งที่ 1

	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	x	y	z
แดง	7.7	0.1	1.7	0.811	0.011	0.179
เหลือง	3.2	5.9	0.13	0.347	0.639	0.014
น้ำเงิน	1.7	0.6	8.4	0.159	0.056	0.785

การทดลองครั้งที่ 2

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	x	y	z
แดง	7.8	0.15	1.8	0.800	0.015	0.185
เหลือง	3.3	5.93	0.135	0.352	0.633	0.014
น้ำเงิน	1.7	0.55	8.3	0.161	0.052	0.787

การทดลองครั้งที่ 3

	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	x	y	z
แดง	7.6	0.09	1.8	0.801	0.009	0.190
เหลือง	3.2	5.93	0.135	0.345	0.640	0.015
น้ำเงิน	1.7	0.5	8.35	0.161	0.047	0.791

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 4

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	x	y	z
แดง	7.6	0.1	1.8	0.800	0.011	0.189
เหลือง	3.2	5.9	0.12	0.347	0.640	0.013
น้ำเงิน	1.8	0.55	8.45	0.167	0.051	0.782



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.10 แสดงค่ากระแสและองค์ประกอบสีของ Filter สีต่างๆ เมื่อให้แหล่งกำเนิดแสงเป็นทั้งสแตน

การทดลองครั้งที่ 1

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	24.9	17.1	17.7	0.417	0.286	0.296
red	25.5	8.9	12.8	0.540	0.189	0.271
green	13.4	9.3	12.6	0.380	0.263	0.357
blue	11.9	7.9	14.1	0.351	0.233	0.416
violet	4.3	0	1.1	0.796	0.000	0.204

การทดลองครั้งที่ 2

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	24.6	17.1	16.9	0.420	0.292	0.288
red	25.3	9	13.2	0.533	0.189	0.278
green	14.7	11	14.8	0.363	0.272	0.365
blue	13.3	9.4	17	0.335	0.237	0.428
violet	4.2	0.2	1	0.778	0.037	0.185

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองครั้งที่ 3

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.5	17.4	17.4	0.423	0.289	0.289
red	25.7	9	13.1	0.538	0.188	0.274
green	14.4	10.8	14.3	0.365	0.273	0.362
blue	12.8	9.1	16.3	0.335	0.238	0.427
violet	4.1	0.2	0.9	0.788	0.038	0.173

การทดลองที่ 4

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.1	20.7	20.2	0.380	0.314	0.306
red	26.2	9.9	14.7	0.516	0.195	0.289
green	14	9.3	14.3	0.372	0.247	0.380
blue	15.3	10.7	20.1	0.332	0.232	0.436
violet	4.6	0	1.3	0.780	0.000	0.220

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 5

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.3	16.4	15.3	0.444	0.288	0.268
red	26.2	8.2	12.8	0.555	0.174	0.271
green	14.2	8.5	14.4	0.383	0.229	0.388
blue	12.9	8.7	16.1	0.342	0.231	0.427
violet	4.2	0	1.1	0.792	0.000	0.208

การทดลองที่ 6

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.2	19.8	18.6	0.396	0.311	0.292
red	27.2	7.9	10.9	0.591	0.172	0.237
green	12	14	8.7	0.346	0.403	0.251
blue	12.9	10.2	18.4	0.311	0.246	0.443
violet	4.3	0	1.3	0.768	0.000	0.232

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 7

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	24.8	19.2	16.7	0.409	0.316	0.275
red	25.7	9.1	12.4	0.544	0.193	0.263
green	14.8	11.9	14.9	0.356	0.286	0.358
blue	12.9	9.9	17.5	0.320	0.246	0.434
violet	4.3	0	1.1	0.796	0.000	0.204

การทดลองที่ 8

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.4	17.3	16.2	0.431	0.294	0.275
red	25.7	8.5	12	0.556	0.184	0.260
green	13.6	11	14.2	0.351	0.284	0.366
blue	12	9.3	16.2	0.320	0.248	0.432
violet	3.9	0.2	1	0.765	0.039	0.196

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 9

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.1	17.7	16.6	0.423	0.298	0.279
red	25.6	8.8	12	0.552	0.190	0.259
green	13.5	10.9	14	0.352	0.284	0.365
blue	11.9	9	16.2	0.321	0.243	0.437
violet	3.9	0.2	1	0.765	0.039	0.196

การทดลองที่ 10

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.2	17.9	16.5	0.423	0.300	0.277
red	26.2	9.1	12.6	0.547	0.190	0.263
green	14.2	11.6	14.9	0.349	0.285	0.366
blue	12.8	9.8	17.1	0.322	0.247	0.431
violet	4.2	0.1	1	0.792	0.019	0.189

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองที่ 11

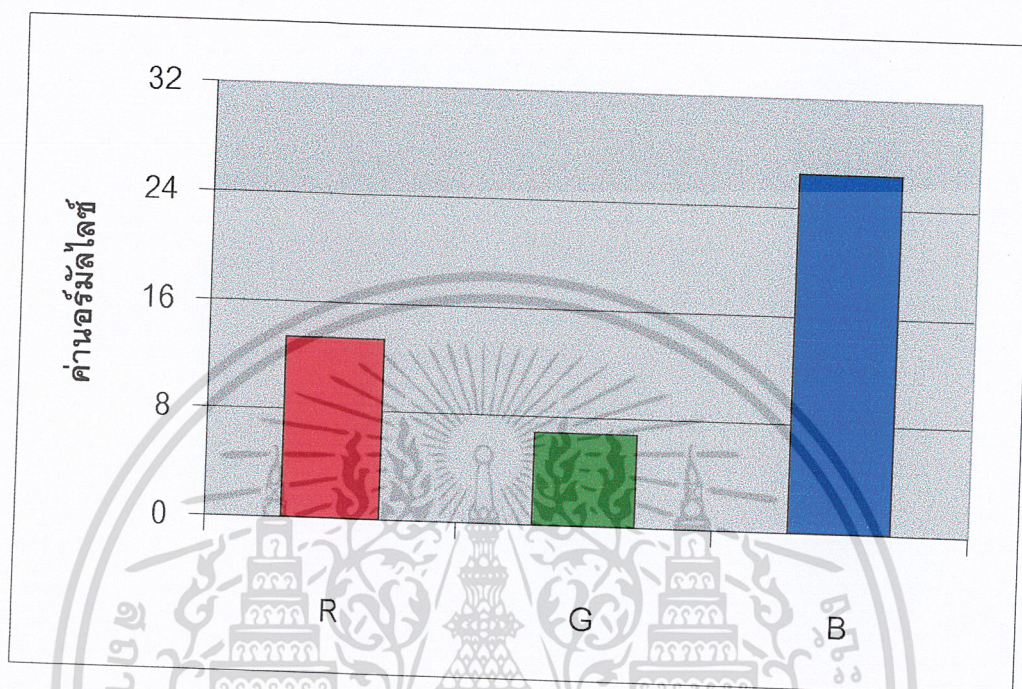
color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.2	17.3	16	0.421	0.289	0.267
red	26.2	8.6	11.9	0.559	0.183	0.254
green	13.4	10.4	13.5	0.344	0.267	0.347
blue	11.8	8.8	15.2	0.319	0.238	0.411
violet	4	0.2	0.9	0.784	0.039	0.176

การทดลองที่ 12

color	กระแส (mA)			องค์ประกอบสี RGB		
	R	G	B	X	Y	Z
yellow	25.2	17.3	16	0.431	0.296	0.274
red	26.2	8.6	11.9	0.561	0.184	0.255
green	13.4	10.4	13.5	0.359	0.279	0.362
blue	11.8	8.8	15.2	0.330	0.246	0.425
violet	4	0.2	0.9	0.784	0.039	0.176

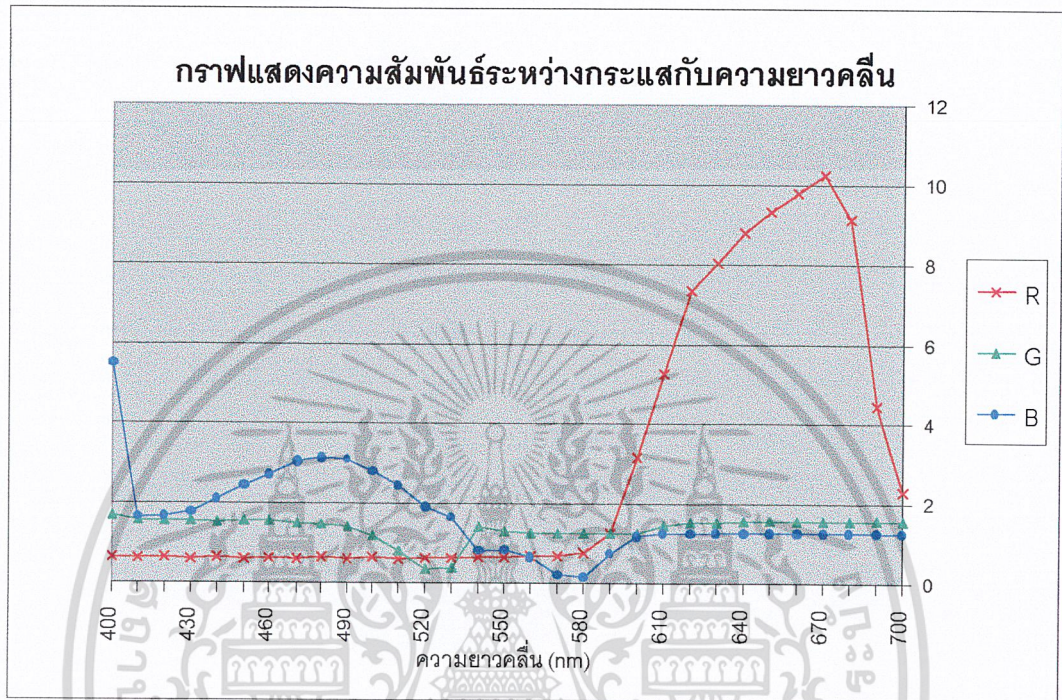
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.1 กราฟค่าองค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิด Full Color LED เมื่อปรับให้แหล่งกำเนิดจ่ายแสงขาว



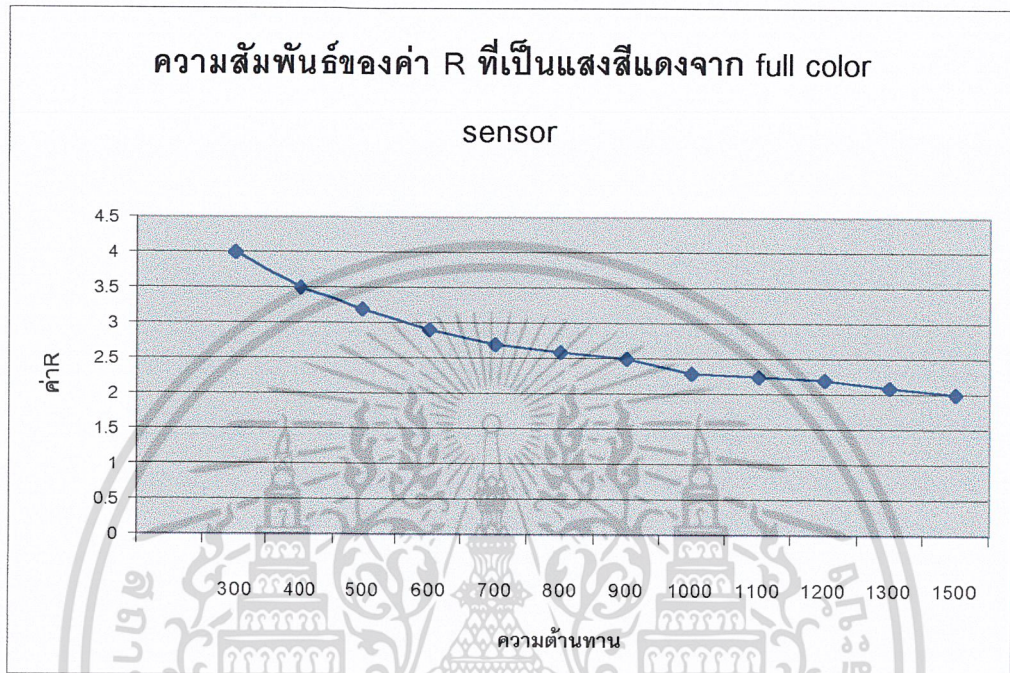
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.2 แสดงกราฟการกระจายพลังงานของทั้งสแตนเมื่อใช้ RGB Color Sensorเป็นตัวตรวจวัด



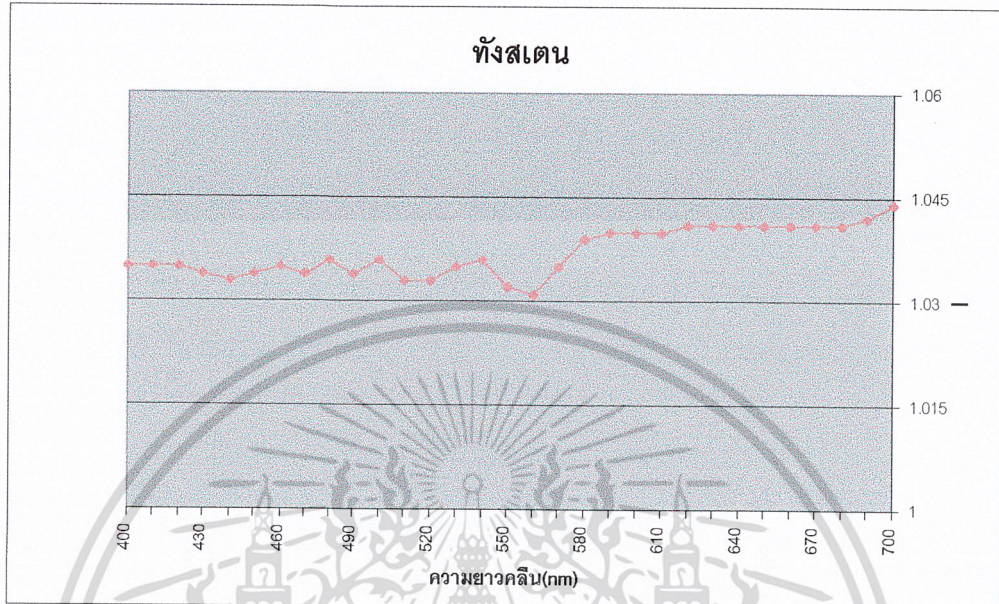
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.3 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงของแหล่งกำเนิดแสงกับค่าองค์ประกอบสีของแสงที่วัดได้



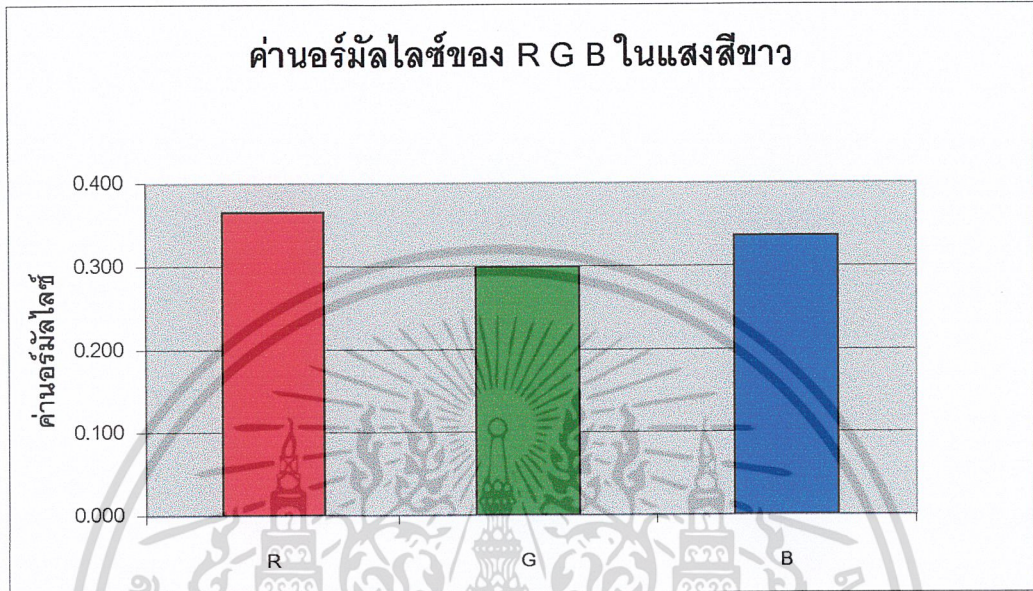
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงกราฟการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน



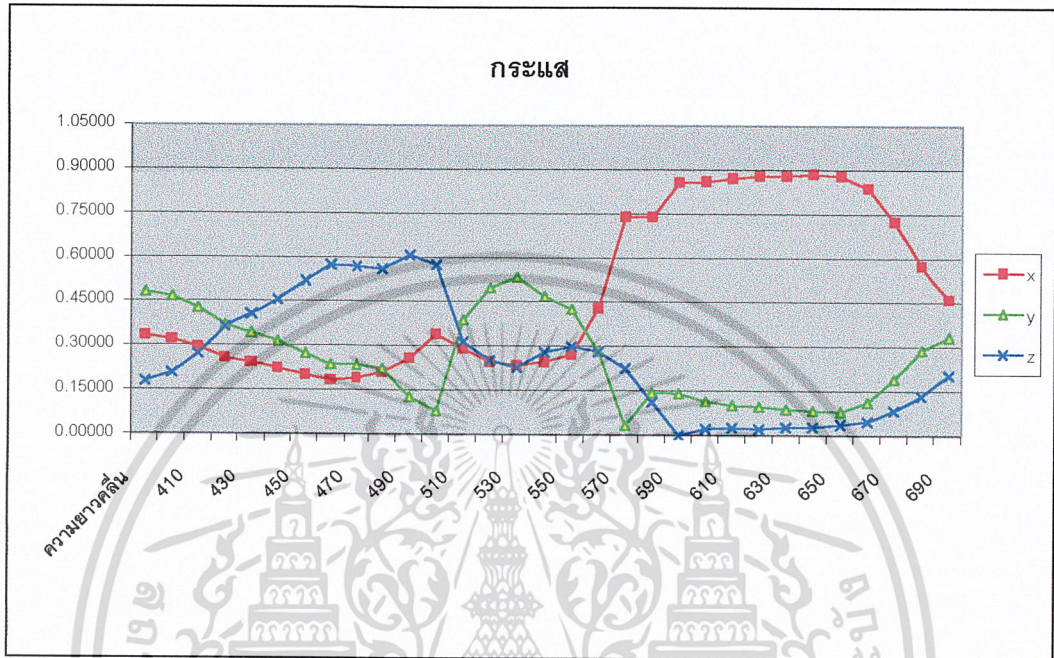
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.5 แสดงแผนภูมิแท่งขององค์ประกอบสีของแสงจากแหล่งกำเนิด
ทั้งสแตน



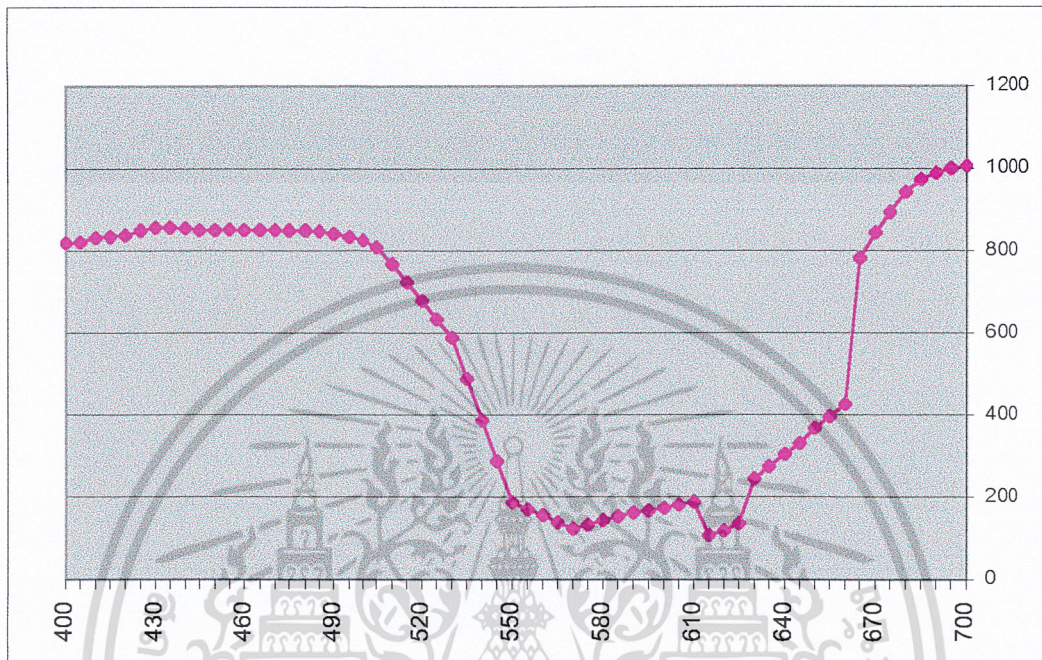
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.6 แสดงกราฟการกระจายพลังงานของแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตนที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร



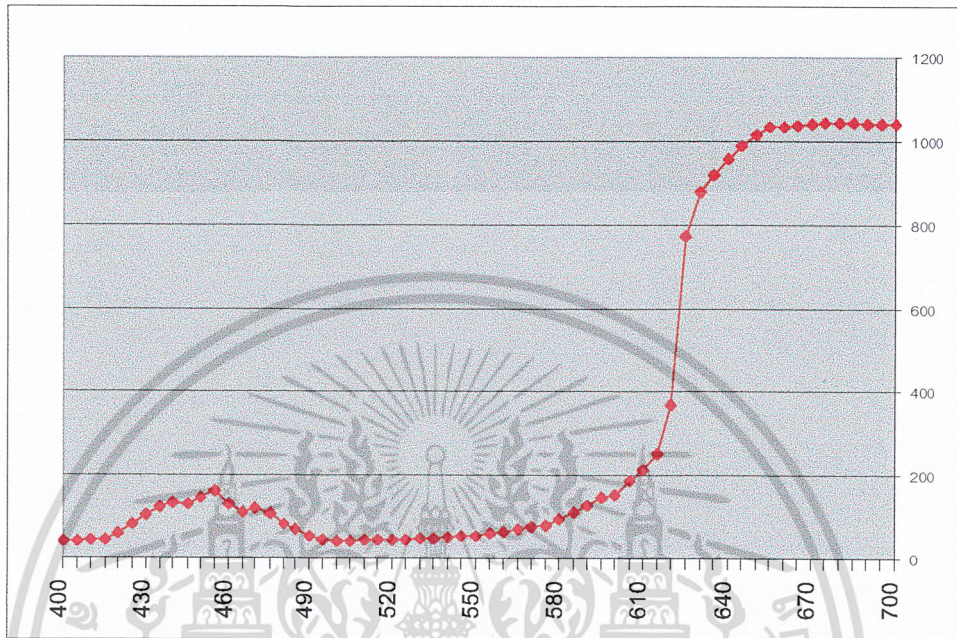
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 แสดงการกระจายพลังงานของแสงที่ทะลุผ่าน Filter สีม่วง ที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 – 700 นาโนเมตร



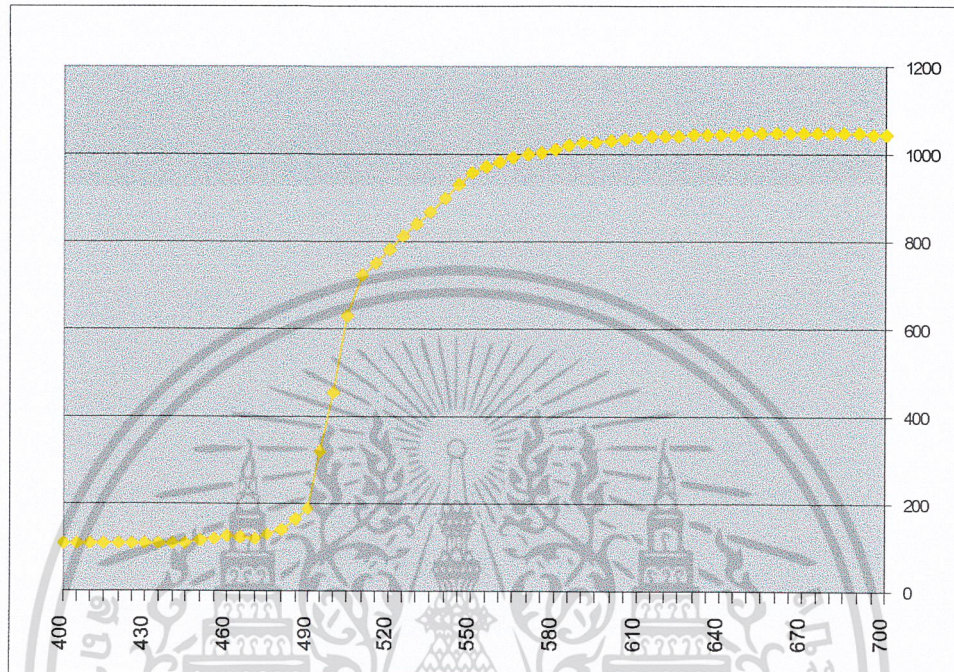
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆที่ทะลุผ่าน Filter สีแดง



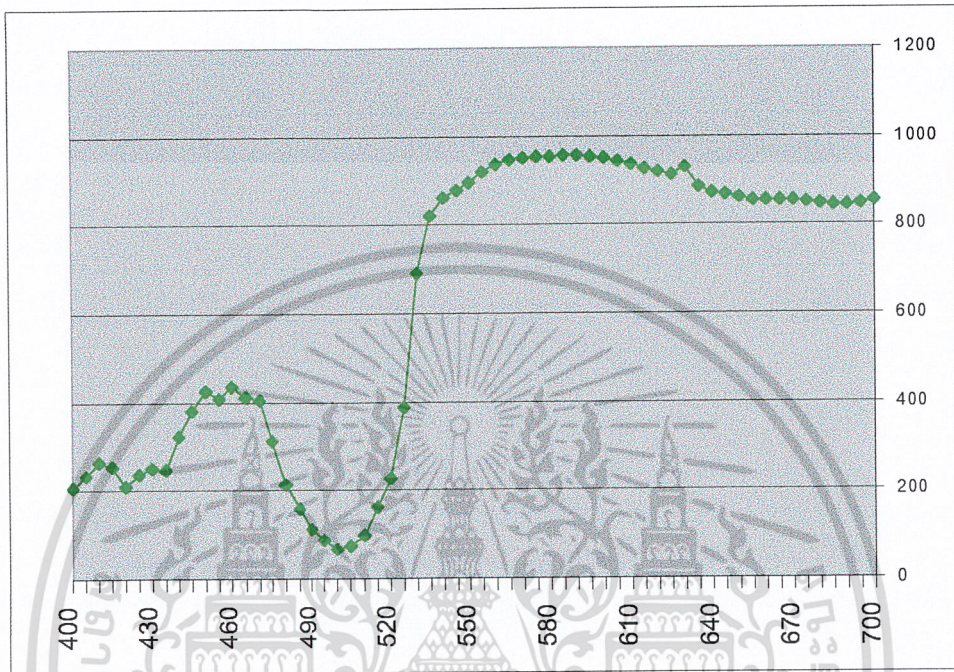
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.9 แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่ทะลุผ่าน Filter สีเหลือง



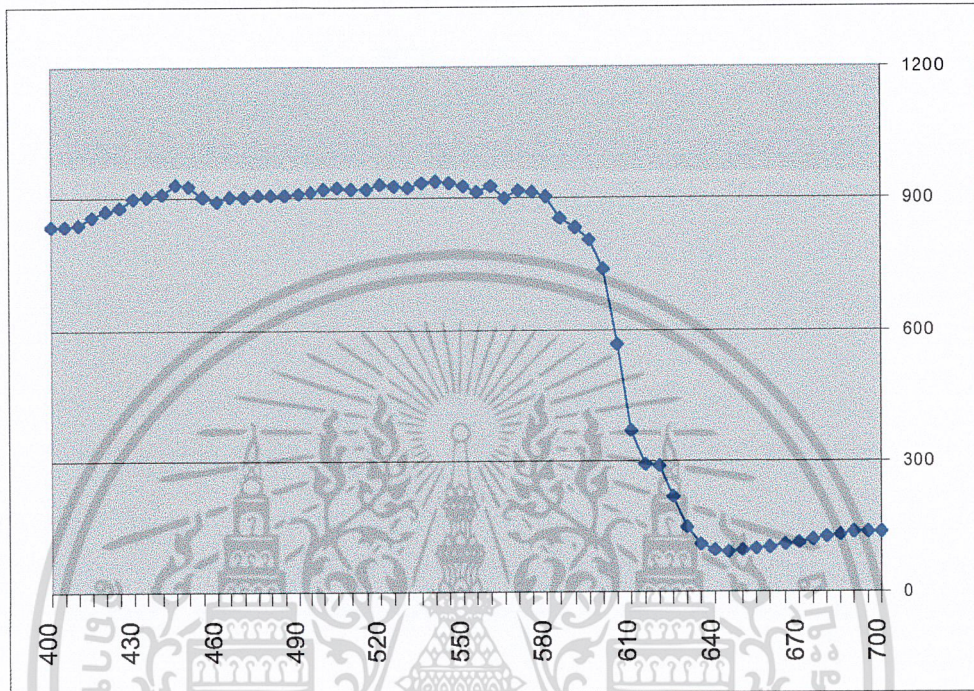
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.10 แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่ทะลุผ่าน Filter สีเขียว



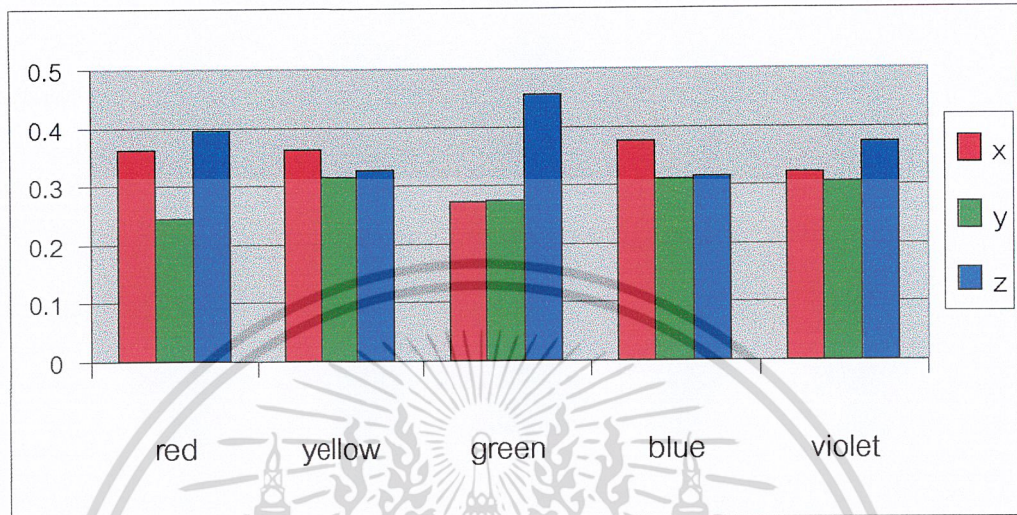
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.11 แสดงการกระจายพลังงานของแสงความยาวคลื่นค่าต่างๆ ที่ทะลุผ่าน Filter สีน้ำเงิน



