

อิทธิพลของอุณหภูมิต่อช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสง

EFFECT OF TEMPERATURE ON ENERGY GAP
OF LIGHT EMITTING DIODES



เบญจวรรณ อุ่นผูก
BENJAWAN UNPOOK

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์
ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ. 2566
KMITL-2023-SC-M-030-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF TEMPERATURE ON ENERGY GAP
OF LIGHT EMITTING DIODES



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENT FOR THE
DEGREE OF MASTER OF SCIENCE IN APPLIED PHYSICS
DEPARTMENT OF PHYSICS SCHOOL OF SCIENCE
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023

KMITL-2023-SC-M-030-045

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	อิทธิพลของอุณหภูมิต่อช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสง
ชื่อนักศึกษา	เบญจวรรณ อุ่นผูก
รหัสประจำตัว	62605100
ปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รองศาสตราจารย์.ดร.ภัทริยา ดำรงค์ศักดิ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ศาสตราจารย์.ดร.พิเชษฐ ลีมสุวรรณ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการทดลองสำหรับศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสเปกตรัมการเปล่งแสงหลอดแอลอีดี เพื่อศึกษาความเที่ยงตรงของชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้น และศึกษาผลของอุณหภูมิและกระแสไบอัสที่มีต่อเฉดสี (X-Y Chromaticity) โดยในการทดลองจะใช้หลอดแอลอีดีสีน้ำเงินขนาด 1 วัตต์เป็นตัวอย่าง ใช้ชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 120 วัตต์ ในการให้ความร้อนกับแหล่งกำเนิดแสง ใช้สเปกโตรมิเตอร์ในการวัดสเปกตรัมของแอลอีดี ผลการวิจัยพบว่าระบบที่จัดเตรียมสามารถทำความร้อนให้กับสิ่งประดิษฐ์ได้ และเมื่ออุณหภูมิของหลอดแอลอีดีเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส หลอดแอลอีดีจะมีสเปกตรัมการเปล่งแสงลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎี

คำสำคัญ: ช่องว่างแถบพลังงาน ความยาวคลื่น ไดโอดเปล่งแสง อิทธิพลของอุณหภูมิต่อไดโอดเปล่งแสง

Thesis Title	Effect of Temperature on Energy Gap of Light Emitting Diodes
Student Name	Benjawan Unpook
Student ID	62605100
Degree	Master of Science (Applied Physics)
Department	Science
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Pattareeya Damrongsak
Thesis Co-advisor	Prof. Dr. Pichet Limsuwan

Abstract

The purpose of this research was to develop an experimental system to study the influence of heat on the emission spectrum of LED and to study the precision of the developed system and to study the effect of temperature and current on X-Y chromaticity of LED. In this study, a blue LED chip (1 Watt) was used as a sample. A 120 Watt thermoelectric (TE) module was used as a heater for the light source. A spectrometer was used to measure the emission spectrum of the LED. The results of the study showed that as the temperature increases from 0 to 70 °C, the emission spectrum of LED tends to decrease and agree with the theory.

Keywords: energy gap, wavelength, LED, effect of temperature on LED

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สามารถสำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์ได้เนื่องจากการสนับสนุนและคำแนะนำจากรองศาสตราจารย์ ดร.ภทรียา ดำรงค์ศักดิ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์และ ศาสตราจารย์ ดร.พิเชษฐ ลี้มสุวรรณ อาจารย์ผู้ทรงคุณวุฒิและเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ซึ่งเป็นผู้ให้คำแนะนำ คำปรึกษาและแก้ไขปัญหาการออกแบบระบบการทดลองและเป็นผู้ให้ประสบการณ์และทักษะในการคิดวิเคราะห์แก้ไขปัญหาต่างๆ

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านและเจ้าหน้าที่ของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ที่ให้ช่วยเหลือในด้านเครื่องมือและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้สำหรับการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

เบญจวรรณ อุ้นผูก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Acknowledgements

This research was able to be completed successfully due to the support and advice from Assoc. Prof. Dr. Pattareeya Damrongsak, advisor and Prof. Dr. Pichet Limsuwan, co- advisor. who gives advice, solves experiment system design problems, and provides experience and skills in analytical thinking and problem-solving.

Thank you to all professors and staff of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Faculty of Science Department of Applied Physics to assist in the various tools and equipment used for research.

Miss Benjawan Unpook



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ.....	ก
Abstract.....	ข
กิตติกรรมประกาศ.....	ค
สารบัญ.....	จ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ซ
คำย่อ/สัญลักษณ์.....	ญ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	1
1.3 ขอบเขตและระยะเวลาการวิจัย.....	1
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ไดโอดเปล่งแสง.....	3
2.1.1 กลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสง.....	3
2.1.2 ประเภทของไดโอดเปล่งแสง.....	4
2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อไดโอดเปล่งแสง.....	5
2.3 เทอร์โมอิเล็กทริก.....	6
2.4 สเปกโทรสโกปี.....	9
2.5 ระบบการวัดสี.....	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	16
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 ไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
3.2 การออกแบบระบบการวัดคุณสมบัติไดโอดเปล่งแสง.....	21
3.3 การวัดสเปกตรัมเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน.....	24

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

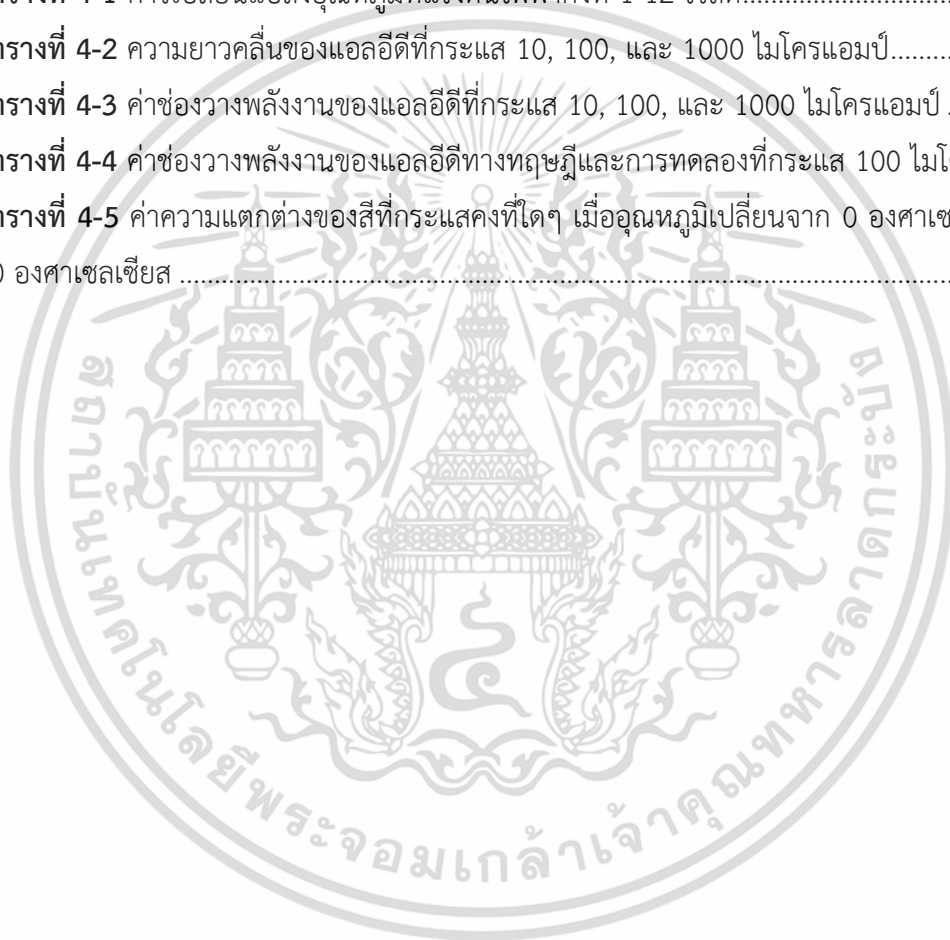
3.4 การวิเคราะห์ค่าสี X-Y chromatic.....	25
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล.....	28
4.1 ผลการออกแบบระบบวัดคุณสมบัติของไดโอดเปล่งแสง.....	28
4.2 ผลการวัดสเปกตรัมของแอลอีดีที่อุณหภูมิต่างๆ.....	31
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสี X Y Chromatic ของแอลอีดีที่อุณหภูมิต่างๆ.....	36
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	41
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	41
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	42
เอกสารอ้างอิง.....	43
ภาคผนวก.....	46
ภาคผนวก ก.....	47
ภาคผนวก ข.....	59
ภาคผนวก ค.....	64



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
ตารางที่ 2-1 แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้	10
ตารางที่ 2-2 งานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงไดโอดเปล่งแสง.....	18
ตารางที่ 3-1 ค่า X, Y, Z ของไดโอดเปล่งแสงที่กระแส 10 ไมโครแอมป์ จากการคำนวณ	26
ตารางที่ 3-2 ค่า x', y' ที่กระแส 10 ไมโครแอมป์ ที่ได้จากการคำนวณ.....	27
ตารางที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 1-12 โวลต์.....	29
ตารางที่ 4-2 ความยาวคลื่นของแอลอีดีที่กระแส 10, 100, และ 1000 ไมโครแอมป์.....	34
ตารางที่ 4-3 ค่าช่องว่างพลังงานของแอลอีดีที่กระแส 10, 100, และ 1000 ไมโครแอมป์	34
ตารางที่ 4-4 ค่าช่องว่างพลังงานของแอลอีดีทางทฤษฎีและการทดลองที่กระแส 100 ไมโครแอมป์	36
ตารางที่ 4-5 ค่าความแตกต่างของสีที่กระแสคงที่ใดๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก 0 องศาเซลเซียส เป็น 70 องศาเซลเซียส	40



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
รูปที่ 2.1 แผนภาพแถบพลังงานระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด p กับชนิด n ที่มี E_g เท่ากัน (ก) กรณีที่ยังไม่ จ่ายไฟให้ กับ (ข) กรณีที่จ่ายไฟแบบตรง	4
รูปที่ 2.2 ไดโอดเปล่งแสงชนิดแลมป์	5
รูปที่ 2.3 ไดโอดเปล่งแสงชนิด surface mount.....	5
รูปที่ 2.4 การทดลองของ Thomas seebeck.....	6
รูปที่ 2.5 ปრაกฏการณ์เพลเทียร์.....	7
รูปที่ 2.6 เครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์.....	8
รูปที่ 2.7 โหมดการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก (ก) โหมดทำความร้อน (ข) โหมดทำความเย็น	9
รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์	11
รูปที่ 2.9 ระบบ Munsell	12
รูปที่ 2.10 CIE 1931 chromaticity diagram.....	13
รูปที่ 2.11 CIE LAB 1976 color space	14
รูปที่ 3.1 แผนผังการวัดทดลองสำหรับวัดสเปกตรัมแสง	20
รูปที่ 3.2 ไดโอดเปล่งแสงแบบ SMT	21
รูปที่ 3.3 เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์	21
รูปที่ 3.4 การติดตั้งระบบวัดค่าช่องว่างพลังงานโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปี	23
รูปที่ 3.5 สเปกตรัมแสงของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินที่กระแสไบอัส 100 ไมโครแอมป์	25
รูปที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดสเปกตรัมแสงไดโอดเปล่งแสง.....	25
รูปที่ 3.7 CIE chromaticity coordinate ของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน	27
รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่แรงดันไฟฟ้า 1,5, และ 12 โวลต์.....	28
รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัส.....	31
รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแอลอีดีสีน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ที่กระแสไบอัส 10 ไมโคร แอมป์.....	32
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของแอลอีดีสีน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ที่กระแสไบอัส 100 ไม โครแอมป์	32
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของแอลอีดีสีน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ที่กระแสไบอัส 1000 ไม โครแอมป์	33
รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานและอุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงที่กระแส 10, 100 และ 1000 ไมโครแอมป์	35

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.7 CIE Chromaticity ของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 10 ไมโครแอมป์ 37

รูปที่ 4.8 CIE Chromaticity ของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 100 ไมโครแอมป์ 37

รูปที่ 4.9 CIE Chromaticity ของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 1000 ไมโครแอมป์ 38

รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง x' และ y' ที่กระแสไบอัสคงที่ 1000 ไมโครแอมป์ 39

รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง X' และ y' ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส 39



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คำย่อ/สัญลักษณ์

คำย่อ/สัญลักษณ์	คำอธิบาย
LEDs	Light Emitting Diode
TEC	Thermoelectric Cooler
TEM	Thermoelectric Module
CIE	Commission International de l' Eclairage
Eg	Energy gap



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีการผลิตหลอด LED (Light Emitting Diode) ได้ถูกพัฒนาอย่างมาก ทำให้แหล่งกำเนิดแสงชนิดนี้สามารถให้ความสว่างสูงและถูกนำมาใช้ในระบบส่องสว่างและใช้งานในอุปกรณ์และเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์เพิ่มขึ้น เช่น จอแสดงผล รีโมททีวี เครื่องเสียง เครื่องเล่น ดีวีดี วีซีดี ระบบไฟวิ่ง ไฟจราจร เป็นต้น [1-3] หลอด LED ที่มีจุดเด่นคือกินไฟน้อย มีอายุการใช้งานยาวนาน และทนทาน อีกทั้งสามารถนำมาออกแบบให้มีขนาดรูปร่างแบบต่างๆให้เหมาะสมต่อการใช้งาน จึงส่งผลให้แหล่งกำเนิดนี้ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้น

เป็นที่ทราบกันดีว่าหลอด LED นั้นจัดเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ผลิตขึ้นจากสารกึ่งตัวนำ และในการใช้งานนั้นจำเป็นที่จะต้องควบคุมอุณหภูมิของหลอดให้คงที่ ซึ่งโดยทั่วไปสมบัติของหลอด LED ที่ผู้ผลิตกำหนดไว้ในเอกสารจะให้ข้อมูลการใช้งานที่อุณหภูมิ 25 °C [4] อย่างไรก็ตามในการใช้งานจริงอุณหภูมิของหลอดอาจมีค่าแตกต่างไปจากค่าที่กำหนด ทั้งนี้ขึ้นกับสภาพแวดล้อม ดังนั้นจึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการส่องสว่างของหลอดมีค่าเปลี่ยนแปลงไป

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าผลการวิจัยส่วนใหญ่จะนำเสนอผลของอุณหภูมิที่มีต่อสเปกตรัมและค่าความเข้มแสงของไดโอดเปล่งแสง [5-8] แต่งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับผลของอุณหภูมิและกระแสไบอัสที่มีต่อเฉดสีของสิ่งประดิษฐ์ยังไม่ได้ถูกนำเสนอ งานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายที่จะศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิและกระแสไบอัสที่มีต่อการเปล่งแสงและเฉดสีของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน ชนิดให้ความสว่างสูงที่มีจำหน่ายในท้องตลาด โดยจะทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 0-70 °C และย่านกระแสไบอัส 10 μ A -1000 μ A

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ออกแบบระบบวัดที่สามารถปรับอุณหภูมิให้กับไดโอดเปล่งแสง
2. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสง
3. ศึกษาผลของอุณหภูมิและกระแสไบอัสที่มีต่อความเข้มและเฉดสีของไดโอดเปล่งแสง

1.3 ขอบเขตและระยะเวลาการวิจัย

1. ศึกษาทฤษฎีของไดโอดเปล่งแสงและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย
2. ออกแบบระบบวัดที่สามารถปรับอุณหภูมิให้กับไดโอดเปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความเข้มแสง และเฉดสีของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน
4. ศึกษาอิทธิพลของกระแสไบอัสที่มีต่อค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความเข้มแสง และเฉดสีของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน
5. วิเคราะห์ผลของอุณหภูมิที่มีต่อไดโอดเปล่งแสง
6. วิเคราะห์หาความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ของตัวแปรต่างๆ
7. สรุปผลและจัดทำเล่มรายงาน

ขั้นตอนที่	ปีการศึกษา 2/2562							ปีการศึกษา 1/2563				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
1												
2												
3												
ขั้นตอนที่	ปีการศึกษา 2/2563							ปีการศึกษา 1/2564				
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
4												
5												
6												
7												

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ได้ระบบวัดที่สามารถใช้ในการศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าช่องว่างแถบพลังงาน ความเข้มแสง และเฉดสีของไดโอดเปล่งแสง
2. ได้ความสัมพันธ์ทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ทำนายผลของอุณหภูมิและกระแสไบอัสที่มีต่อเฉดสีของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไดโอดเปล่งแสง [1]

ไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอย่างหนึ่ง จัดอยู่ในประเภทไดโอดที่สามารถเปล่งแสง ในย่านสเปกตรัมแคบเมื่อถูกไบอัสกระแสแบบตรง (Forward bias) โดยการเปล่งแสงนี้จะอาศัย ปรากฏการณ์ที่เรียกว่า electroluminescence ซึ่งจะเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสง สีของ แสงที่เปล่งออกมานั้นขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ใช้ เมื่อ ค.ศ. 1962 นิก โฮโลยัค (Nick Holonyak Jr) ได้พัฒนาไดโอดเปล่งแสงขึ้นมาเป็นคนแรกโดยได้พัฒนาไดโอดเปล่งแสง ในช่วงแสงที่มองเห็นและสามารถใช้งานได้เชิงปฏิบัติเป็นครั้งแรกที่สามารถเปล่งแสงสีแดงที่มีความ สว่างออกมามากเพียงพอที่จะนำมาใช้ประโยชน์ได้ทำให้ทั่วโลกเริ่มมีการตื่นตัววิจัยและพัฒนาในด้าน นี้มากยิ่งขึ้น จนกระทั่งในปี 1990 Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, และ Shuji Nakamura [9] ได้ ประดิษฐ์ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินขึ้นได้เป็นครั้งแรกของโลกซึ่งแสงที่เปล่งออกมานั้นจะครอบคลุม ตั้งแต่ช่วงรังสีอินฟราเรดไปจนถึงไวโอเล็ต โดยงานวิจัยนี้มีความสำคัญต่อวงการฟิสิกส์อย่างมากจึงทำ ให้ได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ ในปี 2014 เนื่องจากความสำเร็จนี้ได้นำไปสู่การประดิษฐ์ ไดโอดเปล่งแสงสีขาวที่ประหยัดพลังงาน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและมีอายุการใช้งานที่ยาวนานมาก ยิ่งขึ้น

2.1.1 กลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสง [2]

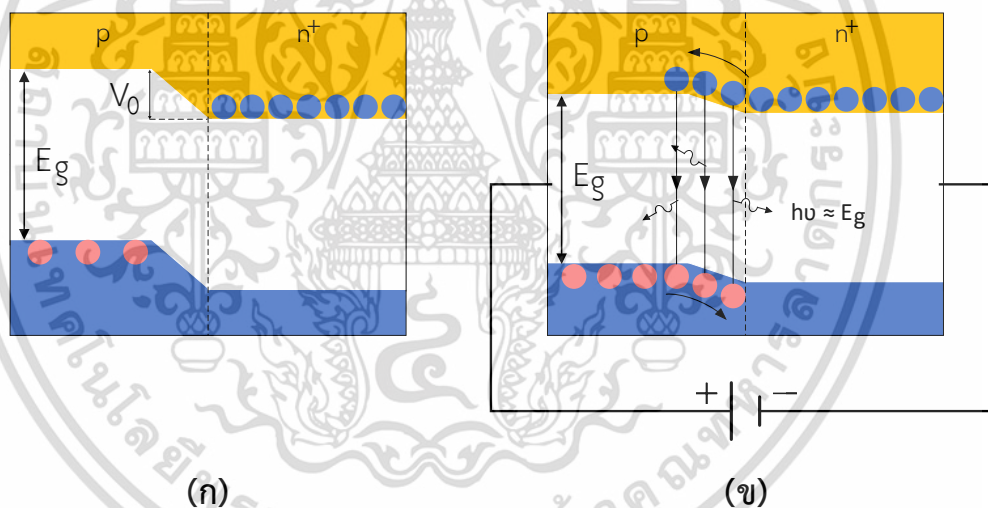
กลไกการทำงานของไดโอดเปล่งแสงอธิบายได้ด้วยทฤษฎีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน มีชื่อ เรียกว่า Band Theory of Solids คือไดโอดเปล่งแสงสร้างจากสารกึ่งตัวนำชนิดพิเศษที่ถูกนำมาใช้ใน การควบคุมทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าผ่านทางรอยต่อระหว่างสารกึ่งตัวนำสองชนิด ได้แก่ ชนิด p และ n โดยเรียกรอยต่อนี้ว่า p-n junction ซึ่งเป็นเขตปลอดประจุไฟฟ้าที่เป็นพาหะของ กระแสไฟฟ้า มีชื่อเป็นทางการว่า depletion region เขตปลอดประจุนี้นับว่ามีอิเล็กตรอนในแถบ conduction (CB) จากด้าน n ไม่สามารถแพร่เข้ามาเข้าไปอยู่ในแถบ conduction ของด้าน p ได้ เพราะไม่สามารถข้ามกำแพงความต่างศักย์ที่สูง V_0 ดังแสดงในรูปที่ 2.1(ก) ซึ่งเป็นแผนภาพ แถบพลังงานบริเวณ p-n junction ของไดโอดที่ยังไม่ได้จ่ายไฟให้ และเมื่อมีการจ่ายไฟให้แบบตรง (forward biased) ค่าความต่างศักย์ V จะลดลง แสดงดังรูปที่ 2.1(ข) ซึ่งต่ำพอที่จะทำให้อิเล็กตรอน จะสามารถข้ามไปอยู่ในด้าน p ได้ แต่เนื่องจากสารกึ่งตัวนำชนิด n ถูกโด๊ปเข้มข้นกว่าการโด๊ปของสาร กึ่งตัวนำชนิด p (แทนด้วยสัญลักษณ์ n^+ ในรูป) อิเล็กตรอนจึงแพร่เข้าไปอยู่ด้าน p มากกว่าที่พวก hole ในแถบ valence หรือ VB จะแพร่เข้าไปอยู่ในแถบ valence ของด้าน n เมื่อมีคู่ hole อยู่ฝั่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรงข้ามของด้านเดียวกัน อิเล็กตรอนจึงสามารถกระโดดลงไปจับคู่ (recombination) แต่เป็นการลดระดับพลังงานของตัวเองเท่ากับ energy gap (E_g) ระหว่างแถบ conduction กับแถบ valence ของสารกึ่งตัวนำชนิดนั้นๆ ส่งผลทำให้อิเล็กตรอนต้องปลดปล่อยพลังงานส่วนเกินออกไปตามกฎการคงตัวของพลังงาน (Law of Conservation of Energy) โดยในกรณีนี้ปลดปล่อยออกไปในรูปของแสงปรากฏการณ์นี้เองที่เรียกว่า Electroluminescence ความยาวคลื่นของแสง (λ) ที่ถูกปล่อยออกมาตามกลไกในรูปที่ 2.1 (ข) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (1)$$

เมื่อ h คือค่าคงที่ของพลังค์
และ c คือความเร็วแสงในสุญญากาศ



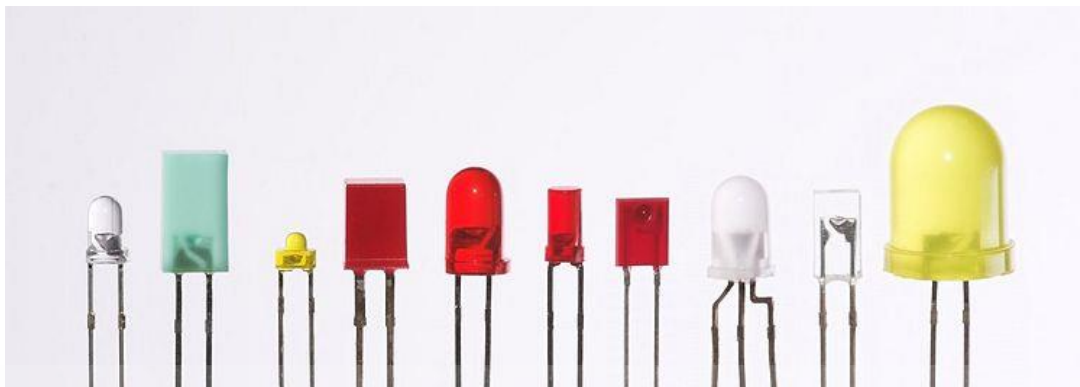
รูปที่ 2.1 แผนภาพแถบพลังงานระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิด p กับชนิด n ที่มี E_g เท่ากัน (ก) กรณีที่ยังไม่จ่ายไฟให้ กับ (ข) กรณีที่จ่ายไฟแบบตรง