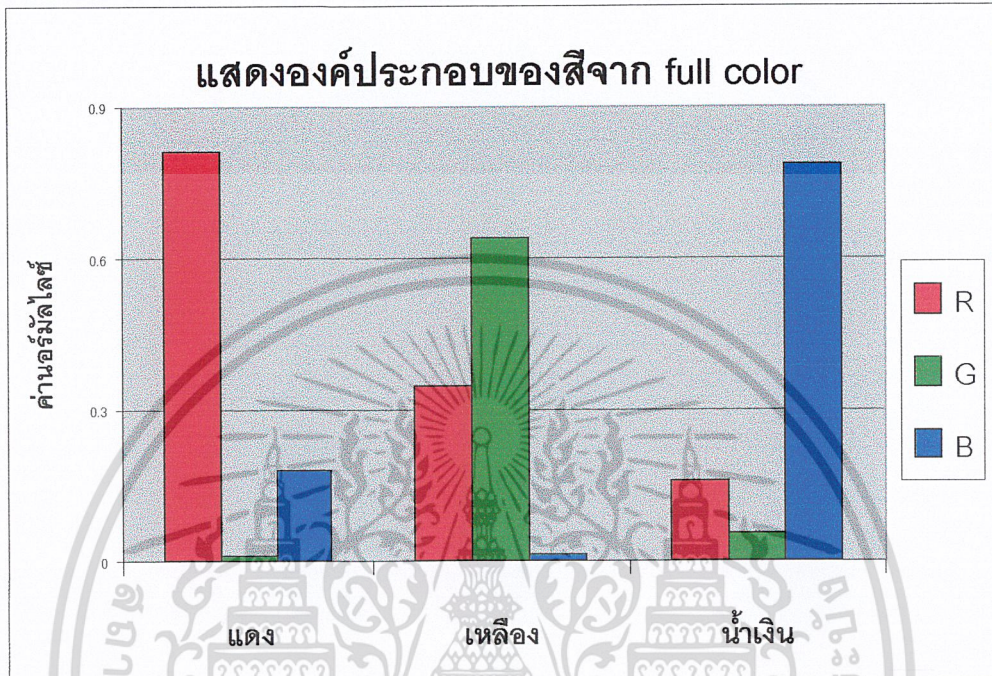
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.12 แสดงแผนภูมิแท่งองค์ประกอบสีของแสงที่ทะลุผ่าน Filter แบบต่างๆ เมื่อใช้ ทั้งสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสง



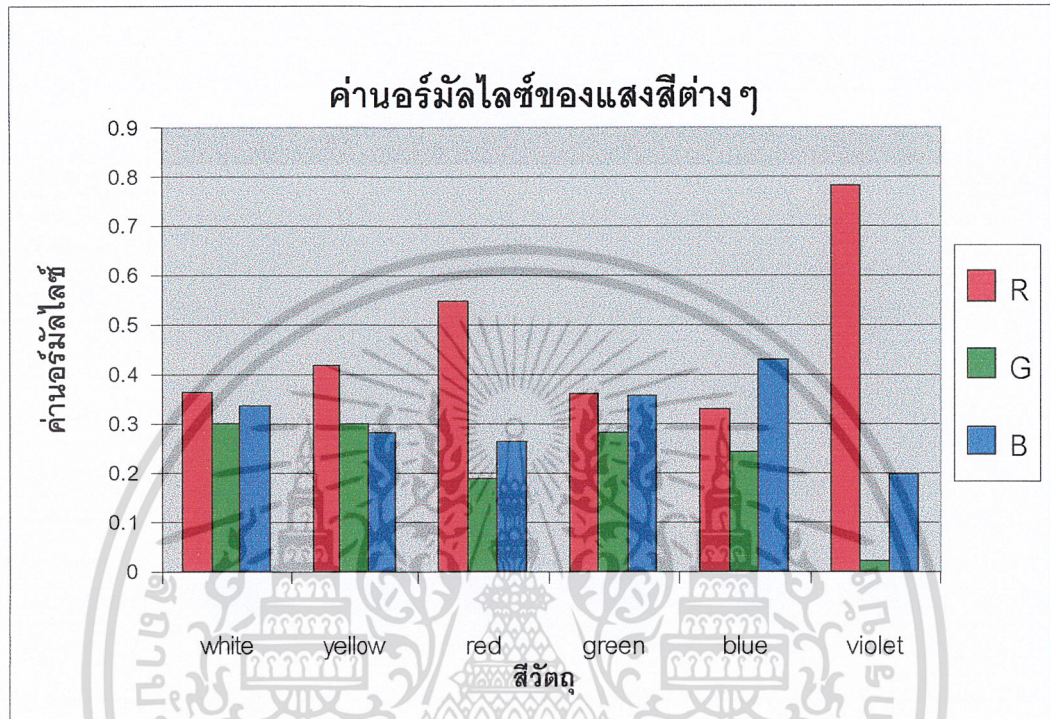
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.13 แสดงแผนภูมิขององค์ประกอบสีของแสงสีที่ได้จาก Full Color LED



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.14 แสดงแผนภูมิแท่งขององค์ประกอบสีของแสงที่ทะลุผ่าน Filter สีต่างๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองวิจัยและแนวทางการพัฒนา

โครงสร้างพิเศษชิ้นนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่มีคุณสมบัติในการใช้งานเกี่ยวกับงานทางด้านแสง เพื่อที่ศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาพัฒนาเป็นอุปกรณ์ตรวจจับองค์ประกอบสีของวัตถุต่างๆ ได้ จากการศึกษาอุปกรณ์ต่างๆ ดังกล่าวพบว่า อุปกรณ์แต่ละตัวจะมีลักษณะเด่นและด้อยที่น่าสนใจต่างกันไป ซึ่งจะสามารถสรุปคุณสมบัติของอุปกรณ์ดังกล่าวได้ดังนี้

5.1 Full Color LED

Full color LED เป็น LED 6 ขา ที่สามารถให้แสง 3 สีจากหลอดไฟ 3 หลอด คือ สีแดง เขียว และน้ำเงิน ซึ่งจากทฤษฎีทางแสงสีกล่าวว่าแสงขาวเกิดจากการรวมกันของแสงสีทั้ง 3 นี้ในอัตราส่วนที่เท่าๆ กัน ในขั้นต้นมีความตั้งใจว่าจะนำ Full Color Led มาเป็นแหล่งกำเนิดแสงขาวโดยการปรับสีทั้ง 3 สี ให้มีอัตราส่วนที่เหมาะสม แต่เมื่อทำการทดลองแล้วพบว่าแสงที่ออกจากหลอดทั้ง 3 สีของ Full Color Sensor จะกระจายกันออกมาไม่ได้รวมกันไม่สามารถที่จะให้แสงสีขาวได้ ดังนั้นจึงไม่สามารถที่จะนำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดแสงขาวได้ แต่ Full Color LED มีคุณสมบัติในการให้แสงสีที่ต่างกัน 3 สีดังกล่าว จึงประยุกต์นำมาใช้เป็นแหล่งกำเนิดสีปฐมภูมิ เพื่อใช้ในการทดสอบตัวตรวจจับต่อไป

5.2 RGB Color Sensor

RGB Color Sensor เป็นตัวตรวจจับที่สามารถบอกค่าองค์ประกอบสีทั้ง 3 สีของวัตถุต่างๆ ได้ จากการศึกษาและทำการทดลองพบว่าสามารถให้ความถูกต้องในการตรวจจับในระดับดี โดยทำการทดลองเป็นสองแบบคือ ทะลุผ่านและสะท้อน พบว่าในกรณีทำการทดลองแบบทะลุผ่านได้ผลออกมาก่อนข้างตรงตามทฤษฎีจะมีความคลาดเคลื่อนเล็กน้อย แต่ก็เนื่องมาจากปัจจัยภายนอกไม่ได้เกี่ยวข้องกับตัว RGB Color Sensor โดยตรง สำหรับการทดลองแบบสะท้อนพบว่าผลที่ได้มีความคลาดเคลื่อนมาก เนื่องจากไม่สามารถควบคุมแสงภายนอกได้หรือแสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงได้ แม้จะแก้ปัญหาโดยการใช้เลนส์ช่วยในการรวมแล้วก็ตาม พบว่าแสงที่รวมเข้าไปที่เลนส์ก็ยังคงมีแสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดรวมอยู่ด้วย เลนส์จะช่วยในการรวมแสงให้เป็นจุดเวลาตกกระทบที่ตัวตรวจจับ แต่ไม่สามารถแก้ปัญหาเรื่องการป้องกันแสงจากภายนอกจากการศึกษาถึงผลกระทบจากความเข้มของแหล่งกำเนิดแสงที่มีผลต่อการทำงานของตัว RGB Color Sensor ถ้าวางระหว่างตัวแหล่งกำเนิดแสงและ RGB Color Sensor ไม่ได้อยู่ในช่วงที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้เกิดกระแสในตัวหรือกระแสรั่วไหลแล้ว พบว่าความเข้มแสงจะไม่มีผลต่อการทำงานของตัวตรวจวัดนี้ กล่าวคือกระแสที่ได้จากจมีค่าลดลงแต่เมื่อทำการคำนวณตามทฤษฎีระบบวัดสี CIE จะได้ค่าที่เท่ากัน และจากการทดลองพบว่ากระแสที่ได้จากตัว RGB Color Sensor จะมีค่าน้อยมาก จึงต้องใช้ร่วมกับวงจรรขยาย และเมื่อทำการทดลองเพื่อศึกษาว่าวงจรรขยายที่ใช้มีผลต่อค่ากระแสที่วัดได้หรือไม่ พบว่าค่าที่ได้ออกมายังคงตรงตามค่า characteristic ของ RGB Color Sensor ตาม Data Sheet ดังนั้น RGB Color Sensor จึงเป็นตัวตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพที่ดีเหมาะกับการใช้งานในการตรวจวัดองค์ประกอบสีของวัตถุได้เป็นอย่างดี

5.3 หลอดทังสแตน

หลอดทังสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายพลังงานอย่างต่อเนื่องและพลังงานจะครอบคลุมช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร (Visible Light) เมื่อพบว่าไม่สามารถใช้ Full Color LED เป็นแหล่งกำเนิดได้ จึงใช้หลอดทังสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสงแทนก็เพราะมีคุณสมบัติดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น จากการศึกษาเกี่ยวกับคุณสมบัติของหลอดทังสแตนเพิ่มเติมพบว่า หลอดทังสแตนที่ใช้จะมีการกระจายพลังงานต่อเนื่องและครอบคลุมช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร แต่จากกราฟการกระจายพลังงานที่ได้พบว่าที่บริเวณค่าความยาวคลื่นที่ตรงกับสีเขียวเส้นกราฟจะมีค่าต่ำลง นั่นคือหลอดทังสแตนจะให้สีเขียวยออกมาในปริมาณที่น้อยกว่าสีอื่นๆ ดังนั้นเมื่อใช้หลอดทังสแตนเป็นแหล่งกำเนิดแสงจะพบว่าค่าองค์ประกอบสีที่วัดได้จะมีค่าองค์ประกอบที่เป็นสีเขียวจะมีค่าต่ำแม้ว่าวัตถุที่วัดจะเป็นสีเขียวกก็ตาม แต่สำหรับการวัดวัตถุสีอื่นก็จะได้ผลดีพอสมควร

แนวทางการการพัฒนา

- 1.) แหล่งกำเนิดแสงที่เลือกใช้ควรมีความใกล้เคียงกับแหล่งกำเนิดแสงธรรมชาติ หรือเป็นแหล่งกำเนิดแสงที่มีการกระจายพลังงานที่สม่ำเสมอ มีช่วงความยาวคลื่นครอบคลุมช่วงความยาวคลื่น 400 – 700 นาโนเมตร และมีอัตราส่วนระหว่างแสงแม่สีที่เหมาะสม
- 2.) ตัว Filter ที่ใช้ในการทดลองควรมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนพอสสมควร ในกรณีนี้ที่แหล่งกำเนิดแสงมีรังสีอื่นนอกจาก Visible Light ปะปนเข้ามา อาจทำให้ค่าที่ได้จากการวัดมีการคลาดเคลื่อนได้
- 3.) เนื่องจากกระแสที่ได้จากตัวตรวจวัดที่ค่าน้อยมาก ในส่วนของวงจรรขยายจะประกอบไปด้วยการขยายสัญญาณจากเซลล์รับแสงสี 3 เซลล์ดังนั้นจึงต้องมั่นใจก่อนใช้งานว่าอัตราขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณทั้ง 3 มีความสอดคล้องกับสเปกของ RGBที่กำหนดมาและเนื่องจากตัววงจรมีความไวมากดังนั้นวงจรก็ให้วงจรมีความเสถียรหรือ ควรให้วงจรมีการเคลื่อนย้ายน้อยที่สุด

4.) เครื่องมือวัดค่าต่างๆที่ใช้ควรมีประสิทธิภาพสูงพอสมควรในการใช้แหล่งกำเนิดแสงบางตัวที่มีความเข้มแสงน้อยๆสัญญาณที่ได้จะมีค่าน้อย ดังนั้นถ้าเครื่องมือวัดไม่มีความละเอียดมากพอก็จะไม่สามารถวัดค่าสัญญาณได้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

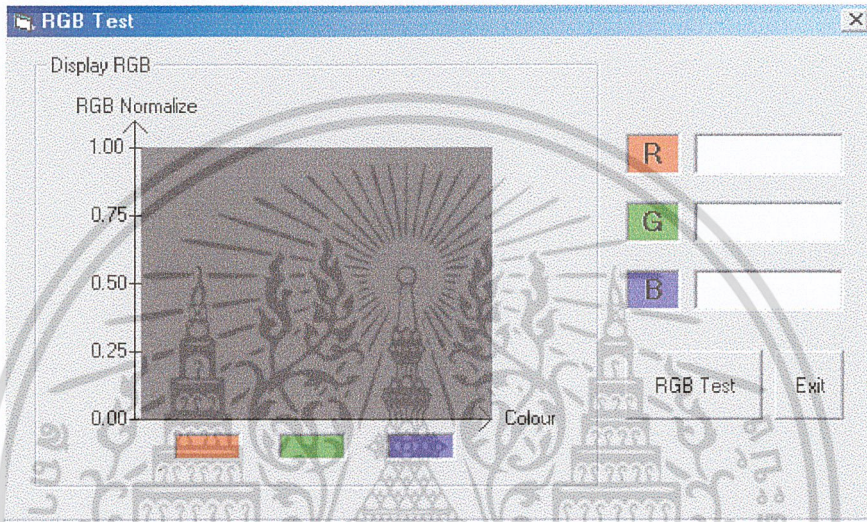


ภาคผนวก ก

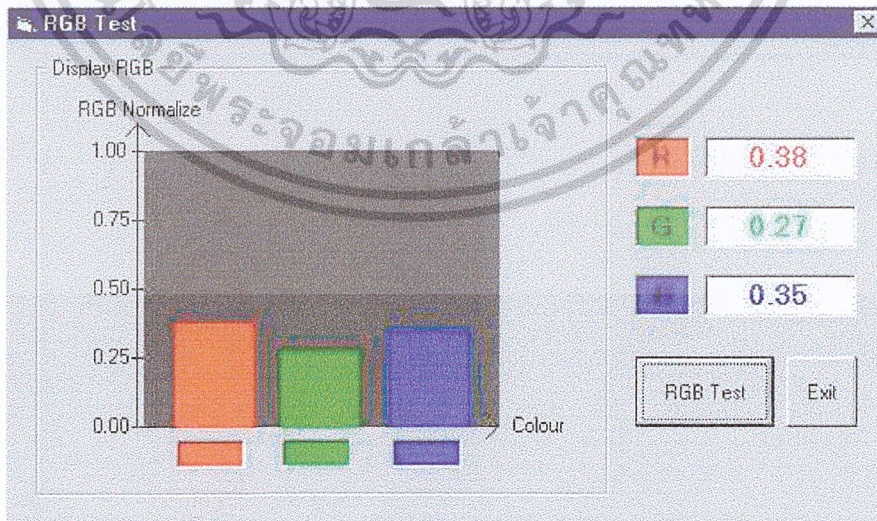
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก.
การใช้งานโปรแกรม

1. เริ่มโปรแกรม



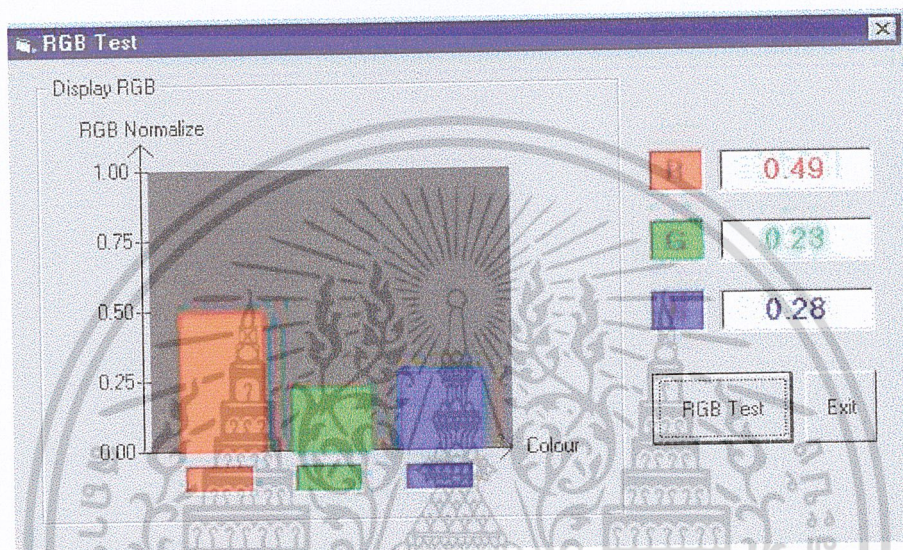
2. ทำการทดลองวัดแหล่งกำเนิดแสงทั้งสแตน (แสงขาว)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ทำการวัดแยกองค์ประกอบสีของวัตถุ

แสงสีแดง

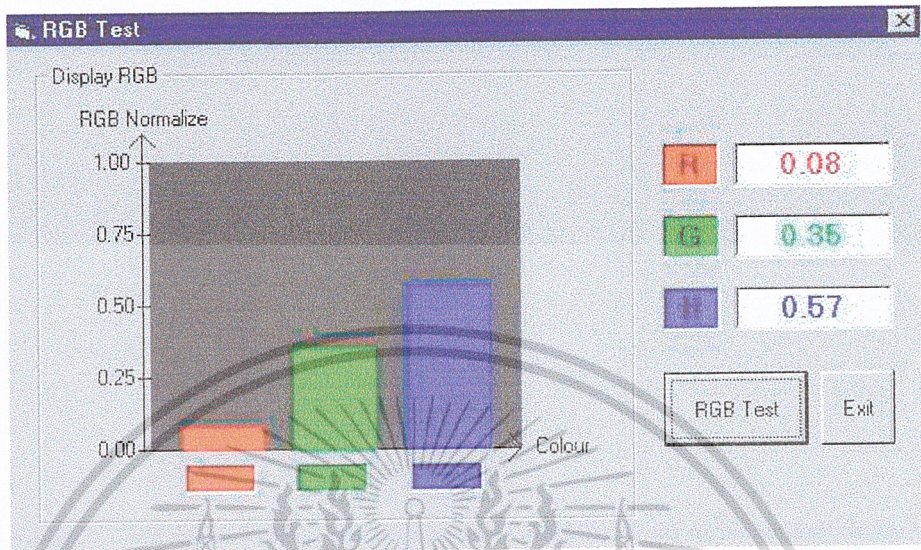


แสงสีเขียว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงสีน้ำเงิน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรมภาษาซี

```
#include c:\mc\8051io.h
```

```
#include c:\mc\8051reg.h
```

```
register unsigned char ch;
```

```
register int a;
```

```
main()
```

```
{
```

```
serinit(9600);
```

```
asm " CLR P3.2 ";
```

```
asm " CLR P3.4 ";
```

```
asm " CLR P3.5 ";
```

```
while(1)
```

```
{
```

```
ch=getch();
```

```
if (ch == 's')
```

```
{
```

```
asm " SETB P3.2 ";
```

```
delay(2);
```

```
a=P1;
```

```
putch(a);
```

```
asm " CLR P3.2 ";
```

```
delay(1);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
asm " SETB P3.4 ";  
delay(2);  
a=P1;  
putch(a);  
asm " CLR P3.4 ";  
delay(1);
```

```
asm " SETB P3.5 ";  
delay(2);  
a=P1;  
putch(a);  
asm " CLR P3.5 ";  
delay(1);  
}  
}
```



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โปรแกรม Visual Basic

General Declarations

Dim RGB(1 To 3) As String

Dim R As Integer

Dim G As Integer

Dim B As Integer

Dim k As Integer

Dim AddRGB As Integer

Dim R1 As Variant

Dim G1 As Variant

Dim B1 As Variant

Private Sub Form_Load()

On Error Resume Next

MSComm1.CommPort = 1

MSComm1.Settings = "9600,n,8,1"

MSComm1.InputLen = 1

MSComm1.RThreshold = 1

If Not MSComm1.PortOpen Then

MSComm1.PortOpen = True

End If

MSComm1.PortOpen = False

End Sub

Private Sub MSComm1_OnComm()

On Error Resume Next

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

If MSCComm1.CommEvent Then
    RGB(k) = MSCComm1.Input
    k = k + 1
    If k > 3 Then
        MSCComm1.PortOpen = False
        PLOT
    End If
End If
End Sub

Sub PLOT()
On Error Resume Next
    R = Val(RGB(1))
    G = Val(RGB(2))
    B = Val(RGB(3))
    AddRGB = R + G + B
    R1 = R / AddRGB
    G1 = G / AddRGB
    B1 = B / AddRGB
    Label1 = Format(R1, "0.00")
    Label2 = Format(G1, "0.00")
    Label3 = Format(B1, "0.00")
    Picture1.Line (2, 100)-(7, 100 - (R1 * 100)), vbRed, BF
    Picture1.Line (9, 100)-(14, 100 - (G1 * 100)), vbGreen, BF
    Picture1.Line (16, 100)-(21, 100 - (B1 * 100)), vbBlue, BF

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

End Sub

Private Sub Command1_Click()

On Error Resume Next

Picture1.Cls

Label1 = ""

Label2 = ""

Label3 = ""

If Not MSComm1.PortOpen Then

MSComm1.PortOpen = True

End If

k = 1

MSComm1.Output = "s"

End Sub

Private Sub Command2_Click()

End

End Sub

Private Sub Command3_Click()

Picture1.Cls

Label1 = ""

Label2 = ""

Label3 = ""

RGB(1) = "250"

RGB(2) = "100"

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

RGB(3) = "50"

PLOT

End Sub

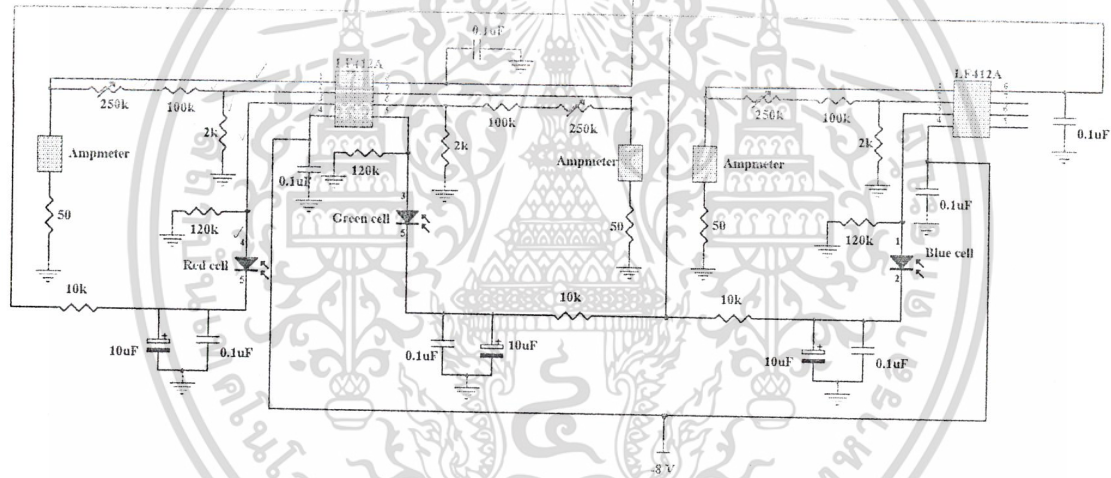


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



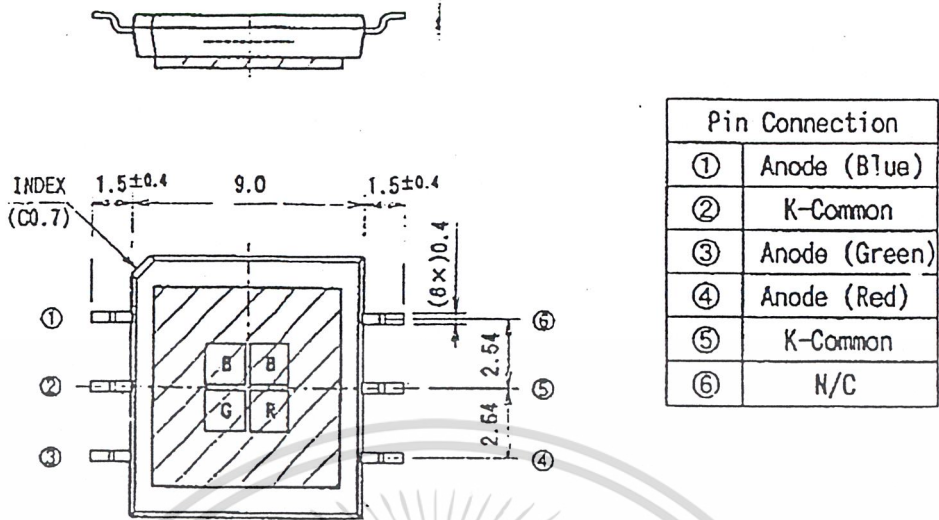
Title			
The Circuit For Use in Project			
Size	Number	Revision	
B			
Date:	15-May-2000	Sheet of Project	
File:	C:\PWSCH\PE SCH	Drawn By: Mongkol Jaurethan	



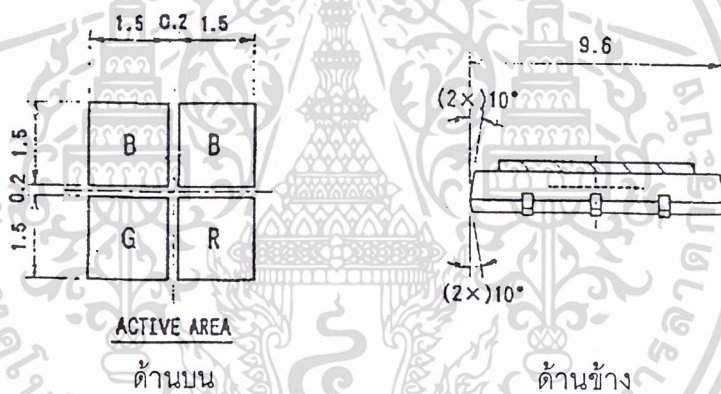
Data sheet

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

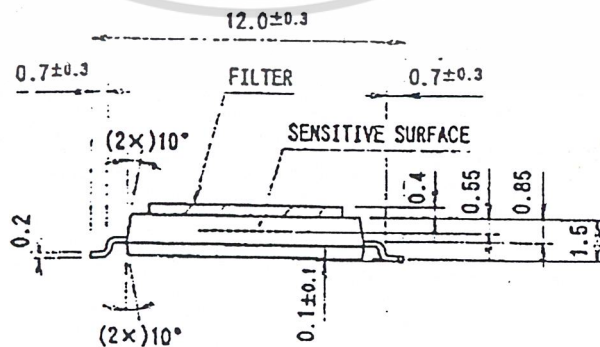
รายละเอียดของโครงสร้าง RGB color sensor



แสดงโครงสร้างของ RGB color sensor



แสดงภาพด้านบนและด้านข้างของ RGB color sensor



แสดงรายละเอียดของ RGB color sensor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตาราง แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของ RGB color sensor

□ Electrical and Optical Characteristics (Ta=25°C)

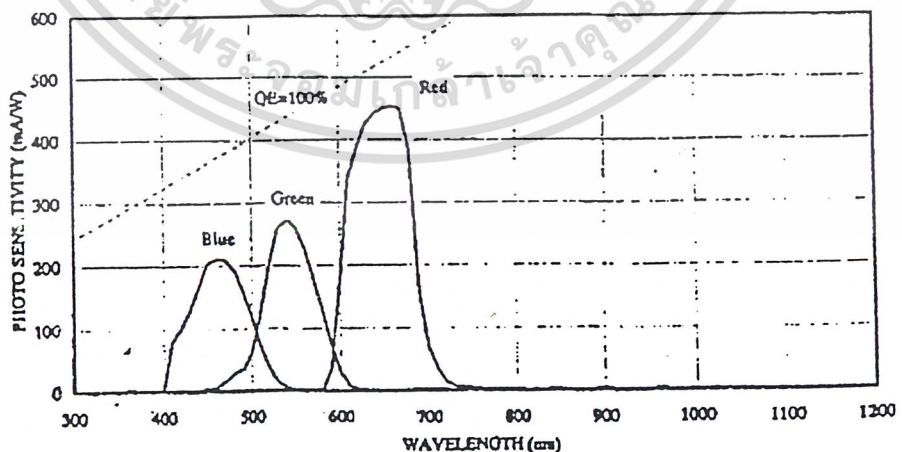
-Per Element-

Parameter	Symbol	Condition	Min.	Typ.	Max.	Unit	
Spectral Response Range	λ	Blue	400~540			nm	
		Green	480~600				
		Red	590~720				
Peak Sensitivity Wavelength	λ_p	Blue	—	480	—	nm	
		Green	—	540	—		
		Red	—	660	—		
Photo Sensitivity	S	$\lambda = \lambda_p$	Blue	—	0.22	A/W	
			Green	—	0.27		
			Red	—	0.45		
Dark Current	I_D	$V_R=1V$, Total Elements	—	10	200	pA	
Temperature Coefficient of Dark Current			—	1.12	—	Times/°C	
Rise Time	t_r	$V_R=0V, R_L=1k\Omega, 10\sim90\%$	—	0.5	—	μs	
Terminal Capacitance	C_t	$V_R=0V$ $f=10kHz$	Blue	—	150	300	pF
			Green, Red	—	80	150	

ตาราง แสดงคุณสมบัติการทำงาน

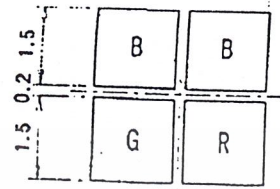
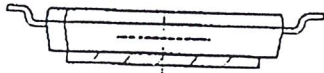
□ Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Value	Unit	Remark
Reverse Voltage	V_R Max	10	V	
Operating Temperature	T_{opr}	-10 ~ +60	°C	
Storage Temperature	T_{stg}	-20 ~ +70	°C	

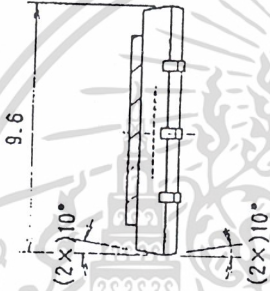
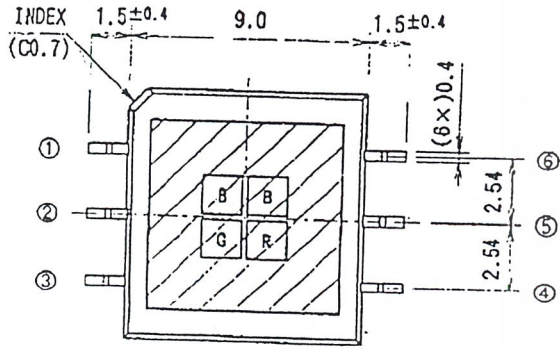
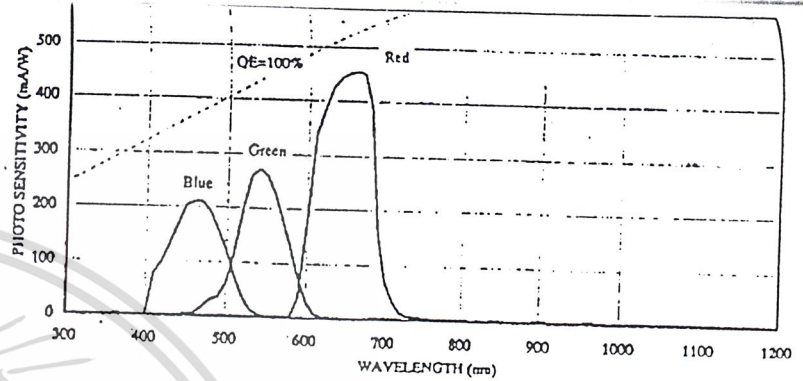