2.1.2 ประเภทของไดโอดเปล่งแสง [3,10]

ไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ในปัจจุบันแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

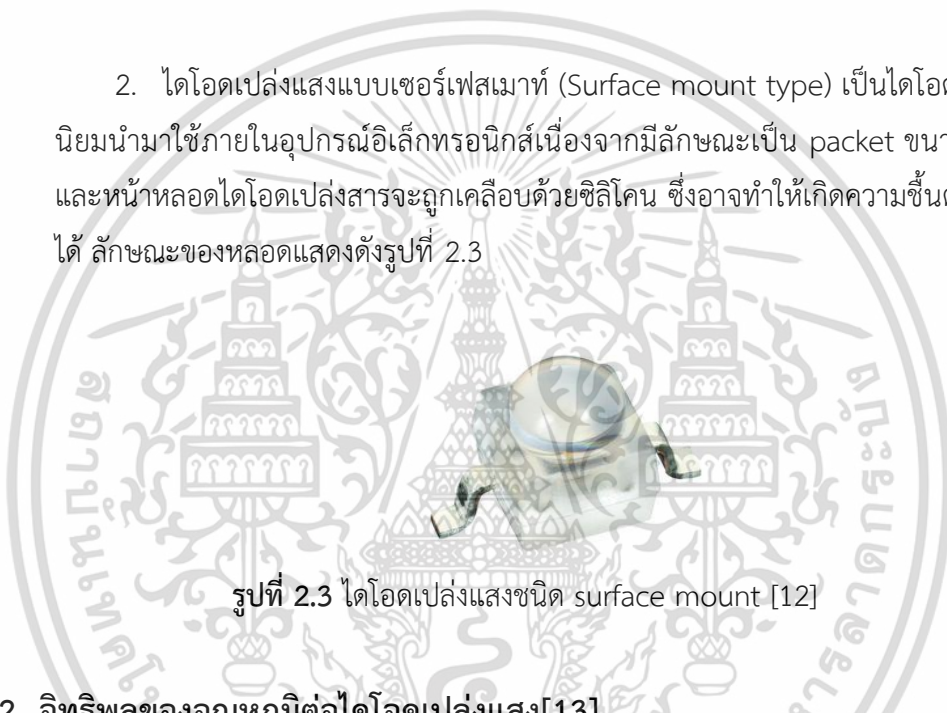
1. ไดโอดเปล่งแสงแบบแลมป์ (Lamp type) เป็นไดโอดเปล่งแสงที่มักพบเห็นได้ตามท้องตลาดทั่วไปโดยมีลักษณะเป็นหลอดที่มีขาสองข้างหรือมากกว่ายื่นออกมาจากตัว epoxy มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 3 มิลลิเมตรขึ้นไป แสดงดังรูปที่ 2.2 ไดโอดเปล่งแสงชนิดนี้นิยมนำมาใช้เป็นไฟบอกสัญญาณจราจร ป้ายLED และป้ายอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ไดโอดเปล่งแสงชนิดแลมป์[11]

2. ไดโอดเปล่งแสงแบบเซอร์เฟซเมาท์ (Surface mount type) เป็นไดโอดเปล่งแสงที่นิยมนำมาใช้ภายในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เนื่องจากมีลักษณะเป็น packet ขนาดที่เล็กบางและหน้าหลอดไดโอดเปล่งสารจะถูกล้อมด้วยซิลิโคน ซึ่งอาจทำให้เกิดความชื้นต่อตัวหลอดได้ ลักษณะของหลอดแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ไดโอดเปล่งแสงชนิด surface mount [12]

2.2 อิทธิพลของอุณหภูมิต่อไดโอดเปล่งแสง[13]

การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมีผลต่อไดโอดเปล่งแสงไม่ว่าจะเป็นค่าความยาวคลื่นของไดโอดเปล่งแสงหรือค่าช่องว่างแถบพลังงาน ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยพบว่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมินั้นส่งผลทำให้ค่าสเปกตรัมแสงเปลี่ยนแปลงไปด้วย สาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดการลดลงของค่าช่องว่างแถบพลังงานส่งผลทำให้เกิดการเลื่อนของสเปกตรัมแสงไปยังย่านความยาวคลื่นที่สูงขึ้น ซึ่งสามารถอธิบายได้จามสมการของ Varshni [14]

$$E_g(T) = E_g(0) - \frac{\alpha T^2}{(T+\beta)} \quad (2)$$

เมื่อ	$E_g(T)$	คือช่องว่างพลังงาน ณ อุณหภูมิใดๆ
	$E_g(0)$	คือช่องว่างพลังงาน ณ อุณหภูมิ 0°K
	T	คืออุณหภูมิของสารกึ่งตัวนำ

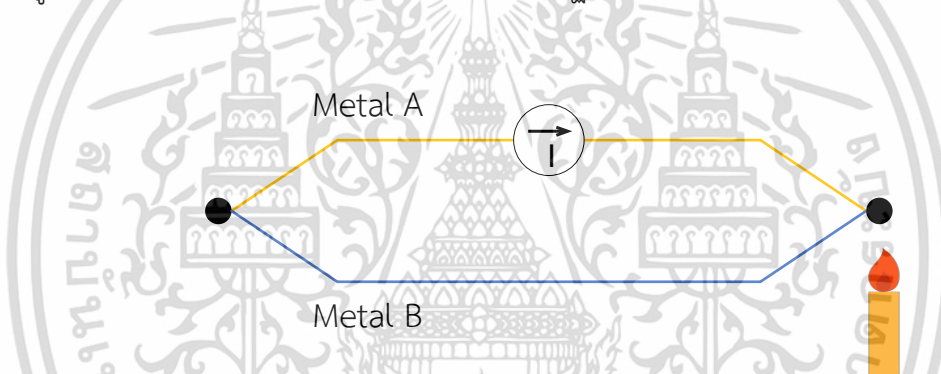
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	α	คือค่าคงที่ของสารกึ่งตัวนำ (InGaN)
และ	β	คือค่าคงที่ของสารกึ่งตัวนำ (InGaN)

2.3 เทอร์โมอิเล็กทริก [15-16]

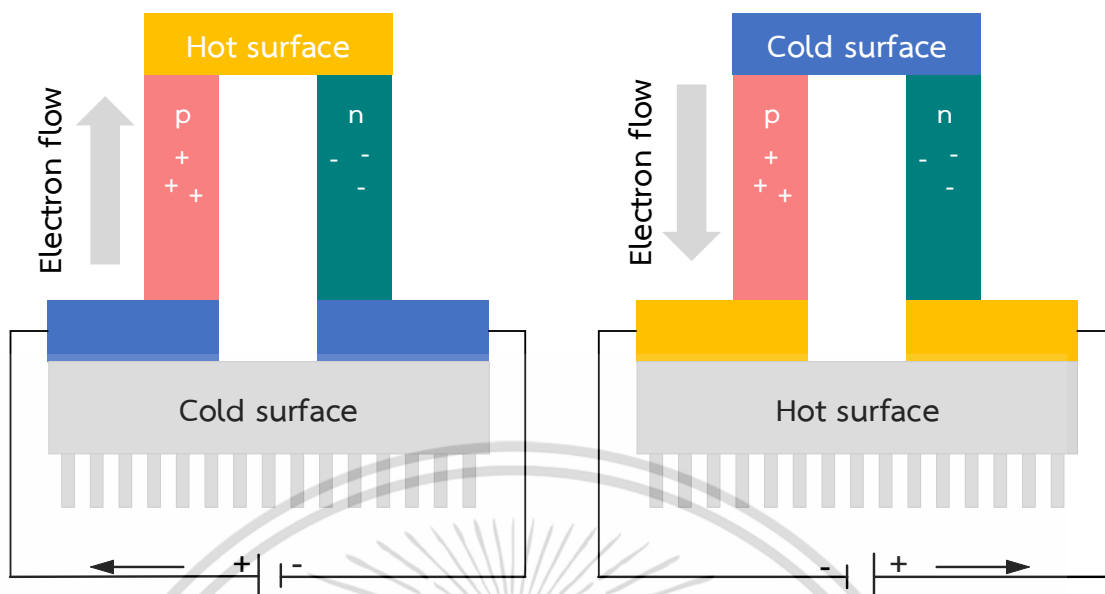
เทอร์โมอิเล็กทริกเป็นปรากฏการณ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานความร้อนเป็นพลังงานไฟฟ้า หรือในทางกลับกันสามารถเปลี่ยนไฟฟ้าเป็นพลังงานความร้อนได้ โดยอาศัยปรากฏการณ์ที่สำคัญ 2 ปรากฏการณ์คือ ปรากฏการณ์ซีเบค (Seebeck effect) และปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect)

โดยในปี ค.ศ. 1821 Thomas Johann Seebeck ได้ค้นพบว่าถ้าให้ความร้อนที่รอยต่อของ โลหะ 2 ชนิด จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าระหว่างปลายโลหะทั้งสอง ดังรูปที่ 2.4 เนื่องจากกลุ่ม อิเล็กตรอนในโลหะด้านร้อนจะมีพลังงานจลน์สูงกว่าโลหะด้านเย็นและเคลื่อนที่เร็วกว่า จึงทำให้เกิด ความแตกต่างปริมาณของอิเล็กตรอนที่ปลายโลหะดังกล่าว Seebeck ได้สรุปว่าความแตกต่างของ อุณหภูมิมีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าในโลหะ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า Seebeck effect



รูปที่ 2.4 การทดลองของ Thomas seebeck

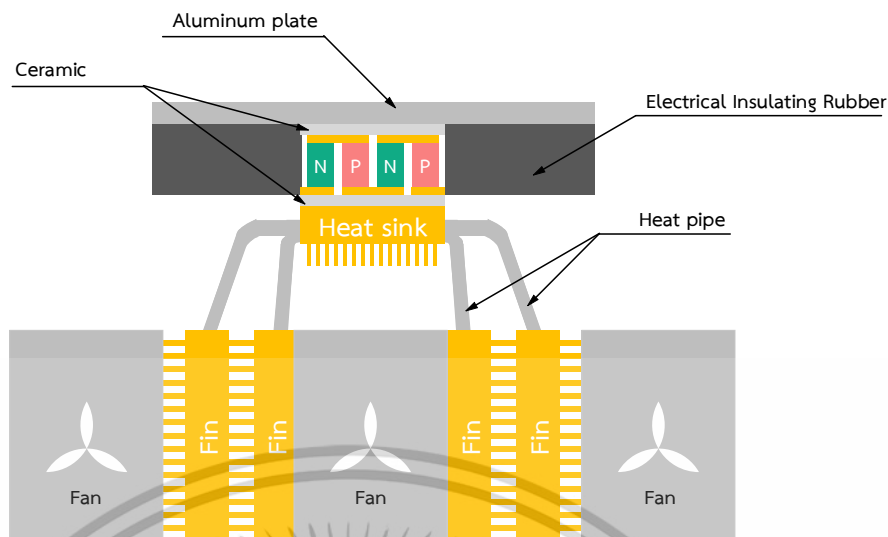
ต่อมาในปี ค .ศ. 1834 Jean Peltier ได้ทดลองจ่ายกระแสไฟฟ้าเข้าไปในโลหะทองแดงและ บิสมัทที่เชื่อมต่อกันเช่นเดียวกันกับการทดลองของซีเบค ผลที่ได้คือที่บริเวณรอยต่อระหว่างทองแดง กับบิสมัท ด้านหนึ่งจะร้อนขึ้นและอีกด้านหนึ่งจะเย็นลง ซึ่งเกิดจากคุณสมบัติของโลหะแต่ละชนิด กลุ่มอิเล็กตรอนเคลื่อนผ่านโลหะด้านหนึ่งจะปลดปล่อยความร้อน (Heat evolved) แต่อีกด้านหนึ่ง จะดูดกลืนความร้อน (Heat absorbed) ทำให้เกิดความแตกต่างอุณหภูมิ ดังรูปที่ 2.5 เรียก ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้ว่า Peltier effect.