กราฟแสดงการตอบสนองของแต่ละเซลล์สี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ACTIVE AREA



= Ratings and Characteristics =

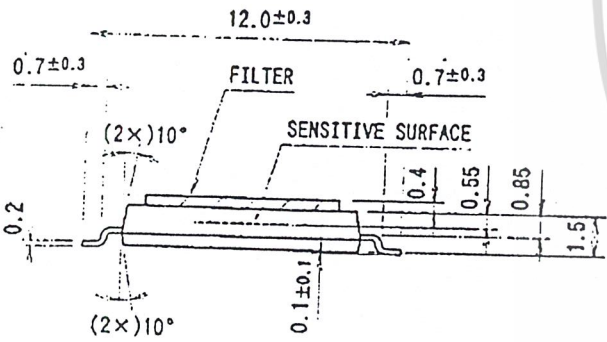
□ Absolute Maximum Ratings (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Value	Unit	Remark
Reverse Voltage	V _R Max	10	V	
Operating Temperature	T _{opr}	-10 ~ +60	°C	
Storage Temperature	T _{stg}	-20 ~ +70	°C	

□ Electrical and Optical Characteristics (Ta=25°C)

Parameter	Symbol	Condition	-Per Element-			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Spectral Response Range	λ		Blue	400~540		nm
			Green	480~600		
			Red	590~720		
Peak Sensitivity Wavelength	λ _p		Blue	460		nm
			Green	540		
			Red	660		
Photo Sensitivity	S	λ = λ _p	Blue	0.22		A/W
			Green	0.27		
			Red	0.45		
Dark Current	I _o	V _R =1V, Total Elements		10	200	pA
Temperature Coefficient of Dark Current				1.12		Times/°C
Rise Time	t _r	V _R =0V, R _L =1kΩ, 10~90%		0.5		μs
Terminal Capacitance	C _t	V _R =0V f=10kHz	Blue	150	300	pF
			Green, Red	80	150	

Pin Connection	
①	Anode (Blue)
②	K-Common
③	Anode (Green)
④	Anode (Red)
⑤	K-Common
⑥	N/C

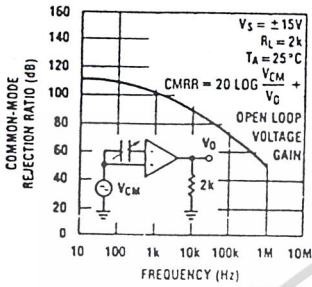


NOTE
GENERAL TOLERANCE LENGTH: ±0.1
ANGLE: ±2°

REVISION	DATE	DESIGNER	CHECKER	APPROVER	UNIT	SCALE	TITLE	DWG. No.	REV
ADDITION: Ratings and Characteristics	1998. 9.11	鈴木	神原	森下	中根	5/1	S 7 5 0 5 (RGB 1 chip sensor)		
CHANGE: SPECTRAL RESPONSE CHARACTERISTIC	1998. 9. 3	鈴木	神原	森下	中根				
FIRST ISSUE 初発行	1998. 8. 3	鈴木	神原	伊藤	中根		K10-F10256		

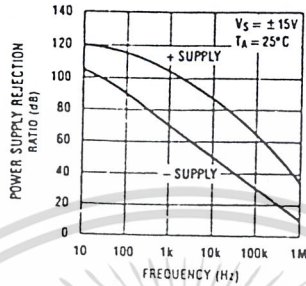
Typical Performance Characteristics (Continued)

Common-Mode Rejection Ratio



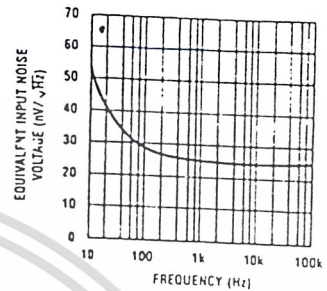
DS005656-25

Power Supply Rejection Ratio



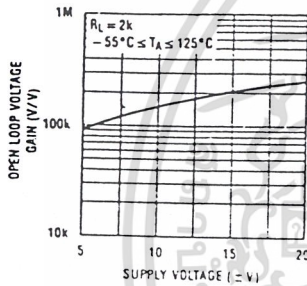
DS005656-26

Equivalent Input Noise Voltage



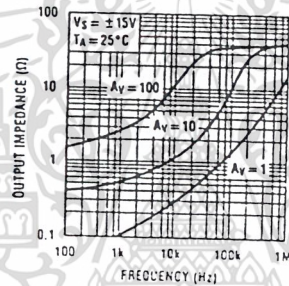
DS005656-27

Open Loop Voltage Gain



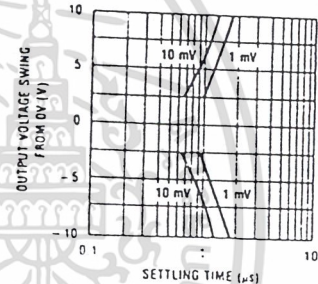
DS005656-28

Output Impedance



DS005656-29

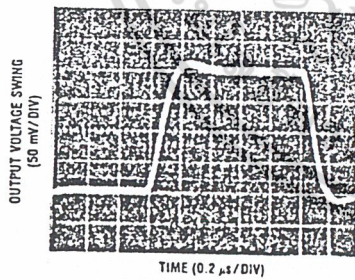
Inverter Settling Time



DS005656-30

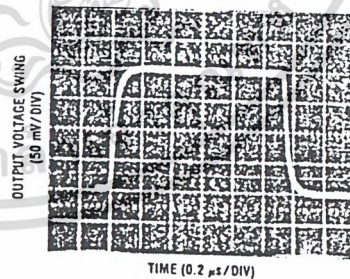
Pulse Response $R_L = 2\text{ k}\Omega$, $C_L = 10\text{ pF}$

Small Signal Inverting



DS005656-36

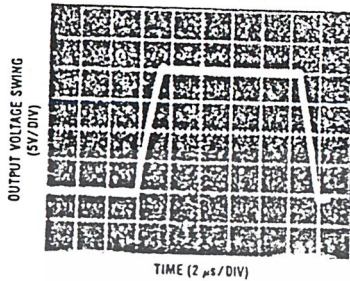
Small Signal Non-Inverting



DS005656-37

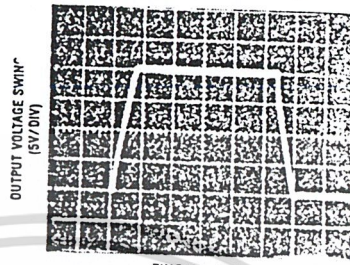
Pulse Response $R_L=2\text{ k}\Omega$, $C_L=10\text{ pF}$ (Continued)

Large Signal Inverting



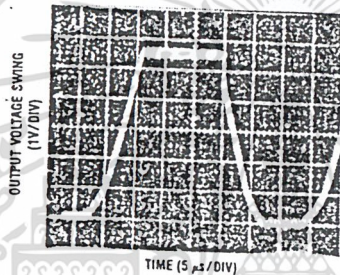
DS005656-38

Large Signal Non-Inverting



DS005656-39

Current Limit ($R_L=100\Omega$)



DS005656-40

Application Hints

The LF412 series of JFET input dual op amps are internally trimmed (BI-FET II™) providing very low input offset voltages and guaranteed input offset voltage drift. These JFETs have large reverse breakdown voltages from gate to source and drain eliminating the need for clamps across the inputs. Therefore, large differential input voltages can easily be accommodated without a large increase in input current. The maximum differential input voltage is independent of the supply voltages. However, neither of the input voltages should be allowed to exceed the negative supply as this will cause large currents to flow which can result in a destroyed unit.

Exceeding the negative common-mode limit on either input will cause a reversal of the phase to the output and force the amplifier output to the corresponding high or low state.

Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier output to a high state. In neither case does a latch occur since raising the input back within the common-mode range again puts the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

Exceeding the positive common-mode limit on a single input will not change the phase of the output, however, if both inputs exceed the limit, the output of the amplifier may be forced to a high state.

The amplifiers will operate with a common-mode input voltage equal to the positive supply; however, the gain bandwidth and slew rate may be decreased in this condition. When the negative common-mode voltage swings to within V_{OS} of the negative supply, an increase in input offset voltage may occur.

Each amplifier is individually biased by a zener reference which allows normal circuit operation on $\pm 6.0\text{V}$ power supplies. Supply voltages less than these may result in lower gain bandwidth and slew rate.

The amplifiers will drive a $2\text{ k}\Omega$ load resistance to $\pm 10\text{V}$ over the full temperature range. If the amplifier is forced to drive heavier load currents, however, an increase in input offset voltage may occur on the negative voltage swing and finally reach an active current limit on both positive and negative swings.

Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed backwards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

As with most amplifiers, care should be taken with lead dress, component placement and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to an input should be placed with the body close to the input to minimize "pick-up" and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to ground.

A feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance from the input of the device (usually the inverting input) to AC ground set the frequency of the pole. In many instances the frequency of this pole is much greater than the expected 3 dB frequency of the closed loop gain and consequently there is negligible effect on stability margin. However, if the feedback pole is less than approximately 6 times the ex-

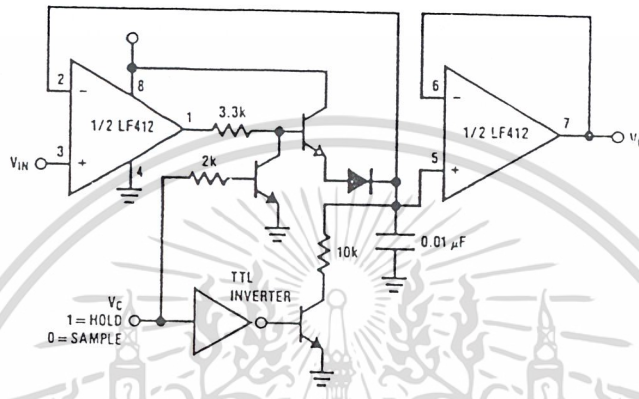
Application Hints (Continued)

pected 3 dB frequency a lead capacitor should be placed from the output to the input of the op amp. The value of the

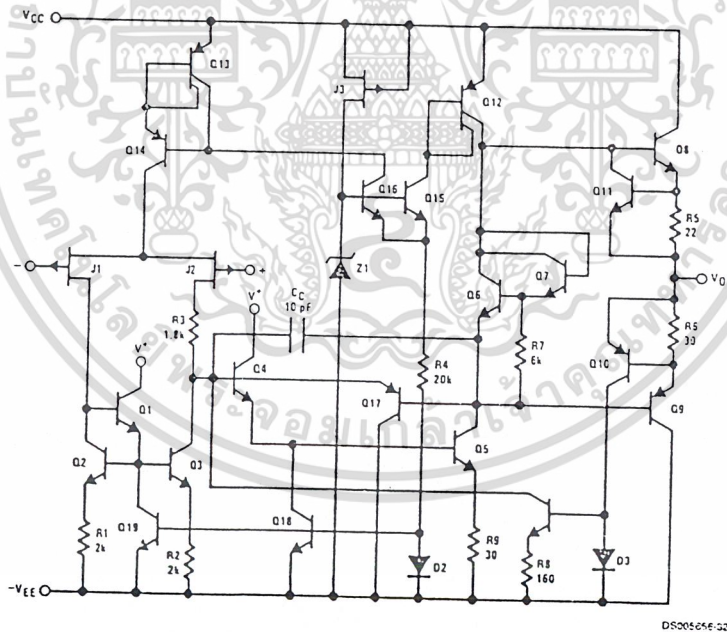
added capacitor should be such that the RC time constant of this capacitor and the resistance it parallels is greater than or equal to the original feedback pole time constant.

Typical Application

Single Supply Sample and Hold

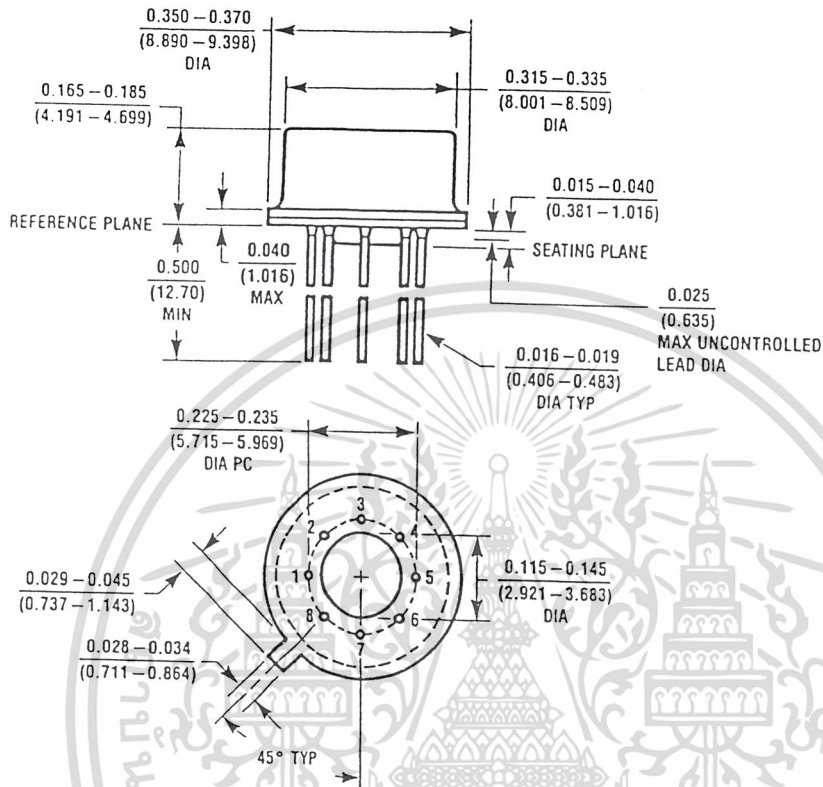


Detailed Schematic



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted



Metal Can Package (H)
 Order Number LF412AMH, LF412MH, LF412MH/883 or LF412CH
 NS Package Number H08A

H08A (REV C)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Notes

LF412 Low Offset, Low Drift Dual JFET Input Operational Amplifier



WARRANTY SUPPORT POLICY

NATIONAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT DEVICES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL COUNSEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

Life support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.

2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

National Semiconductor Corporation
Americas
Tel: 1-800-272-9959
Fax: 1-800-737-7018
Email: support@nsc.com

National Semiconductor Europe
Fax: +49 (0) 1 80-530 85 86
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tel: +49 (0) 1 80-530 85 85
English Tel: +49 (0) 1 80-532 78 32
Français Tel: +49 (0) 1 80-532 93 58
Italiano Tel: +49 (0) 1 80-534 16 80

National Semiconductor Asia Pacific Customer Response Group
Tel: 65-2544466
Fax: 65-2504466
Email: sea.support@nsc.com

National Semiconductor Japan Ltd.
Tel: 81-3-5639-7560
Fax: 81-3-5639-7507

www.national.com

Does not assume any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

CD4066BC Quad Bilateral Switch

General Description

The CD4066BC is a quad bilateral switch intended for the transmission or multiplexing of analog or digital signals. It is pin-for-pin compatible with CD4016BC, but has a much lower "ON" resistance, and "ON" resistance is relatively constant over the input-signal range.

Features

- Wide supply voltage range 3V to 15V
- High noise immunity $0.45 V_{DD}$ (typ.)
- Wide range of digital and analog switching $\pm 7.5 V_{PEAK}$
- "ON" resistance for 15V operation 80Ω
- Matched "ON" resistance $\Delta R_{ON} = 5\Omega$ (typ.) over 15V signal input
- "ON" resistance flat over peak-to-peak signal range
- High "ON"/"OFF" 65 dB (typ.) output voltage ratio @ $f_{is} = 10$ kHz, $R_L = 10$ k Ω

- High degree linearity 0.1% distortion (typ.)
- High degree linearity @ $f_{is} = 1$ kHz, $V_{is} = 5V_{D-O}$.
- High degree linearity $V_{DD} - V_{SS} = 10V$, $R_L = 10$ k Ω
- Extremely low "OFF" switch leakage: 0.1 nA (typ.) @ $V_{DD} - V_{SS} = 10V$, $T_A = 25^\circ C$
- Extremely high control input impedance $10^{12}\Omega$ (typ.)
- Low crosstalk 50 dB (typ.) between switches @ $f_{is} = 0.9$ MHz, $R_L = 1$ k Ω
- Frequency response, switch "ON" 40 MHz (typ.)

Applications

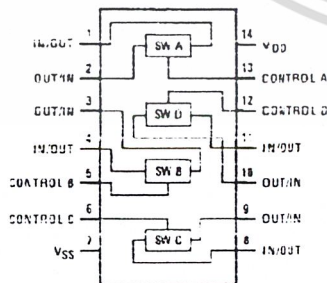
- Analog signal switching/multiplexing
- Signal gating
- Squelch control
- Chopper
- Modulator/Demodulator
- Commutating switch
- Digital signal switching/multiplexing
- CMOS logic implementation
- Analog-to-digital/digital-to-analog conversion
- Digital control of frequency, impedance, phase, and analog-signal-gain

Ordering Code:

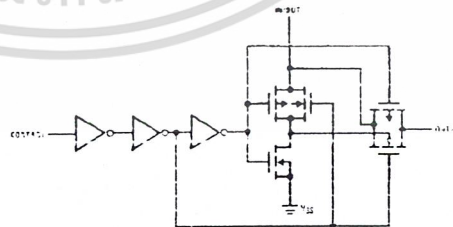
Order Number	Package Number	Package Description
CD4066BCM	M14A	14-Lead Small Outline Integrated Circuit (SOIC), JEDEC MS-120, 0.150 Narrow
CD4066BCSJ	M14D	14-Lead Small Outline Package (SOP), EIAJ TYPE II, 5.3mm Wide
CD4066BCN	N14A	14-Lead Plastic Dual-In-Line Package (PDIP), JEDEC MS-001, 0.300 Wide

Devices also available in Tape and Reel. Specify by appending suffix letter "X" to the ordering code.

Connection Diagram



Schematic Diagram



Absolute Maximum Ratings

(Note 1)

(Note 2)

Supply Voltage (V_{DD})	-0.5V to +18V
Input Voltage (V_{IN})	-0.5V to $V_{CC}+0.5V$
Storage Temperature Range (T_S)	-65°C to +150°C
Power Dissipation (P_D)	
Dual-In-Line	700 mW
Small Outline	500 mW
Lead Temperature (T_L)	
(Soldering, 10 seconds)	300°C

Recommended Operating Conditions (Note 2)

Supply Voltage (V_{DD})	3V to 15V
Input Voltage (V_{IN})	0V to V_{DD}
Operating Temperature Range (T_A)	-40°C to +85°C

Note 1: "Absolute Maximum Ratings" are those values beyond which the safety of the device cannot be guaranteed. They are not meant to imply that the devices should be operated at these limits. The tables of "Recommended Operating Conditions" and "Electrical Characteristics" provide conditions for actual device operation.

Note 2: $V_{SS} = 0V$ unless otherwise specified.

DC Electrical Characteristics (Note 2)

Symbol	Parameter	Conditions	-40°C		-25°C		+85°C		Units
			Min	Max	Min	Typ	Max	Min	
I_{DD}	Quiescent Device Current	$V_{DD} = 5V$		1.0	0.01	1.0	7.5	μA	
		$V_{DD} = 10V$		2.0	0.01	2.0	15	μA	
		$V_{DD} = 15V$		4.0	0.01	4.0	30	μA	
SIGNAL INPUTS AND OUTPUTS									
R_{ON}	"ON" Resistance	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ to ($V_{DD} - V_{SS}/2$) $V_C = V_{DD} - V_{SS}$ to V_{DD} $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$		850	270	1050	1200	Ω	
ΔR_{ON}	Δ "ON" Resistance Between Any 2 of 4 Switches	$R_L = 10\text{ k}\Omega$ to ($V_{DD} - V_{SS}/2$) $V_{CC} = V_{DD}$, $V_{SS} = V_{SS}$ to V_{DD} $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$			10			Ω	
					5			Ω	
I_{IS}	Input or Output Leakage Switch "OFF"	$V_C = 0$		± 50	± 0.1	± 50	± 200	nA	
CONTROL INPUTS									
V_{IL}	LOW Level Input Voltage	$V_{IS} = V_{SS}$ and V_{DD} $V_{OS} = V_{DD}$ and V_{SS} $I_{IS} = \pm 10\mu A$ $V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ $V_{DD} = 15V$		1.5	2.25	1.5	1.5	V	
				3.0	4.5	3.0	3.0	V	
				4.0	6.75	4.0	4.0	V	
V_{IH}	HIGH Level Input Voltage	$V_{DD} = 5V$ $V_{DD} = 10V$ (Note 7) $V_{DD} = 15V$	3.5		3.5	2.75	3.5	V	
			7.0		7.0	5.5	7.0	V	
			11.0		11.0	8.25	11.0	V	
I_{IN}	Input Current	$V_{DD} - V_{SS} = 15V$ $V_{DD} = V_{IS} = V_{SS}$ $V_{DD} = V_C = V_{SS}$		± 0.3	$\pm 10^{-9}$	± 0.3	± 1.0	μA	

AC Electrical Characteristics (Note 3)T_A = 25°C, t_r = t_f = 20 ns and V_{GS} = 0V unless otherwise noted

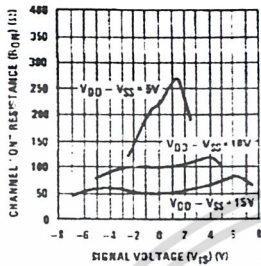
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Units
t _{PHL} , t _{PLH}	Propagation Delay Time Signal Input to Signal Output	V _C = V _{DD} , C _L = 50 pF, (Figure 1) R _L = 200k V _{DD} = 5V V _{DD} = 10V V _{DD} = 15V		25 15 10	55 35 25	ns ns ns
t _{PZH} , t _{PZL}	Propagation Delay Time Control Input to Signal Output High Impedance to Logical Level	R _L = 1.0 kΩ, C _L = 50 pF, (Figure 2, Figure 3) V _{DD} = 5V V _{DD} = 10V V _{DD} = 15V			125 60 50	ns ns ns
t _{PHZ} , t _{PLZ}	Propagation Delay Time Control Input to Signal Output Logical Level to High Impedance Sine Wave Distortion Frequency Response-Switch "ON" (Frequency at -3 dB)	R _L = 1.0 kΩ, C _L = 50 pF, (Figure 2, Figure 3) V _{DD} = 5V V _{DD} = 10V V _{DD} = 15V V _C = V _{DD} = 5V, V _{SS} = -5V R _L = 10 kΩ, V _{IS} = 5V _{pp} , f = 1 kHz, (Figure 4) V _C = V _{DD} = 5V, V _{SS} = -5V R _L = 1 kΩ, V _{IS} = 5V _{pp} , 20 Log ₁₀ V _{OS} /V _{OIS} (1 kHz) -dB, (Figure 4)			125 60 50 0.1 40	ns ns ns % MHz
	Feedthrough — Switch "OFF" (Frequency at -50 dB)	V _{DD} = 5.0V, V _{CC} = V _{SS} = -5.0V, R _L = 1 kΩ, V _{IS} = 5.0V _{pp} , 20 Log ₁₀ V _{OS} /V _{IS} = -50 dB, (Figure 4)		1.25		
	Crosstalk Between Any Two Switches (Frequency at -50 dB)	V _{DD} = V _{C(A)} = 5.0V, V _{SS} = V _{C(B)} = 5.0V, R _L = 1 kΩ, V _{IS(A)} = 5.0V _{pp} , 20 Log ₁₀ V _{OS(B)} /V _{IS(A)} = -50 dB (Figure 5)		0.9		MHz
	Crosstalk: Control Input to Signal Output	V _{DD} = 10V, R _L = 10 kΩ, R _{TH} = 1.0 kΩ, V _{CC} = 10V Square Wave, C _L = 50 pF (Figure 6)		150		mV _{pp}
	Maximum Control Input	R _L = 1.0 kΩ, C _L = 50 pF, (Figure 7) V _{OS(1)} = 1/2 V _{OS} (1.0 MHz) V _{DD} = 5.0V V _{DD} = 10V V _{DD} = 15V		6.0 8.0 8.5		MHz MHz MHz
C _{IS}	Signal Input Capacitance			8.0		pF
C _{OS}	Signal Output Capacitance	V _{DD} = 10V		8.0		pF
C _{IOS}	Feedthrough Capacitance	V _C = 0V		0.5		pF
C _{IN}	Control Input Capacitance			5.0	7.5	pF

Note 3: AC Parameters are guaranteed by DC correlated testing.**Note 4:** These devices should not be connected to circuits with the power "ON".**Note 5:** In all cases, there is approximately 5 pF of probe and jig capacitance in the output; however, this capacitance is included in C_L wherever it is specified.**Note 6:** V_{IS} is the voltage at the input pin and V_{OS} is the voltage at the output pin. V_C is the voltage at the control input.**Note 7:** Conditions for V_{PHZ}: a) V_{IS} = V_{DD}, I_{OS} = standard B series I_{OH} b) V_{IS} = 0V, I_{CL} = standard B series I_{OL}.

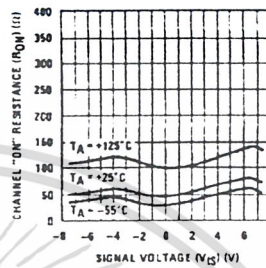
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics

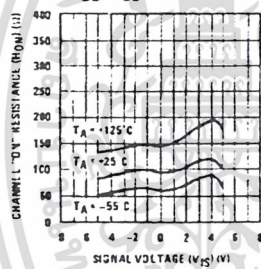
“ON” Resistance vs Signal Voltage for $T_A = 25^\circ\text{C}$



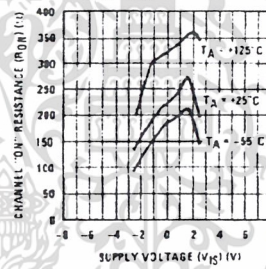
“ON” Resistance as a Function of Temperature for $V_{DD}-V_{SS} = 15\text{V}$



“ON” Resistance as a Function of Temperature for $V_{DD}-V_{SS} = 10\text{V}$



“ON” Resistance as a Function of Temperature for $V_{DD}-V_{SS} = 5\text{V}$



Special Considerations

In applications where separate power sources are used to drive V_{DD} and the signal input, the V_{DD} current capability should exceed V_{DD}/R_L (R_L = effective external load of the 4 CD4066BC bilateral switches). This provision avoids any permanent current flow or clamp action of the V_{DD} supply when power is applied or removed from CD4066BC.

In certain applications, the external load-resistor current may include both V_{DD} and signal-line components. To

avoid drawing V_{DD} current when switch current flows into terminals 1, 4, 8 or 11, the voltage drop across the bidirectional switch must not exceed 0.6V at $T_A \leq 25^\circ\text{C}$, or 0.4V at $T_A > 25^\circ\text{C}$ (calculated from R_{ON} values shown).

No V_{DD} current will flow through R_L if the switch current flows into terminals 2, 3, 9 or 10.

AC Test Circuits and Switching Time Waveforms

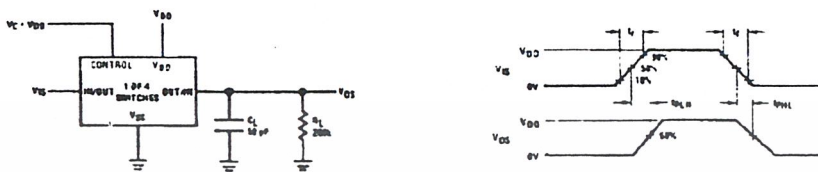


FIGURE 1. t_{PHL} , t_{PLH} Propagation Delay Time Signal Input to Signal Output



FIGURE 2. t_{PZH} , t_{PHZ} Propagation Delay Time Control to Signal Output

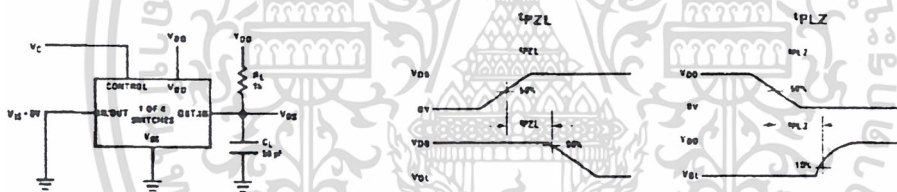
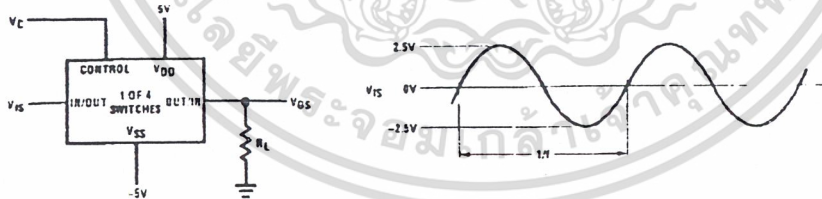


FIGURE 3. t_{PZL} , t_{PLZ} Propagation Delay Time Control to Signal Output



$V_C = V_{DD}$ for distortion and frequency response tests

$V_C = V_{SS}$ for feedthrough test

FIGURE 4. Sine Wave Distortion, Frequency Response and Feedthrough

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC Test Circuits and Switching Time Waveforms (Continued)

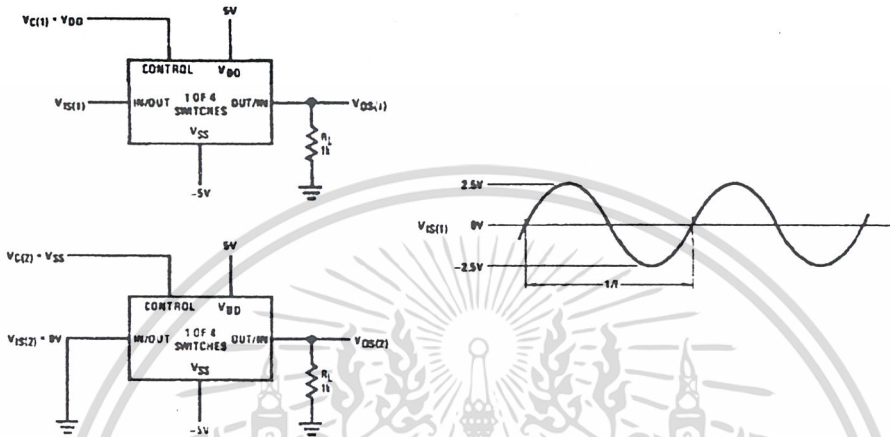


FIGURE 5. Crosstalk Between Any Two Switches

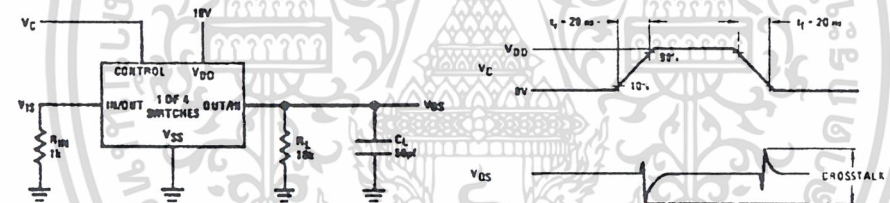


FIGURE 6. Crosstalk: Control Input to Signal Output

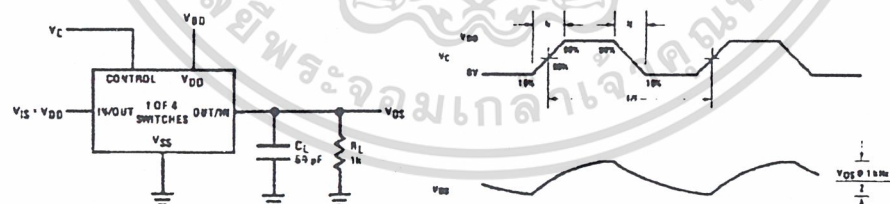


FIGURE 7. Maximum Control Input Frequency

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Features

- Compatible with MCS-51™ Products
- 2K Bytes of Reprogrammable Flash Memory
- Endurance: 1,000 Write/Erase Cycles
- 5V to 6V Operating Range
- Static Operation: 0 Hz to 24 MHz
- Two-Level Program Memory Lock
- 128 x 8-bit Internal RAM
- 8 Programmable I/O Lines
- Two 16-bit Timer/Counters
- Five Interrupt Sources
- Reprogrammable Serial UART Channel
- On-chip LED Drive Outputs
- On-chip Analog Comparator
- Low-power Idle and Power-down Modes