รูปที่ 2.5 ปรากฏการณ์เพลเทียร์

2.3.1 หลักการทำงานของเทอร์โมอิเล็กทริก[16,17]

กระบวนการทำงานของเครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์จะอาศัยวัสดุที่เรียกว่า เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล (TEM) หรือเรียกอีกอย่างว่า แผ่นเพลเทียร์ ซึ่งเป็นวัสดุที่อยู่ในสถานะของแข็ง (Solid-State) โดยแผ่นเพลเทียร์จะมีโครงสร้างที่ประกอบไปด้วยวัสดุเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelement) ชนิด n และชนิด p จำนวนมาก ซึ่งเรียงต่อกันทางไฟฟ้าแบบอนุกรมและจะถูกเคลือบด้วยแผ่นเซรามิก (Ceramic) ที่ด้านบนและด้านล่าง ทำให้เกิดความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างแผ่นเซรามิกทั้งสองด้าน โดยแผ่นเซรามิกจะทำหน้าที่เป็นตัวกั้นระหว่างสารกึ่งตัวนำและตัวระบายความร้อนหรือเรียกอีกอย่างว่า Heatsink เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะถูกปิดผนึกด้วยแผ่นยางฉนวนไฟฟ้า (Electrical Insulating Rubber) และด้านบนจะถูกยึดติดกับแผ่นอลูมิเนียมซึ่งทำหน้าที่เป็นแผ่นให้ความร้อนและความเย็นกับไดโอดเปล่งแสง ในการระบายความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลจะถูกระบายความร้อนด้วย heat sink ผ่านท่อทองแดง (heat pipe) ครีบ (fin) และพัดลมระบายความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เครื่องเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

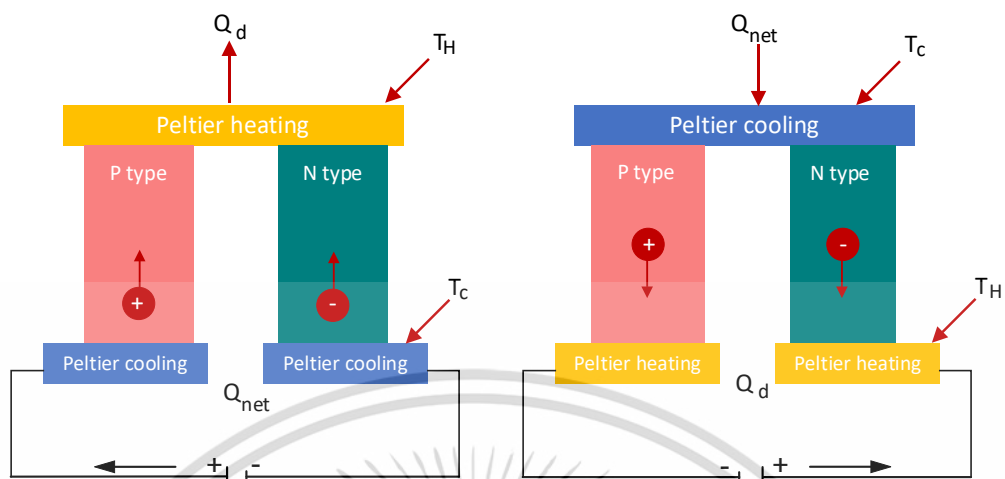
เทอร์โมอิเล็กทริกจะมีโหมดการทำงานแบ่งออกเป็น 2 โหมด คือ โหมดผลิตไฟฟ้าและโหมดผลิตความเย็น โดยมีหลักการดังนี้

1. โหมดผลิตไฟฟ้า Generator Mode

โหมดการผลิตไฟฟ้าของเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์จะอาศัยความต่างของอุณหภูมิระหว่างด้านร้อนและด้านเย็นทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า เนื่องจากด้านร้อนของฝั่ง n-type มีประจุพาหะข้างมากเป็นอิเล็กตรอนและฝั่ง p-type ที่มีประจุข้างมากเป็นโฮล เมื่อได้รับความร้อนจะส่งผลทำให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่จากด้านร้อนไปด้านเย็น เมื่อนำเทอร์โมอิเล็กทริกเจเนอเรเตอร์ไปต่อกับโหลดด้านนอกจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.7

2. โหมดผลิตความเย็น Refrigerator Mode

โหมดการผลิตความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกรีฟริจเรเตอร์จะอาศัยการจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับวัสดุเทอร์โมอิเล็กเมนต์ที่ประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำ p-type และ n-type เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะส่งผลทำให้ประจุข้างมากของสารกึ่งตัวนำทั้งสองชนิดเคลื่อนที่โดย โฮลจากฝั่ง p-type จะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับกระแสไฟฟ้า ส่วนอิเล็กตรอนจากฝั่ง n-type จะเคลื่อนที่สวนทางกับกระแสไฟฟ้า ทำให้เกิดผลต่างของอุณหภูมิที่บริเวณพื้นผิวของแผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกทั้งสองด้าน และเมื่อสลับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า จะทำให้แผ่นเทอร์โมอิเล็กทริกสลับการทำงานด้วยคือจากด้านร้อนจะเปลี่ยนเป็นด้านเย็นและด้านเย็นจะเปลี่ยนเป็นด้านร้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โหมดการทำงานเทอร์โมอิเล็กทริก (ก) โหมดทำความร้อน (ข) โหมดทำความเย็น

อัตราการเกิดความร้อนที่รอยต่อของวัสดุ จะมีความสัมพันธ์ดังสมการ

$$\frac{dQ}{dt} = (\Pi_A - \Pi_B)I \quad (3)$$

เมื่อ $\frac{dQ}{dt}$ คืออัตราการเกิดความร้อนที่รอยต่อ

Π_A และ Π_B คือสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ของวัสดุ A และวัสดุ B

I คือกระแส

2.4 สเปกโทรสโกปี[18]

สเปกโทรสโกปี (Spectroscopy) เป็นเทคนิคที่ใช้ศึกษาเกี่ยวกับอันตรกิริยา (interaction) ระหว่างรังสีแม่เหล็กไฟฟ้าและสสาร (matter) ใช้ในการตรวจวัดปริมาณแสงและค่าความเข้มข้นของแสงในช่วงรังสียูวีและแสงขาวโดยความยาวคลื่นของแสงจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณและชนิดของสารตัวอย่างซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดขึ้นจากการเดินทางของแสงที่เดินทางไปกระทบยังสารตัวอย่างทำให้พลังงานเปลี่ยนไปเนื่องจากเกิดการดูดกลืน (absorption) การเปล่งแสง (emission) และการกระเจิง (scattering)

2.4.1 เครื่องยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์

ยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรมิเตอร์ (UV-VIS Spectrophotometer) เป็นเครื่องมือที่ใช้แยกแสงตามความถี่หรือใช้ศึกษาเกี่ยวกับสเปกตรัมแสงโดยมีส่วนประกอบที่สำคัญอยู่ 4 อย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยกันคือ แหล่งกำเนิดแสง (light source), ตัวแยกแสง (monochromator), เซลล์บรรจุมสารตัวอย่าง (sample holder) และตัววัดแสง (Detector)

1. แหล่งกำเนิดแสง

แหล่งกำเนิดแสงในเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์จะต้องให้รังสีในช่วงความยาวคลื่นที่ต้องการอย่างต่อเนื่องและคงที่ตลอดเวลา รวมทั้งมีความเข้มแสงที่มากพอ หลอดกำเนิดแสงมีหลายชนิดตามความยาวคลื่นแสงที่เปล่งออกมา แสดงดังตารางที่

ตารางที่ 2-1 แหล่งกำเนิดแสงที่นิยมใช้

แหล่งกำเนิดแสง	ความยาวคลื่น
หลอด H_2 and D_2 lamp	160-380 nm
Tungsten/halogen	240-2,500 nm

2. ตัวแยกแสง

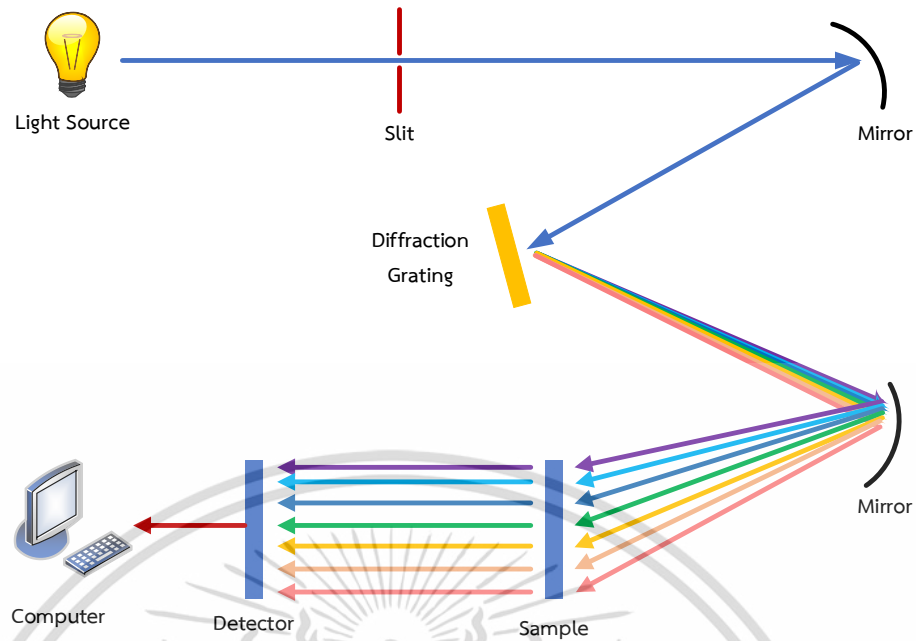
ตัวแยกแสงหรือ monochromator เป็นส่วนที่ใช้ควบคุมแสงโดยจะทำให้แสงที่ออกมาจากต้นกำเนิดแสงซึ่งเป็นแสงหลายสีให้เป็นแสงสีเดียวที่มีความยาวคลื่นในช่วงแคบๆ หรือมีความยาวคลื่นเดียว (monochromatic radiation) ตัวแยกแสงที่นิยมใช้คือ ฟิลเตอร์ (filter), ปริซึม (prism) และเกรตติง (grating)

3. ช่องใส่ตัวอย่าง

ช่องใส่ตัวอย่าง (sample holder) เป็นส่วนที่ใช้บรรจุสารตัวอย่างที่ต้องการศึกษา ซึ่งจะนิยมเรียกเรียกว่า คิวเวทท์ (cuvettes) วัสดุที่นำมาทำเป็นคิวเวทท์มีหลายชนิด เช่น พลาสติก คิวเวทท์ แก้ว เป็นต้น

4. Detector

ทำหน้าที่ในการวัดความเข้มของรังสีที่ถูกดูดกลืนโดยการแปลงพลังงานคลื่นรังสีเป็นพลังงานไฟฟ้า เครื่องวัดแสงที่ยังนิยมกันอยู่ในปัจจุบันคือหลอดโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier tube, PMT) และเครื่องวัดแสงชนิดซิลิกอนไดโอด (silicon diode detector)



รูปที่ 2.8 ส่วนประกอบของเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรมิเตอร์

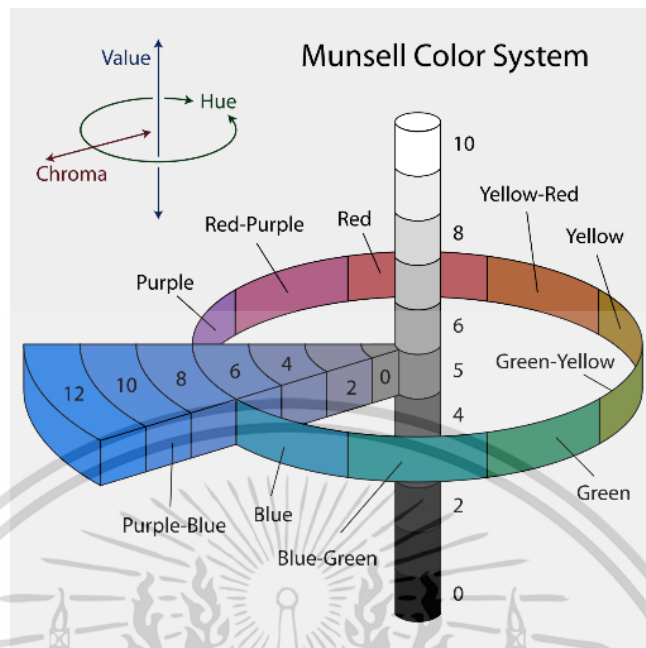
2.5 ระบบการวัดสี[19]