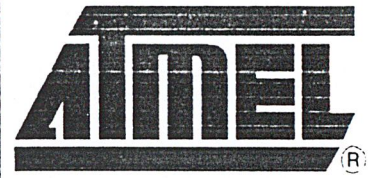
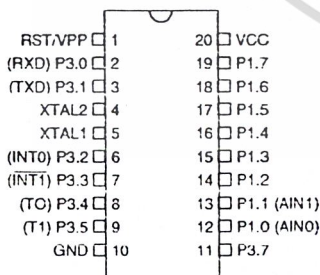
Description

AT89C2051 is a low-voltage, high-performance CMOS 8-bit microcomputer with 2K bytes of Flash programmable and erasable read only memory (PEROM). The AT89C2051 is manufactured using Atmel's high-density nonvolatile memory technology and is compatible with the industry-standard MCS-51 instruction set. By combining a high-performance 8-bit CPU with Flash on a monolithic chip, the Atmel AT89C2051 is a powerful microcomputer which provides a highly-flexible and cost-effective solution to many embedded control applications.

AT89C2051 provides the following standard features: 2K bytes of Flash, 128 bytes of RAM, 12 I/O lines, two 16-bit timer/counters, a five vector two-level interrupt structure, a full duplex serial port, a precision analog comparator, on-chip oscillator and clock circuitry. In addition, the AT89C2051 is designed with static logic for operation down to zero frequency and supports two software selectable power saving modes. The Idle Mode stops the CPU while allowing the RAM, timer/counters, serial port and interrupt system to continue functioning. The power-down mode saves the program contents but freezes the oscillator disabling all other chip functions until the next reset.

Configuration

PDIP/SOIC



8-bit Microcontroller with 2K Bytes Flash

AT89C2051

Rev. 0368E-02/00



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Description

ly voltage.

nd.

1

1 is an 8-bit bi-directional I/O port. Port pins P1.2 to P1.7 provide internal pullups. P1.0 and P1.1 require external pullups. P1.0 and P1.1 also serve as the positive input (AIN0) and the negative input (AIN1), respectively, of the on-chip precision analog comparator. The Port 1 output buffers can sink 20 mA and can drive LED displays directly. When 1s are written to Port 1 pins, they can be used as outputs. When pins P1.2 to P1.7 are used as inputs and are externally pulled low, they will source current (I_{IL}) because of the internal pullups.

Port 1 also receives code data during Flash programming and verification.

3

Port 3 pins P3.0 to P3.5, P3.7 are seven bi-directional I/O pins with internal pullups. P3.6 is hard-wired as an input to the output of the on-chip comparator and is not accessible as a general purpose I/O pin. The Port 3 output buffers can sink 20 mA. When 1s are written to Port 3 pins they are pulled high by the internal pullups and can be used as outputs. As inputs, Port 3 pins that are externally being pulled low will source current (I_{IL}) because of the pullups.

Port 3 also serves the functions of various special features of the AT89C2051 as listed below:

Pin	Alternate Functions
	RXD (serial input port)
	TXD (serial output port)
	$\overline{INT0}$ (external interrupt 0)
	$\overline{INT1}$ (external interrupt 1)
	T0 (timer 0 external input)
	T1 (timer 1 external input)

Port 3 also receives some control signals for Flash programming and verification.

Port 4 is an input. All I/O pins are reset to 1s as soon as RST pin is pulled high. Holding the RST pin high for two machine cycles while the oscillator is running resets the device.

Each machine cycle takes 12 oscillator or clock cycles.

XTAL1

Input to the inverting oscillator amplifier and input to the internal clock operating circuit.

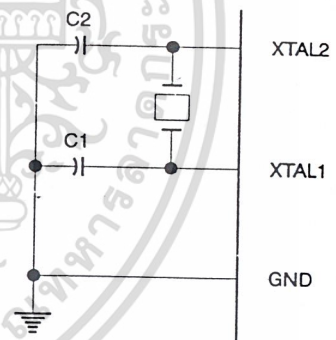
XTAL2

Output from the inverting oscillator amplifier.

Oscillator Characteristics

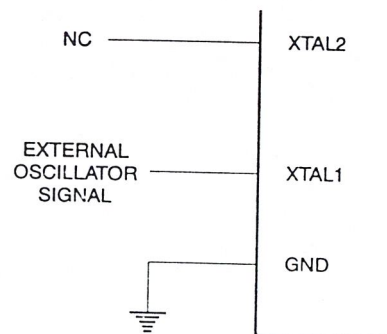
XTAL1 and XTAL2 are the input and output, respectively, of an inverting amplifier which can be configured for use as an on-chip oscillator, as shown in Figure 1. Either a quartz crystal or ceramic resonator may be used. To drive the device from an external clock source, XTAL2 should be left unconnected while XTAL1 is driven as shown in Figure 2. There are no requirements on the duty cycle of the external clock signal, since the input to the internal clocking circuitry is through a divide-by-two flip-flop, but minimum and maximum voltage high and low time specifications must be observed.

Figure 1. Oscillator Connections



Note: C1, C2 = 30 pF ± 10 pF for Crystals
= 40 pF ± 10 pF for Ceramic Resonators

Figure 2. External Clock Drive Configuration





Special Function Registers

Map of the on-chip memory area called the Special Function Register (SFR) space is shown in the table below.

Note that not all of the addresses are occupied, and unoccupied addresses may not be implemented on the chip. Read accesses to these addresses will in general return

random data, and write accesses will have an indeterminate effect.

User software should not write 1s to these unlisted locations, since they may be used in future products to introduce new features. In that case, the reset or inactive values of the new bits will always be 0.

Table 1. AT89C2051 SFR Map and Reset Values

8H										0FFH
0H	B 00000000									0F7H
3H										0EFH
0H	ACC 00000000									0E7H
3H										0DFH
0H	PSW 00000000									0D7H
0H										0CFH
0H										0C7H
0H	IP XXX00000									0BFH
0H	P3 11111111									0B7H
0H	IE 0XX00000									0AFH
0H										0A7H
0H	SCON 00000000	SBUF XXXXXXXX								9FH
0H	F1 11111111									97H
0H	TCON 00000000	TMOD 00000000	TL0 00000000	TL1 00000000	TH0 00000000	TH1 00000000				8FH
0H		SP 00001111	DPL 00000000	DPH 00000000					PCON 0XXX0000	87H

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ **AT89C2051** นี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการนำไปใช้

Restrictions on Certain Instructions

AT89C2051 and is an economical and cost-effective member of Atmel's growing family of microcontrollers. It contains 2K bytes of flash program memory. It is fully compatible with the MCS-51 architecture, and can be programmed using the MCS-51 instruction set. However, there are a few considerations one must keep in mind when utilizing certain instructions to program this device.

The instructions related to jumping or branching should be restricted such that the destination address falls within the physical program memory space of the device, which is 0000H to 0FFFH for the AT89C2051. This should be the responsibility of the software programmer. For example, LJMP 7E0H would be a valid instruction for the AT89C2051 (with 2K of program memory), whereas LJMP 900H would not.

Branching instructions:

LJMP, ACALL, AJMP, SJMP, JMP @A+DPTR

For unconditional branching instructions will execute correctly as long as the programmer keeps in mind that the destination branching address must fall within the physical boundaries of the program memory size (locations 0000H to 0FFFH for the AT89C2051). Violating the physical space limits will cause unknown program behavior.

For conditional branching instructions the same rule applies. Again, violating the memory boundaries will cause erratic execution.

For applications involving interrupts the normal interrupt routine address locations of the 80C51 family architecture have been preserved.

MOVX-related instructions, Data Memory:

The AT89C2051 contains 128 bytes of internal data memory. Thus, in the AT89C2051 the stack depth is limited to 128 bytes, the amount of available RAM. External DATA memory access is not supported in this device, nor is external PROGRAM memory execution. Therefore, no MOVX instructions should be included in the program.

The standard 80C51 assembler will still assemble instructions, if they are written in violation of the restrictions mentioned above. It is the responsibility of the controller user to understand the physical features and limitations of the device and adjust the instructions used accordingly.

Program Memory Lock Bits

On the chip are two lock bits which can be left unprogrammed (U) or can be programmed (P) to obtain the additional features listed in the table below:

Lock Bit Protection Modes⁽¹⁾

Program Lock Bits			Protection Type
	LB1	LB2	
1	U	U	No program lock features.
2	P	U	Further programming of the Flash is disabled.
3	P	P	Same as mode 2, also verify is disabled.

Note: 1. The Lock Bits can only be erased with the Chip Erase operation.

Idle Mode

In idle mode, the CPU puts itself to sleep while all the on-chip peripherals remain active. The mode is invoked by software. The content of the on-chip RAM and all the special functions registers remain unchanged during this mode. The idle mode can be terminated by any enabled interrupt or by a hardware reset.

P1.0 and P1.1 should be set to "0" if no external pullups are used, or set to "1" if external pullups are used.

It should be noted that when idle is terminated by a hardware reset, the device normally resumes program execution, from where it left off, up to two machine cycles before the internal reset algorithm takes control. On-chip hardware inhibits access to internal RAM in this event, but access to the port pins is not inhibited. To eliminate the possibility of an unexpected write to a port pin when Idle is terminated by reset, the instruction following the one that invokes Idle should not be one that writes to a port pin or to external memory.

Power-down Mode

In the power down mode the oscillator is stopped, and the instruction that invokes power down is the last instruction executed. The on-chip RAM and Special Function Registers retain their values until the power down mode is terminated. The only exit from power down is a hardware reset. Reset redefines the SFRs but does not change the on-chip RAM. The reset should not be activated before V_{CC} is restored to its normal operating level and must be held active long enough to allow the oscillator to restart and stabilize.

P1.0 and P1.1 should be set to "0" if no external pullups are used, or set to "1" if external pullups are used.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการ

ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





Programming The Flash

AT89C2051 is shipped with the 2K bytes of on-chip ROM code memory array in the erased state (i.e., contents = FFH) and ready to be programmed. The code memory array is programmed one byte at a time. *Once the array is programmed, to re-program any non-blank byte, the entire memory array needs to be erased electrically.*

Internal Address Counter: The AT89C2051 contains an internal PEROM address counter which is always reset to 000H on the rising edge of RST and is advanced by applying a positive going pulse to pin XTAL1.

Programming Algorithm: To program the AT89C2051, the following sequence is recommended.

Power-up sequence:

Apply power between V_{CC} and GND pins at RST and XTAL1 to GND

Set pin RST to "H"

Set pin P3.2 to "H"

Apply the appropriate combination of "H" or "L" logic levels to pins P3.3, P3.4, P3.5, P3.7 to select one of the programming operations shown in the PEROM Programming Modes table.

Program and Verify the Array:

Apply data for Code byte at location 000H to P1.0 to P1.7.

Raise RST to 12V to enable programming.

Pulse P3.2 once to program a byte in the PEROM array and the lock bits. The byte-write cycle is self-timed and typically takes 1.2 ms.

To verify the programmed data, lower RST from 12V to logic "H" level and set pins P3.3 to P3.7 to the appropriate levels. Output data can be read at the port P1 pins.

To program a byte at the next address location, pulse XTAL1 pin once to advance the internal address counter. Apply new data to the port P1 pins.

Repeat steps 5 through 8, changing data and advancing the address counter for the entire 2K bytes array or until the end of the object file is reached.

Power-off sequence:

Set XTAL1 to "L"

Set RST to "L"

Turn V_{CC} power off

Polling: The AT89C2051 features Data Polling to detect the end of a write cycle. During a write cycle, an attempted read of the last byte written will result in the content of the written data on P1.7. Once the write cycle has been completed, true data is valid on all outputs, and

the next cycle may begin. Data Polling may begin any time after a write cycle has been initiated.

Ready/Busy: The Progress of byte programming can also be monitored by the RDY/ $\overline{\text{BSY}}$ output signal. Pin P3.1 is pulled low after P3.2 goes High during programming to indicate BUSY. P3.1 is pulled High again when programming is done to indicate READY.

Program Verify: If lock bits LB1 and LB2 have not been programmed code data can be read back via the data lines for verification:

1. Reset the internal address counter to 000H by bringing RST from "L" to "H".
2. Apply the appropriate control signals for Read Code data and read the output data at the port P1 pins.
3. Pulse pin XTAL1 once to advance the internal address counter.
4. Read the next code data byte at the port P1 pins.
5. Repeat steps 3 and 4 until the entire array is read.

The lock bits cannot be verified directly. Verification of the lock bits is achieved by observing that their features are enabled.

Chip Erase: The entire PEROM array (2K bytes) and the two Lock Bits are erased electrically by using the proper combination of control signals and by holding P3.2 low for 10 ms. The code array is written with all "1"s in the Chip Erase operation and must be executed before any non-blank memory byte can be re-programmed.

Reading the Signature Bytes: The signature bytes are read by the same procedure as a normal verification of locations 000H, 001H, and 002H, except that P3.5 and P3.7 must be pulled to a logic low. The values returned are as follows.

- (000H) = 1EH indicates manufactured by Atmel
- (001H) = 21H indicates 89C2051

Programming Interface

Every code byte in the Flash array can be written and the entire array can be erased by using the appropriate combination of control signals. The write operation cycle is self-timed and once initiated, will automatically time itself to completion.

All major programming vendors offer worldwide support for the Atmel microcontroller series. Please contact your local programming vendor for the appropriate software revision.

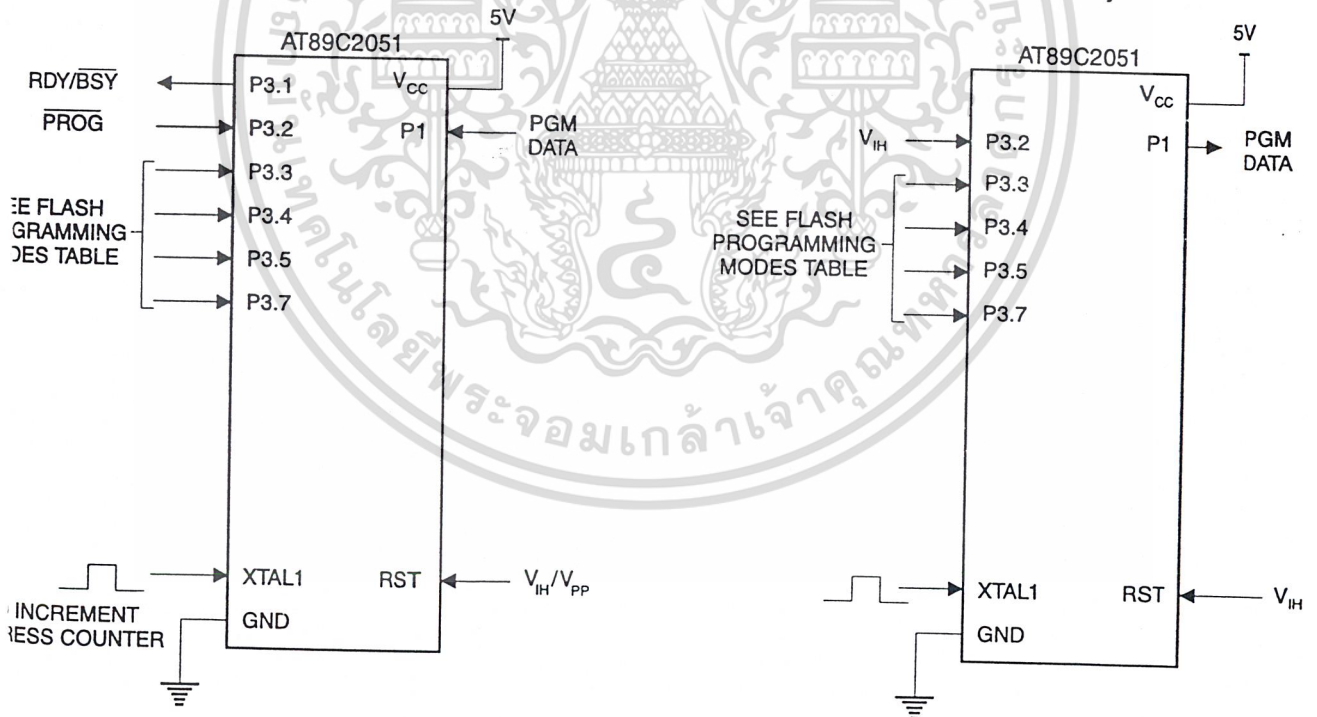
Flash Programming Modes

Mode	RST/VPP	P3.2/PROG	P3.3	P3.4	P3.5	P3.7
Write Code Data ⁽¹⁾⁽³⁾	12V		L	H	H	H
Read Code Data ⁽¹⁾	H	H	L	L	H	H
Lock	Bit - 1		H	H	H	H
	Bit - 2		H	H	L	L
Erase	12V		H	L	L	L
Signature Byte	H	H	L	L	L	L

1. The internal PEROM address counter is reset to 000H on the rising edge of RST and is advanced by a positive pulse at XTAL 1 pin.
2. Chip Erase requires a 10 ms PROG pulse.
3. P3.1 is pulled Low during programming to indicate RDY/BSY.

3. Programming the Flash Memory

Figure 4. Verifying the Flash Memory



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สงวนลิขสิทธิ์ © 1998 โดยบริษัท ไทเมค อิเล็กทรอนิกส์ จำกัด ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





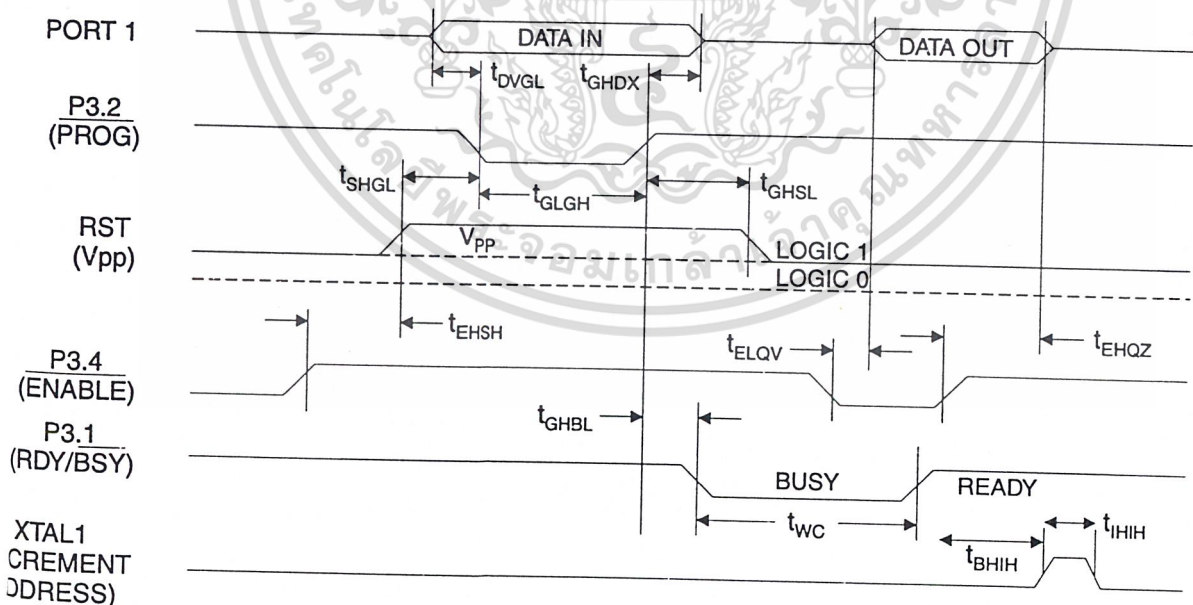
Flash Programming and Verification Characteristics

0°C to 70°C, $V_{CC} = 5.0 \pm 10\%$

Symbol	Parameter	Min	Max	Units
	Programming Enable Voltage	11.5	12.5	V
	Programming Enable Current		250	μ A
	Data Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	1.0		μ s
	Data Hold after $\overline{\text{PROG}}$	1.0		μ s
	P3.4 ($\overline{\text{ENABLE}}$) High to V_{PP}	1.0		μ s
	V_{PP} Setup to $\overline{\text{PROG}}$ Low	10		μ s
	V_{PP} Hold after $\overline{\text{PROG}}$	10		μ s
	$\overline{\text{PROG}}$ Width	1	110	μ s
	$\overline{\text{ENABLE}}$ Low to Data Valid		1.0	μ s
	Data Float after $\overline{\text{ENABLE}}$	0	1.0	μ s
	$\overline{\text{PROG}}$ High to $\overline{\text{BUSY}}$ Low		50	ns
	Byte Write Cycle Time		2.0	ms
	RDY/BSY \downarrow to Increment Clock Delay	1.0		μ s
	Increment Clock High	200		ns

1. Only used in 12-volt programming mode.

Flash Programming and Verification Waveforms



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใด **AT89C2051** ห้า

Absolute Maximum Ratings*

Operating Temperature	-55°C to +125°C
Storage Temperature	-65°C to +150°C
Voltage on Any Pin with respect to Ground	-1.0V to +7.0V
Maximum Operating Voltage	6.6V
Maximum Output Current	25.0 mA

*NOTICE: Stresses beyond those listed under "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress rating only and not a functional operation of the device at these or any other conditions beyond those indicated in the operational sections of this specification is not implied. Exposure to absolute maximum rating conditions for extended periods may affect device reliability.

Characteristics

Temperature: 0°C to 85°C, $V_{CC} = 2.0V$ to $6.0V$ (unless otherwise noted)

Symbol	Parameter	Condition	Min	Max	Units
	Input Low-voltage		-0.5	$0.2 V_{CC} - 0.1$	V
	Input High-voltage	(Except XTAL1, RST)	$0.2 V_{CC} + 0.9$	$V_{CC} + 0.5$	V
	Input High-voltage	(XTAL1, RST)	$0.7 V_{CC}$	$V_{CC} + 0.5$	V
	Output Low-voltage ⁽¹⁾ (Ports 1, 3)	$I_{OL} = 20$ mA, $V_{CC} = 5V$ $I_{OL} = 10$ mA, $V_{CC} = 2.7V$		0.5	V
	Output High-voltage (Ports 1, 3)	$I_{OH} = -80$ μ A, $V_{CC} = 5V \pm 10\%$	2.4		V
		$I_{OH} = -30$ μ A	$0.75 V_{CC}$		V
		$I_{OH} = -12$ μ A	$0.9 V_{CC}$		V
	Logical 0 Input Current (Ports 1, 3)	$V_{IN} = 0.45V$		-50	μ A
	Logical 1 to 0 Transition Current (Ports 1, 3)	$V_{IN} = 2V$, $V_{CC} = 5V \pm 10\%$		-750	μ A
	Input Leakage Current (Port P1.0, P1.1)	$0 < V_{IN} < V_{CC}$		± 10	μ A
	Comparator Input Offset Voltage	$V_{CC} = 5V$		20	mV
	Comparator Input Common Mode Voltage		0	V_{CC}	V
	Reset Pull-down Resistor		50	300	K Ω
	Pin Capacitance	Test Freq. = 1 MHz, $T_A = 25^\circ C$		10	pF
	Power Supply Current	Active Mode, 12 MHz, $V_{CC} = 6V/3V$		15/5.5	mA
		Idle Mode, 12 MHz, $V_{CC} = 6V/3V$ P1.0 & P1.1 = 0V or V_{CC}		5/1	mA
	Power-down Mode ⁽²⁾	$V_{CC} = 6V$ P1.0 & P1.1 = 0V or V_{CC}		100	μ A
		$V_{CC} = 3V$ P1.0 & P1.1 = 0V or V_{CC}		20	μ A

- Under steady state (non-transient) conditions, I_{OL} must be externally limited as follows:
 Maximum I_{OL} per port pin: 20 mA
 Maximum total I_{OL} for all output pins: 80 mA
 If I_{OL} exceeds the test condition, V_{OL} may exceed the related specification. Pins are not guaranteed to sink current greater than the listed test conditions.
- Minimum V_{CC} for Power-down is 2V.

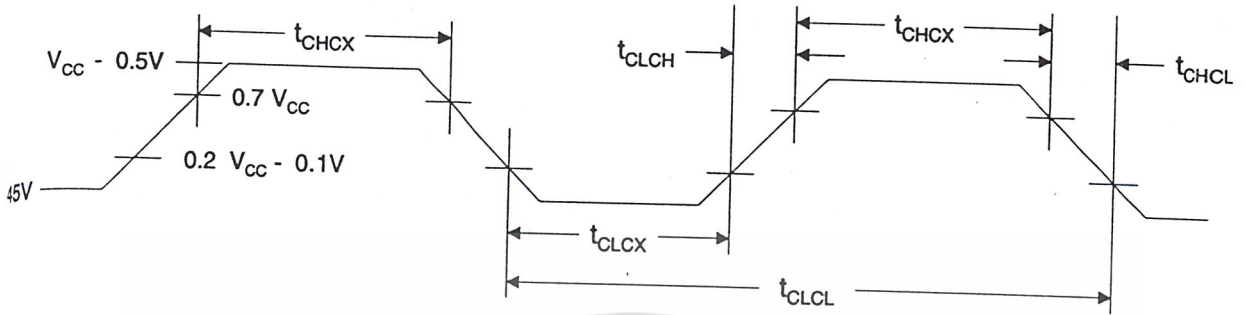
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า



จำเป็นต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Internal Clock Drive Waveforms



Internal Clock Drive

Parameter	$V_{CC} = 2.7V \text{ to } 6.0V$		$V_{CC} = 4.0V \text{ to } 6.0V$		Units
	Min	Max	Min	Max	
Oscillator Frequency	0	12	0	24	MHz
Clock Period	83.3		41.6		ns
High Time	30		15		ns
Low Time	30		15		ns
Rise Time		20		20	ns
Fall Time		20		20	ns

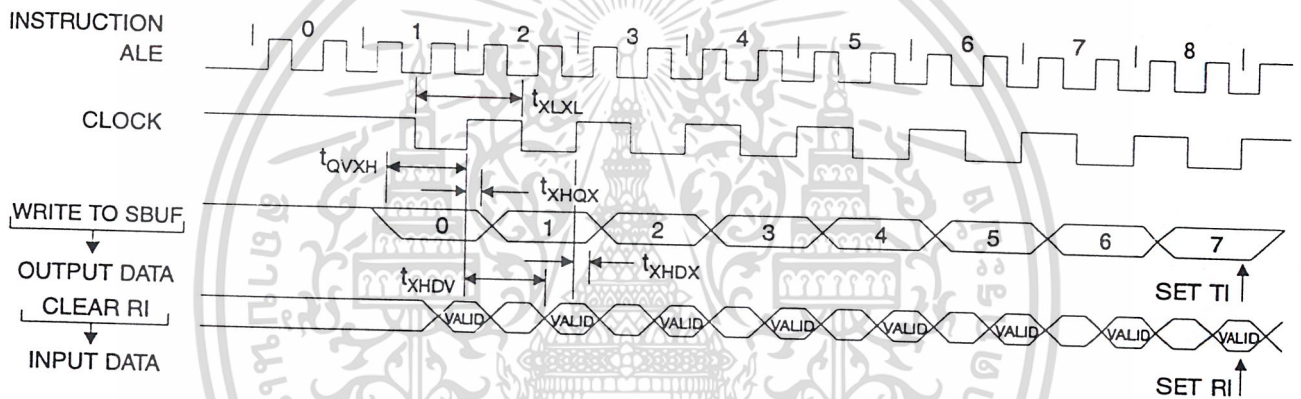
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใด **AT89C2051** ให้

Serial Port Timing: Shift Register Mode Test Conditions

$V_{CC} = 5.0V \pm 20\%$; Load Capacitance = 80 pF

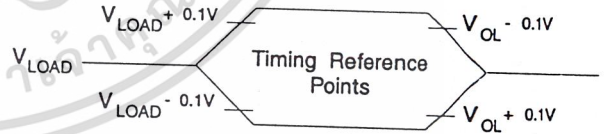
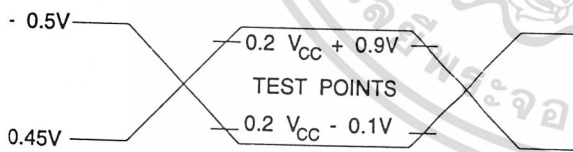
Symbol	Parameter	12 MHz Osc		Variable Oscillator		Units
		Min	Max	Min	Max	
t_{CL}	Serial Port Clock Cycle Time	1.0		$12t_{CLCL}$		μs
t_{QVXH}	Output Data Setup to Clock Rising Edge	700		$10t_{CLCL}-133$		ns
t_{QX}	Output Data Hold after Clock Rising Edge	50		$2t_{CLCL}-117$		ns
t_{DX}	Input Data Hold after Clock Rising Edge	0		0		ns
t_{DV}	Clock Rising Edge to Input Data Valid		700		$10t_{CLCL}-133$	ns

Shift Register Mode Timing Waveforms



Testing Input/Output Waveforms⁽¹⁾

Float Waveforms⁽¹⁾



1. AC Inputs during testing are driven at $V_{CC} - 0.5V$ for a logic 1 and 0.45V for a logic 0. Timing measurements are made at V_{IH} min. for a logic 1 and V_{IL} max. for a logic 0.

Note: 1. For timing purposes, a port pin is no longer floating when a 100 mV change from load voltage occurs. A port pin begins to float when 100 mV change from the loaded V_{OH}/V_{OL} level occurs.



เอกสารอ้างอิง

- 1) Dereniak, E.L. and Boreman, G.D., "Infrared detectors and systems", New York : John Wiley, c1996, p.561 ISBN 0-471-12209-2
- 2) Sze, S.M., "Physics of Semiconductor Device" 2nd editor, New York : John Wiley, c1981, p.868 ISBN 0-471-09837-X.
- 3) Singh, Jasprit, "Semiconductor Device : an Introduction" ,New York : McGraw-Hill, c1994, p.868 ISBN 0-471-09837-X
- 4) Stupelman, V. and Filaretov G. ; translated from the Russian by Ivanov P., "semiconductor device", Moscow : Mir, c1981, p.270
- 5) นางเพ็ญศรี ทองนพคุณ, "ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับทฤษฎีการใช้สี", ส่วนอุตสาหกรรมสิ่งทอ สำนักพัฒนาอุตสาหกรรมรายสาขา กรมส่งเสริมอุตสาหกรรม พิมพ์ครั้งที่ 2 c1999

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้