การวัดค่าสีของวัตถุด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ เพื่อศึกษาความเปลี่ยนแปลงของสีสามารถทำได้หลายวิธี ซึ่งระบบการวัดสีที่เป็นที่นิยมคือ ระบบ Munsell, ระบบ Chromaticity coordinate และระบบ CIE $L^*a^*b^*$ เป็นต้น โดยระบบ Munsell จะอาศัยสายตาของมนุษย์ในการวัดค่าสี ส่วนระบบ CIE เป็นระบบที่ Commission International de l' Eclairage (CIE) ได้พัฒนาระบบของการวัดสีที่ไม่ต้องอาศัยประสบการณ์หรือความคิดของมนุษย์ในการวัดสีแบบระบบ Munsell การวัดสีของระบบนี้มีข้อดีคือเป็นระบบที่ไม่ขึ้นกับการมองเห็นของแต่ละบุคคลเป็นระบบที่วัดสีออกมาเป็นตัวเลขเป็นระบบที่สามารถนำไปคำนวณและทำนายสูตรสีผสมได้ด้วย

2.5.1 ระบบ Munsell [20]

ระบบ Munsell เป็นระบบการวัดค่าสีที่ถูกคิดค้นโดย อัลเบิร์ต เฮนรี มันเซล (Albert Henry Munsell) ในปี ค.ศ. 1898 โดยเขาได้ออกแบบแผนผังของสีเป็นลักษณะรูปทรงกลมหรือผังที่มีการแผ่กระจายของสีออกจากศูนย์กลางเหมือนต้นไม้ดังแสดงในรูปที่ 2.9 โดยระบบนี้จะอาศัยสายตาและคุณสมบัติของการมองเห็นสี ได้แก่ 3 ตัวแปรคือ Hue (สีพื้นฐาน), Value (ความสว่าง) และ Chroma (ความบริสุทธิ์ของสี) อย่างไรก็ตาม ระบบ Munsell ต้องอาศัยประสบการณ์ของมนุษย์ในการวัดสี ระบบนี้จัดเป็นระบบที่ตรงกับที่สายตามนุษย์มองเห็นสีแตกต่างกันเป็นช่วงที่เท่าๆ กัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 ระบบ Munsell [20]

2.5.2 ระบบ Tristimulus Value

ระบบ Tristimulus Value ค่าที่หาได้ออกมาเป็น X, Y, Z โดยค่านี้จะระบุเป็นค่าสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินตามลำดับ แต่ค่าที่ได้ยังขาดความสัมพันธ์ระหว่างกันของสีที่มองเห็น จึงไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์อะไรได้มาก

2.5.3 ระบบ Chromaticity coordinate [21-22]

ระบบ CIE Chromaticity coordinate เป็นวิธีการวัดสีที่สามารถระบุค่าสีให้อยู่ในรูปของโคออร์ดิเนต (x', y') ในไดอะแกรมสี (chromaticity diagram) แสดงดังรูปที่ 2.10 ซึ่งค่าโคออร์ดิเนตสามารถคำนวณได้จากค่าการกระจายสเปกตรัมแสงของแหล่งกำเนิดแสงได้ ซึ่งค่าที่ได้คือ

$$x' = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (4)$$

$$y' = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (5)$$

เมื่อ x' และ y' คือ ค่าที่ระบุความเป็นสีของไดโอดเปล่งแสง
 Y คือ ค่าความสว่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

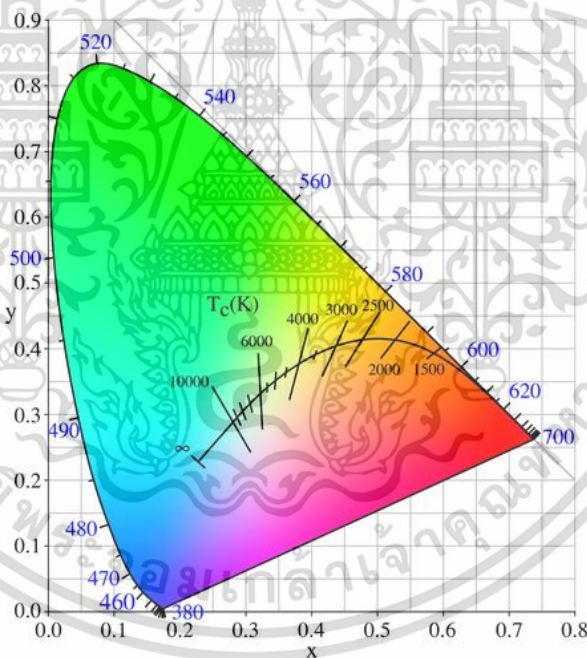
และค่า X , Y , และ Z หาได้ดังสมการ

$$X = \sum_{380}^{780} X_i T_i \quad (6)$$

$$Y = \sum_{380}^{780} Y_i T_i \quad (7)$$

$$Z = \sum_{380}^{780} Z_i T_i \quad (8)$$

เมื่อ $X_i, Y_i,$ และ Z_i คือ ค่าพิกัดโคออร์ดิเนตจาก CIE chromaticity coordinate
และ T_i คือ ค่าความเข้มแสงที่วัดได้จากสเปกโตรมิเตอร์



รูปที่ 2.10 CIE 1931 chromaticity diagram[23]

ส่วนประกอบของ CIE chromaticity diagram จะประกอบไปด้วย[24]

1. เส้นโลคัสสเปกตรัม (spectrum locus) คือเส้นสเปกตรัมที่ถูกสร้างขึ้นโดยการพล็อตสีของแต่ละความยาวคลื่นของสเปกตรัมที่มองเห็นได้ตั้งแต่สีแดงไปจนถึงสีน้ำเงิน โดยสีที่อยู่บริเวณนี้จะมีเฉดสี (hue) บริสุทธิ์และมีค่าความอิ่มตัว (saturation) สูงสุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. เส้นโลคัสพลังค์เกียน (Planckian locus) คือเส้นโค้งสีดำที่อยู่ตรงกลางของไดอะแกรม แสดงให้เห็นถึงอุณหภูมิสีที่อธิบายถึงอุณหภูมิสีของแสงสีขาว
3. เส้นสีม่วง (purple line) คือเส้นที่อยู่ด้านล่างเรียกว่าเส้นสีม่วง ซึ่งเป็นเส้นที่ไม่มีค่าความยาวคลื่นเนื่องจากเกิดจากการผสมของสีแดง สีเขียวและสีน้ำเงินเท่านั้น

2.5.4 ระบบ CIE LAB [25]

CIELAB เป็นระบบการวัดสีที่พัฒนาจากระบบ Tristimulus Value (X, Y และ Z) และ CIE Chromaticity Coordinates (x' , y' และ Y) โดยปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงจนสามารถบอกความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอและใกล้เคียงกับความแตกต่างของสีที่ตามองเห็นโดยระบบที่ใช้กันอยู่แพร่หลายในปัจจุบันคือ $L^*a^*b^*$ หรือเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า CIE LAB เป็นระบบการวัดสีแบบสามมิติที่ใช้ลักษณะของ Color space ดังรูปที่ 2.11 ซึ่งมีตัวแปรที่สำคัญคือ

L^* หมายถึงค่าความสว่าง (lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100

โดย 0 คือสีดำ

และ 100 คือสีขาว

a^* หมายถึงแกนสีมีค่าตั้งแต่ $-a^*$ จนถึง $+a^*$

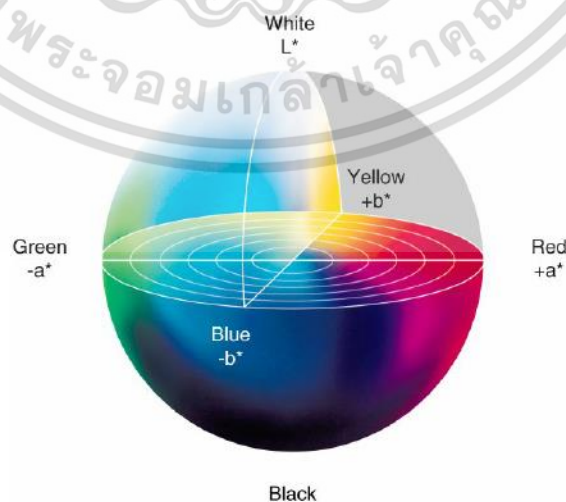
โดย $-a^*$ คือสีจะไปในทิศทางสีเขียว

และ $+a^*$ คือสีจะไปในทิศทางสีแดง

b^* หมายถึงแกนสีมีค่าตั้งแต่ $-b^*$ จนถึง $+b^*$

โดย $-b^*$ คือสีจะไปในทิศทางสีน้ำเงิน

และ $+b^*$ คือสีจะไปในทิศทางสีเหลือง



รูปที่ 2.11 CIE LAB 1976 color space [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการคำนวณเพื่อหาค่า L^* , a^* และ b^* สามารถหาได้จากสมการ

$$L^* = 116 f(Y) - 16 \quad (9)$$

$$a^* = 500[f(X) - f(Y)] \quad (10)$$

$$b^* = 200[f(Y) - f(Z)] \quad (11)$$

เมื่อ

$$f(X) = \begin{cases} \left(\frac{X}{X_n}\right)^{1/3}, & \left(\frac{X}{X_n}\right) > 0.008856 \\ \frac{903.3\left(\frac{X}{X_n}\right) - 16}{116}, & \left(\frac{X}{X_n}\right) \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f(Y) = \begin{cases} \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}, & \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > 0.008856 \\ \frac{903.3\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16}{116}, & \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f(Z) = \begin{cases} \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3}, & \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > 0.008856 \\ \frac{903.3\left(\frac{Z}{Z_n}\right) - 16}{116}, & \left(\frac{Z}{Z_n}\right) \leq 0.008856 \end{cases}$$

โดยค่า X_n , Y_n , และ Z_n มีค่าเป็น 94.8777, 100.0000 และ 107.3827 ตามลำดับ

ในการหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลข สามารถอธิบายได้จากรูปที่ 2.11 ซึ่งจะพบว่า ณ จุด ๆ หนึ่งในพื้นที่ (space) นั้นจะมีค่าเป็น $L_1^* a_1^* b_1^*$ และเมื่อสีมีการเปลี่ยนเฉดสีไปจะได้จุดใหม่ใน Space มีค่าเป็น $L_2^* a_2^* b_2^*$ โดยระยะห่างของทั้ง 2 จุดนี้จะบ่งบอกถึงค่าความแตกต่างของสีดังสมการ

$$\Delta E = \sqrt{(L_1^* - L_2^*)^2 + (a_1^* - a_2^*)^2 + (b_1^* - b_2^*)^2} \quad (12)$$

ค่าความแตกต่างสี (ΔE) เป็นตัววัดที่ใช้ในการประเมินความแตกต่างในการแสดงสีระหว่างสองสี โดยมักถูกใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการจัดแสงและการพิมพ์สี เช่น อุตสาหกรรมกราฟิก อุตสาหกรรมสีและอุตสาหกรรมภาพยนตร์ ค่าความแตกต่างของสีจะวัดความแตกต่างโดยการเปรียบเทียบพิกัดความสว่างของสีสองสีที่ต้องการเปรียบเทียบ โดยจะแสดงถึงระยะห่างระหว่างสองสี

ในมิติของความแตกต่างในการแสดงสี ซึ่งหากค่า ความแตกต่างมีค่าเป็นศูนย์หมายถึงสีสองสี มีสีอยู่ในเอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับเดียวกัน และหากค่าความแตกต่างของสีมีค่ามากขึ้นจะแสดงถึงความแตกต่างในการแสดงสีที่มากขึ้น

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในปี ค.ศ.1989 Sconzce and Torzo [30] ได้นำ silicon และ germanium ไดโอดมาศึกษาอิทธิพลของ T-V characteristic ของสารตัวนำ Si ได้ถูกวัดในช่วงอุณหภูมิ 80 ถึง 430 เคลวิน โดยใช้เตาไฟฟ้าสำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้องและส่วนล่างของเตาถูกทำความเย็นด้วยไนโตรเจนเหลวสำหรับอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพวกเขาได้รายงานค่าช่องว่างพลังงานขอไดโอดเปล่งแสงทั้งสองชนิดได้

ในปี ค.ศ.2002 Preker [31] ได้วัดค่าแบบอุณหภูมิ-แรงดัน (T-V characteristic) ของไดโอด silicon ชนิด 1N4148 ในช่วงอุณหภูมิ 10 ถึง 110 องศาเซลเซียส (°C) โดยเขาได้นำไดโอดวางใน mercury reservoir ซึ่งเชื่อมติดกับเทอร์โมมิเตอร์ และทั้งสองถูกห่อด้วยฟอยล์ PVC บาง เพื่อป้องกันการนำไฟฟ้าและป้องกันน้ำเข้ามาได้ ระบบถูกทำความร้อนโดยเครื่องทำความร้อนไฟฟ้าสำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง และถูกทำความเย็นด้วยสารผสมน้ำแข็งและเกลือสำหรับอุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิห้อง

ในปี ค.ศ.2007 Low และคณะ [32] ได้วัดค่าแตกต่างอุณหภูมิ-แรงดัน (T-V characteristic) ของไดโอด silicon (1N914) ในช่วงอุณหภูมิ 273 ถึง 333 K โดยทำการห่อไดโอดและเซ็นเซอร์อุณหภูมิด้วยฟอยล์พลาสติกบางเพื่อเป็นให้ระบบทั้งหมดเป็นฉนวนไฟฟ้า จากนั้นไดโอดจะถูกนำไปวางในน้ำ DI ผสมกับน้ำแข็งเพื่อให้ได้อุณหภูมิ 273 K และถูกทำความร้อนด้วยเครื่องทำ hot plate สำหรับอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิห้อง

ในปี ค.ศ.2015 Matthieu Petit et.al. [5] ได้ทำการศึกษาค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงสีเขียวที่กระแสไบอัส 30 μ A และ 70 μ A โดยใช้วิธีทางไฟฟ้าและทางแสง โดยในทางไฟฟ้าจะใช้เทคนิค T-V และทางแสงใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปี ผลการทดลองพวกเขาสามารถระบุค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงสีเขียวได้และผลการทดลองของเขายืนยันว่าอุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงที่เปลี่ยนแปลงนั้นส่งผลต่อค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงซึ่งตรงตามทฤษฎีของคุณ Varshni

ในปี ค.ศ.2016 Eugene et.al. [6] ได้ทำทดลองวัดค่าช่องว่างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน เขียว และ แดง โดยใช้เทคนิค T-V และวัดสเปกตรัมแสงโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปี เพื่อศึกษาอัตราส่วนของสารที่นำมาสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำไดโอดเปล่งแสง โดยผลการวิจัยสามารถระบุค่าช่องว่างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินจากเทคนิค T-V ได้เท่ากับ 3.00 eV และสามารถระบุอัตราส่วนของสาร In กับ Ga ที่นำมาทำเป็นไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินได้เท่ากับ 0.15:0.85 อีกทั้งยังสามารถระบุค่าช่องว่างพลังงานที่ได้จากการวัดสเปกตรัมแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.63 eV โดยงานวิจัยนี้จะนำไปใช้เป็นการทดลองให้กับนักศึกษา โดยใช้เวลาในการทดลองทั้งหมด 3 ชั่วโมง

ในปี ค.ศ.2017 Muna et.al. [27] ได้ทำการศึกษาไดโอดเปล่งแสงสีเหลืองอำพันและสีแดงที่อุณหภูมิ 25 ถึง 85 องศาเซลเซียส พวกเขาได้รายงานผลการทดลองของสเปกตรัมการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงและแสดงเจตสีของไดโอดเปล่งแสง และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสเปกตรัมแสงกับอุณหภูมิสภาพแวดล้อม: สเปกตรัมแสงของไดโอดเปล่งแสงจะเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิสภาพแวดล้อมและมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มสี

ในปี ค.ศ.2018 Stuart Thomson [7] ทำการศึกษาไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง และสีแดงเพื่อระบุค่าช่องว่างแถบพลังงานและค่าสี chromaticity โดยได้นำเทคนิคสเปกโตรสโกปีมาใช้ในการวิจัย ผลการวิจัยได้ระบุค่าช่องว่างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินอยู่ที่ 2.68 eV และระบุค่าสี Chromaticity ของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินซึ่งมีค่า x และ y เท่ากับ 0.14 และ 0.05 ตามลำดับ

ในปี ค.ศ.2018 Stuart Thomson [22] ได้ทำศึกษาค่าช่องว่างแถบพลังงานของแอลอีดีสีขาวโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโกปี โดยได้ผลสเปกตรัมของแอลอีดีสีขาวที่มี peak wavelength อยู่ที่ 450 nm และที่ 540 nm และได้ศึกษาการระบุพิกัดสีของแอลอีดีสีขาวโดยใช้ CIE Chromaticity ซึ่งได้ค่า x และ y เท่ากับ 0.32 และ 0.33 ตามลำดับ

ในปี ค.ศ. 2020 Sai pan et.al. [8] ได้ทำการศึกษากลไกการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินและสีเขียวที่ทำมาจากสารประกอบ GaN ที่อุณหภูมิ 120-373 K และที่กระแสไบอัส 80-240 mA จากผลการวิจัยพวกเขาพบว่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้สเปกตรัมแสงเลื่อนพิคไปยังย่านความยาวคลื่นที่สูงขึ้นและส่งผลต่อค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงทำให้มีค่าลดลง และกระแสไบอัสที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าช่องว่างพลังงานเพิ่มขึ้น

จากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการนำเอาไดโอดเปล่งแสงมา ศึกษาผลของอุณหภูมิและกระแสที่มีต่อสเปกตรัมแสงและค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสง โดยส่วนนี้อาจจะยังไม่ครบถ้วนสมบูรณ์นัก การศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเรื่องนี้จะเป็นประโยชน์ในการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินและสีเขียว อีกทั้งยังมีให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่จะใช้วิธี Temperature-Voltage เพื่อปรับอุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงให้ได้ตามช่วงที่ต้องการศึกษา ซึ่งวิธีนี้จะใช้เวลาค่อนข้างนาน ส่วนในงานวิจัยของเราได้นำเอาเทอร์โมอิเล็กทริกคูเลเตอร์มาประยุกต์ใช้เป็นตัวช่วยปรับอุณหภูมิให้กับไดโอดเปล่งแสง ซึ่งวิธีนี้จะใช้เวลาไม่นานเมื่อเทียบกับวิธีแรก โดยผลการวิจัยทั้งหมดที่ได้กล่าวมาสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2-2

ตารางที่ 2-2 งานวิจัยที่ศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงไดโอดเปล่งแสง

ชื่อผู้วิจัย	ชนิด/สีของไดโอดเปล่งแสง	เทคนิค/อุณหภูมิ/กระแสไบอัสที่ศึกษา	ผลวิจัยหลักที่น่าเสนอ		
			Eg	Spectrum	Color space
Sconzce and Torzo (1989)	Silicon and Germanium diode	Temperature-Voltage/ -193°C-157°C (liquid nitrogen -electrical oven)/ 5mA	✓	x	x
Jurgen Peaker (2002)	Silicon and Germanium diode	Temperature-Voltage/ 0°C-110°C (ice-salt mixture-electrical heater)/ 10µA	✓	x	x
Jeremy Low et.al. (2007)	Silicon diode	Temperature-Voltage/ 0°C-57°C (de-ionized ice-water mixture -electrical heater)/ 5mA	✓	x	x
Matthieu Petit et.al. (2015)	Green LED (GaP)	Temperature-Voltage and Spectroscopy/ 25°C-100°C/ 30µA,70µA	✓	✓	x
Eugene et.al. (2016)	Blue, Green, Red, and yellow LEDs	Temperature-Voltage and Spectroscopy/ 0°C-70°C/ 100µA	✓	✓	x

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

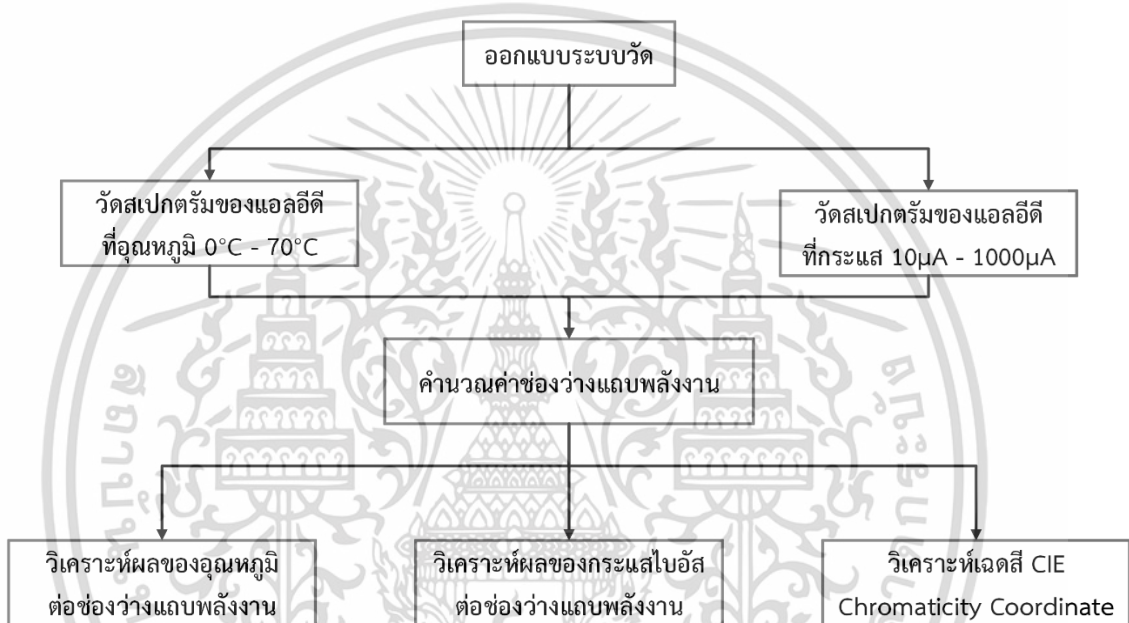
ชื่อผู้วิจัย	ชนิด/สีของ ไดโอดเปล่งแสง	เทคนิค/อุณหภูมิ/ กระแสไบอัสที่ศึกษา	ผลวิจัยหลักที่น่าเสนอ		
			Eg	Spectrum	Color space
Muna E. Raypah et.al. (2017)	Amber and red SMD LEDs	Spectroscopy/ 25°C- 85°C/ 30-100mA	✓	✓	✓
Stuart Thomson (2018)	Blue, Green, Orange, and Red LEDs	Spectroscopy/ room temperature/ 20mA	✓	✓	✓
Stuart Thomson (2018)	White light LED	Spectroscopy/ room temperature/ 20mA	✓	✓	✓
Sai pan et.al. (2020)	Blue, Green (GaN)	Spectroscopy/ - 153°C-100°C/ 80-240 mA	✓	✓	x
Benjawan et.al.	Blue LEDs (SMD)	Spectroscopy/ 0°C- 70°C/ 10µA-1mA	✓	✓	✓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงวัสดุอุปกรณ์และวิธีการดำเนินงานวิจัยที่ใช้ในการทดลองเพื่อวัดค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินและสีเขียว โดยใช้วิธีสเปกโตรสโคปี และการวัดค่าสี CIE Chromaticity ของไดโอดเปล่งแสงโดยใช้ซอฟต์แวร์ origin ซึ่งมีรายละเอียดดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการวัดทดลองสำหรับวัดสเปกตรัมแสง

3.1 ไดโอดเปล่งแสงที่ใช้ในงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้จะใช้ไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน สีเขียว สีแดงและสีขาวเพื่อศึกษาผลของอุณหภูมิ ต่อช่องว่างแถบพลังงาน โดยไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน ที่ใช้ถูกซื้อมาจากบริษัท Vishay Intertechnology รุ่น VLDB1232G-08, VLDTG1232G-08, และ VLDS1235R ไดโอดเปล่งแสงสีขาวซื้อมาจากบริษัท Farnell Ltd. รุ่น MCL053SWC-YH1 แหล่งกำเนิดแสงมีลักษณะเป็น surface mount (SMT) ดังรูปที่ 3.2

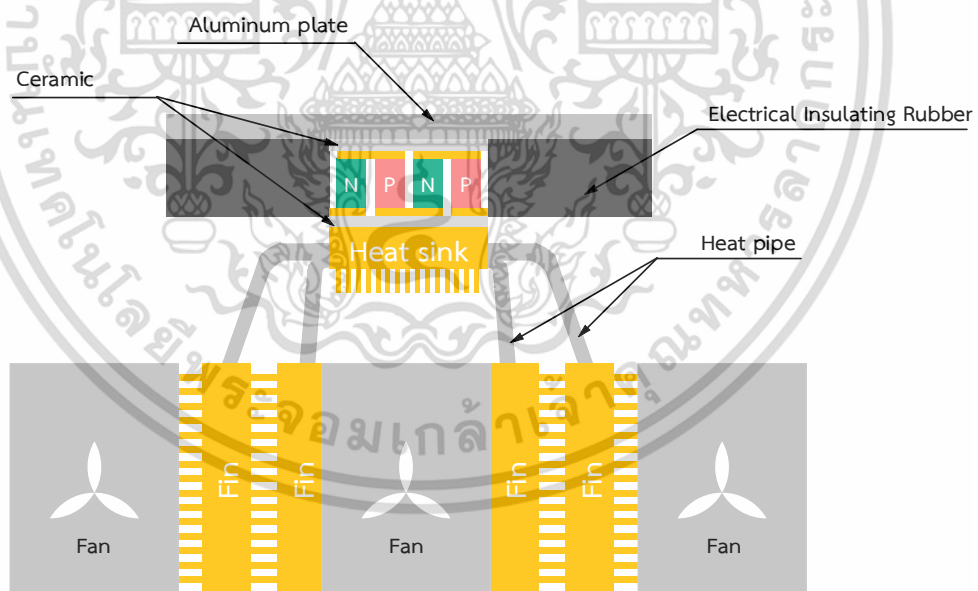


รูปที่ 3.2 ไดโอดเปล่งแสงแบบ SMT

3.2 การออกแบบระบบการวัดคุณสมบัติไดโอดเปล่งแสง

ในการออกแบบชุดทดลอง ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตเนื้อหาในการเรียนการสอนและได้จัดสร้างชุดทดลองดังรูปที่ 3.3 ซึ่งระบบที่จัดสร้างประกอบด้วย

1. ชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 120 วัตต์ รุ่น TEC1-12715 ขนาด 50x50 มิลลิเมตร และหนา 3 มิลลิเมตร[28] ทำหน้าที่ปรับอุณหภูมิร้อน/เย็น ซึ่งชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกนี้จะประกอบด้วย โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก แผ่นระบายความร้อนและพัดลมระบายอากาศ สามารถทำความร้อนและความเย็นได้โดยอาศัยหลักการเพลเทียร์ (Peltier Effect) โดยเมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้ไหลผ่านโมดูล ซึ่งประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด (ชนิด n และ p) จะทำให้เกิดความร้อนขึ้นที่บริเวณรอยต่อซึ่งความร้อนจะเพิ่มขึ้นหรือลดลงจะขึ้นกับทิศทางการไหลของกระแส [4]



รูปที่ 3.3 เทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์

2. แหล่งกำเนิดแรงดันไฟฟ้า 2 เครื่อง ทำหน้าที่จ่ายแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ให้กับโมดูลและพัดลมระบายความร้อน
3. แหล่งกำเนิดกระแสไฟฟ้าจำนวน 1 เครื่อง ทำหน้าที่จ่ายกระแสคงที่ ขนาด 10 μA , 100 μA , 500 μA และ 1000 μA ให้กับหลอดแอลอีดี
4. เทอร์โมคัปเปิล Type K สำหรับวัดอุณหภูมิ

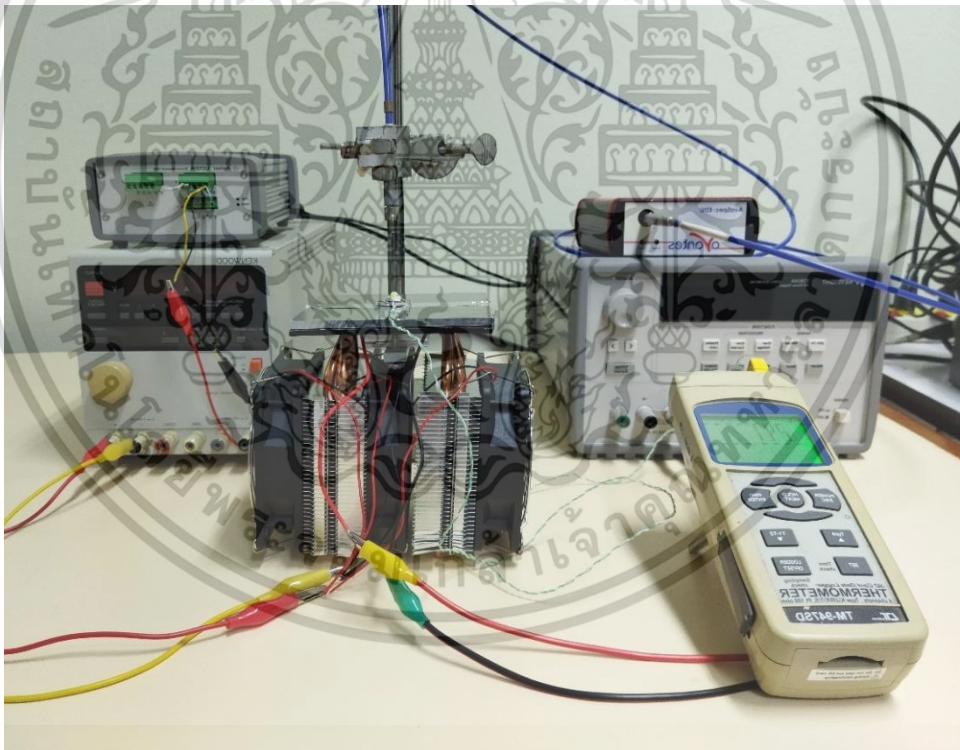
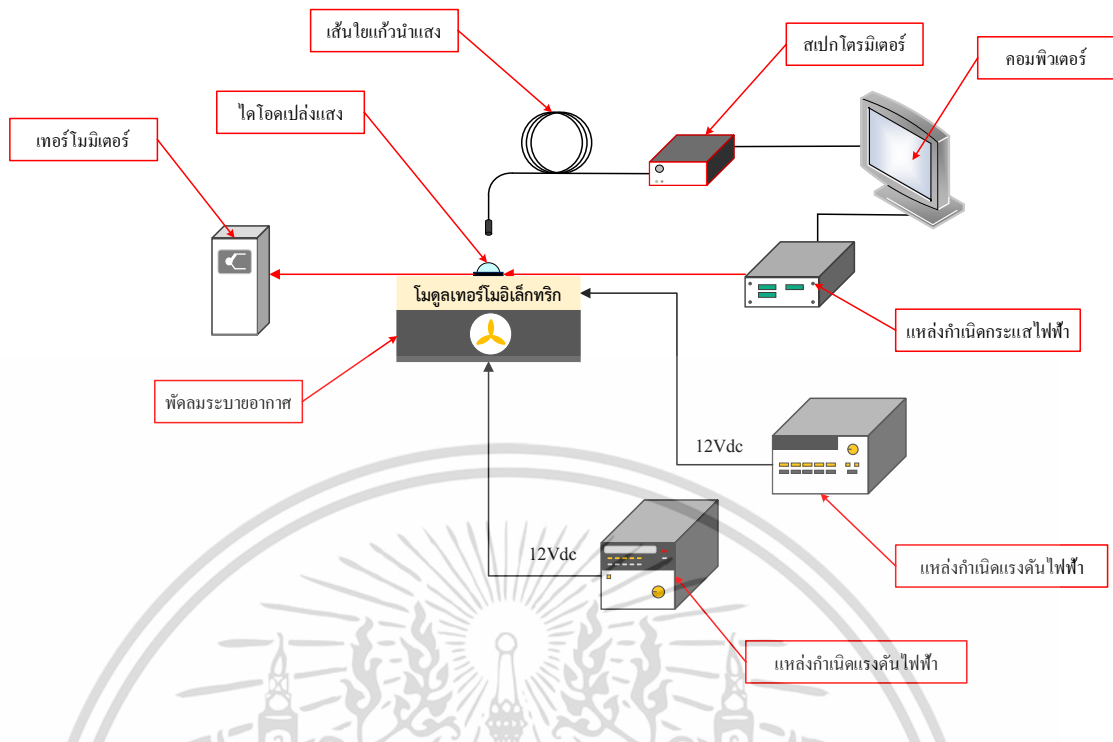
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. สเปกโตรมิเตอร์ รุ่น Avaspec 2048 ของบริษัท Avantes สำหรับวัดสเปกตรัมแสง

ก่อนที่จะนำระบบไปใช้งานในการทดลอง ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติการทำความร้อนของชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกกว่ามีความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสอย่างไร รวมถึงได้ศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงานเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าต่างๆ เพื่อให้สามารถกำหนดช่วงเวลาที่จะวัดผลสเปกตรัมได้อย่างเหมาะสม

สำหรับการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงภายใต้อุณหภูมิต่างๆ มีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งหลอดแอลอีดีสีน้ำเงินบนแท่นวางชิ้นงานที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม
2. ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนแท่นวางสิ่งประดิษฐ์
3. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโมดูลเพื่อควบคุมแท่นวางหลอดแอลอีดีให้มีอุณหภูมิคงที่ที่ 0-70 องศาเซลเซียส โดยเปลี่ยนแปลงทุกๆ 10 องศาเซลเซียส
4. วัดสเปกตรัมแสงของหลอดแอลอีดีเมื่ออุณหภูมิมีค่า 0-70 องศาเซลเซียส
5. นำสเปกตรัมแสงที่อุณหภูมิต่างๆ มาพล็อตกราฟเพื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงและวิเคราะห์ผลของความร้อนที่มีต่อการส่องสว่างของหลอดแอลอีดี



รูปที่ 3.4 การติดตั้งระบบวัดค่าช่องว่างพลังงานโดยใช้เทคนิคสเปกโทรสโกปี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การวัดสเปกตรัมเพื่อหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

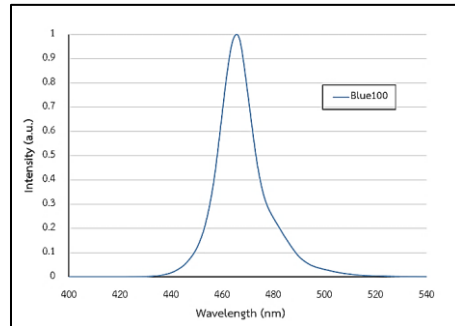
การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงจะใช้วิธีวัดสเปกตรัมแสงด้วยเทคนิคสเปกโตรสโกปี เพื่อศึกษาเงื่อนไขของอุณหภูมิและเงื่อนไขของกระแสไบอัสที่ส่งผลต่อช่องว่างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงโดยจะทำการศึกษาที่เงื่อนไขความแตกต่างของอุณหภูมิตั้งที่ 0°C – 70°C และที่เงื่อนไขความแตกต่างของกระแสไบอัสไดโอดเปล่งแสงที่ $10\ \mu\text{A}$ – $1000\ \mu\text{A}$

การจ่ายแรงดันให้กับระบบ

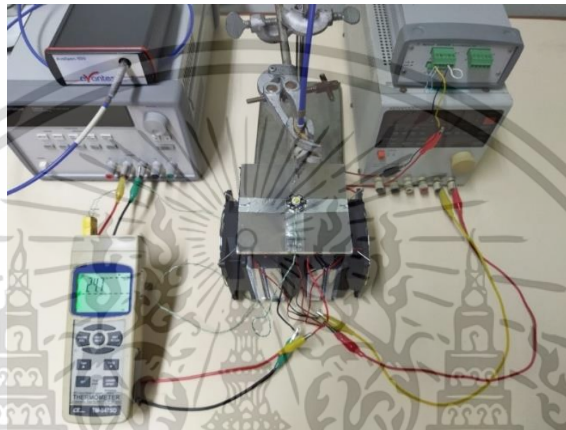
1. จ่ายแรงดัน 12 V จากเครื่อง DC power supply (Kenwood,PW18-1T) .ให้กับพัดลมระบายความร้อน
2. จ่ายกระแสคิงที่จากเครื่อง Source measured unit (Agilent,U2722A) ให้กับ LED โดยใช้ซอฟต์แวร์ Agilent โดยจะเลือกใช้กระแสไบอัสที่ 100-1000 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ
- 3.
4. จ่ายแรงดันให้กับ Thermoelectric module จากเครื่อง DC power supply (Keysight,E3436A) โดยในขั้นตอนนี้จะเลือกช่วงที่ 25V, 7A ปรับแรงดันเป็น 12V จากนั้นรอให้อุณหภูมิของ LED ลดลงจนติดลบ
5. วัดสเปกตรัมที่อุณหภูมิ 0°C - 10°C จากเครื่อง Spectrometer (Avantes,Avaspec2048) โดยใช้ซอฟต์แวร์ Avasoft 7.8.1
6. กลับขั้วของกระแสที่จ่ายให้กับ Thermoelectric module เพื่อให้ thermoelectric cooler สลับโหมดการทำงานจากด้านเย็นเป็นด้านร้อน วัดสเปกตรัมเมื่ออุณหภูมิถึง 20°C - 70°C
7. เมื่อทำการทดลองเสร็จสิ้นให้พักเครื่อง thermoelectric cooler เป็นเวลา 10 นาที เพื่อปรับให้เป็นอุณหภูมิห้อง
8. ทำซ้ำทุกขั้นตอนอีกครั้งโดยเปลี่ยนกระแสที่จ่ายให้ไดโอดเปล่งแสงเป็น 100 ไมโครแอมป์และ 1000 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ

3.3.1 การคำนวณหาค่าช่องว่างแถบพลังงาน

การหาค่าช่องว่างแถบพลังงานของไดโอดเปล่งแสงจะคำนวณจากข้อมูลที่ได้จากการวัดสเปกตรัมแสงของไดโอดเปล่งแสงโดยจำนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตกราฟความเข้มแสงเทียบกับความยาวคลื่นดังแสดงในรูปที่ 3.5 จากนั้นนำค่าความยาวคลื่นที่ได้มาคำนวณตามสมการที่ 1



รูปที่ 3.5 สเปกตรัมแสงของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินที่กระแสป้อน 100 ไมโครแอมป์



รูปที่ 3.6 การติดตั้งเครื่องมือสำหรับวัดสเปกตรัมแสงไดโอดเปล่งแสง

3.4 การวิเคราะห์ค่าสี X-Y chromatic

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์ค่าเฉดสีของแอลอีดี โดยได้ใช้ระบบ CIE Chromaticity coordinate (x', y' coordinate) โดยจะนำค่าสเปกตรัมการแผ่รังสีของแอลอีดีสีน้ำเงินที่วัดได้จากเครื่องสเปกโตรมิเตอร์มาคำนวณหาค่าพิกัด x', y' จากสมการที่ 4 และ 5

ขั้นตอนการวิเคราะห์ค่าสีมีรายละเอียดดังนี้

1. ดาวน์โหลดค่าพิกัด X_i, Y_i และ Z_i ของสี ที่เว็บไซต์ Chromaticity coordinates from <http://www.cvrl.org/>
2. เลือกไฟล์ 2-deg XYZ CMFs เลือก stepsize 5 nm เลือก format เป็น csv จากนั้นกด submit

New physiologically-relevant CIE x, y chromaticity coordinates (proposed)

2-deg coordinates from the new 2-deg XYZ CMFs

Stepsize	Format
<input type="radio"/> 0.1 nm	<input type="radio"/> csv
<input type="radio"/> 1 nm	<input type="radio"/> xml
<input type="radio"/> 5 nm	<input type="radio"/> tabular
	<input type="radio"/> plot

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าพิกัด X_i, Y_i และ Z_i coordinate ที่ได้จะมีตั้งแต่ความยาวคลื่น 390nm จนถึง 830nm แสดงดังรูปด้านล่าง

	A	B	C	D
1	390	0.16638	0.0183	0.81532
2	395	0.16595	0.01874	0.81531
3	400	0.16499	0.01827	0.81673
4	405	0.16393	0.01718	0.81888
5	410	0.16296	0.01653	0.82052
6	415	0.16126	0.01594	0.82228
7	420	0.15958	0.01589	0.82453
8	425	0.1575	0.01653	0.82596
9	430	0.1554	0.01767	0.82692
10	435	0.15276	0.01968	0.82756
11	440	0.15036	0.02173	0.8279
12	445	0.14749	0.02478	0.82773
13	450	0.14423	0.02895	0.82682
14	455	0.13997	0.03584	0.82419
15	460	0.13392	0.04588	0.8202
16	465	0.12638	0.06036	0.81326
17	470	0.11574	0.0832	0.80106
18	475	0.10078	0.11975	0.77947
19	480	0.08055	0.17601	0.74344
20	485	0.05651	0.25359	0.6899

4. คำนวณหาค่า X, Y , และ Z จากสมการที่ 6-8 จากนั้นจะได้ค่าดังตาราง

ตารางที่ 3-1 ค่า X, Y, Z ของไดโอดเปล่งแสงที่กระแส 10 ไมโครแอมป์ จากการคำนวณ

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	X	Y	Z
0	40.03	60.24	409.14
10	83.10	60.24	424.74
20	55.29	91.96	410.29
30	77.27	70.57	417.45
40	68.79	89.30	408.69
50	61.68	85.80	395.97
60	101.45	78.21	405.71
70	68.91	107.75	376.04

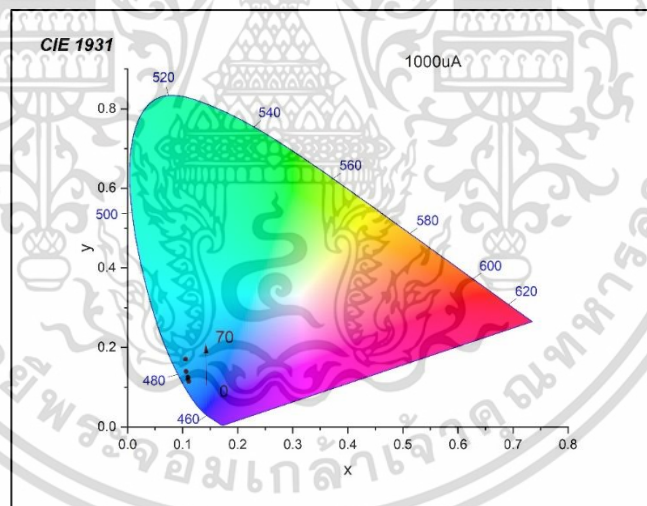
5. นำค่าที่ได้จากข้อ 4 มาคำนวณหาค่าพิกัดของสี (x', y') จากสมการที่ 3 และ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3-2 ค่า x', y' ที่กระแส 10 ไมโครแอมป์ ที่ได้จากการคำนวณ

Temperature	x'	y'
0	0.08	0.12
10	0.15	0.11
20	0.10	0.16
30	0.14	0.12
40	0.12	0.16
50	0.11	0.16
60	0.17	0.13
70	0.12	0.19

6. นำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ CIE chromaticity diagram โดยใช้ซอฟต์แวร์ origin2019b ซึ่งจะได้ผลดังรูปภาพด้านล่าง



รูปที่ 3.7 CIE chromaticity coordinate ของไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงิน

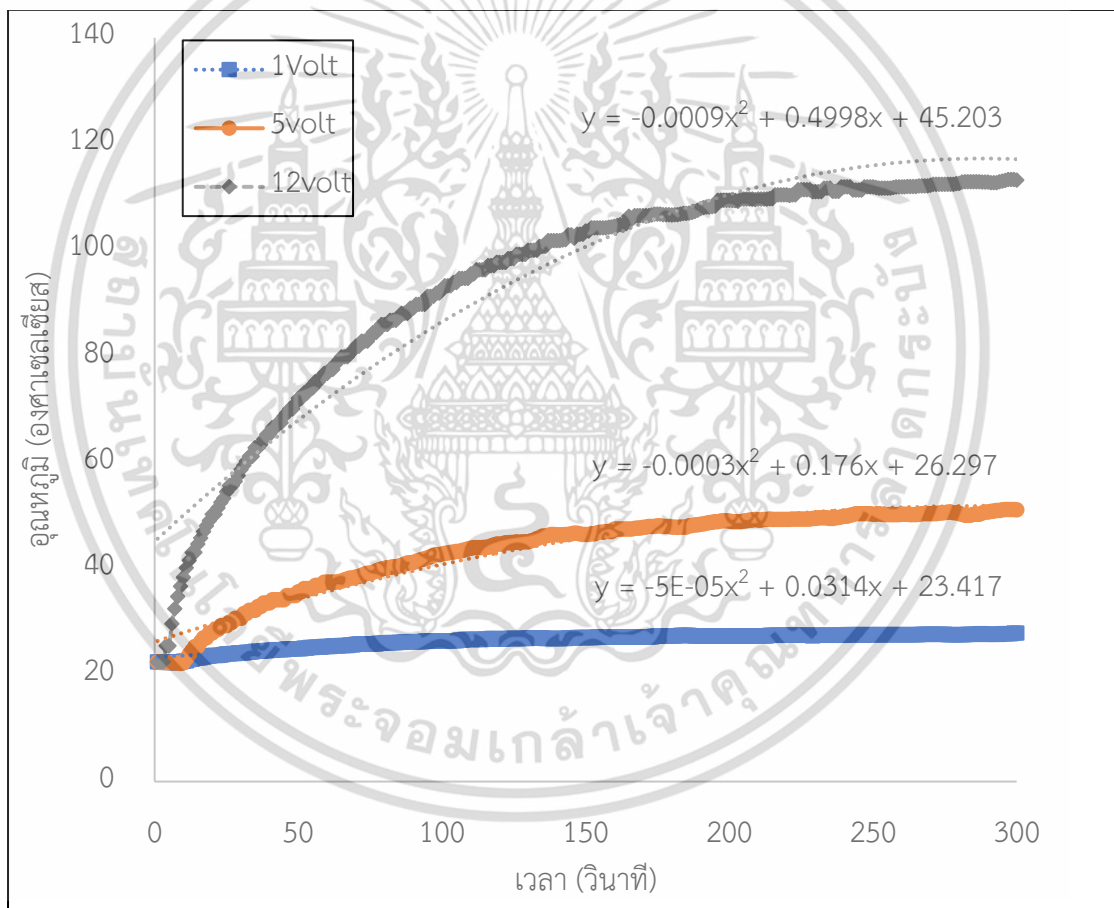
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 ผลการออกแบบระบบวัดคุณสมบัติของไดโอดเปล่งแสง

ในการทดสอบว่าระบบวัดที่สร้างขึ้นนั้น สามารถทำความร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดเท่าไร มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างไร และสามารถรักษาอุณหภูมิคงที่ภายในเวลาเท่าไร เมื่อโมดูลถูกไบอัสด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ค่าต่างๆ ตั้งแต่ 0-12 โวลต์ ผู้วิจัยจึงได้ทดลองวัดความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ โดยมีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่แรงดันไฟฟ้า 1,5, และ 12 โวลต์

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าแท่นทำความร้อนเทอร์โมอิเล็กทริกคูลเลอร์จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น โดยมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 0.05-0.91 องศาเซลเซียส/วินาที และมีแนวโน้มอุณหภูมิคงที่ในช่วง 27-114 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 300 วินาที สรุปได้ดังตารางที่ 4-1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-1 การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 1-12 โวลต์

แรงดันไฟฟ้า (V)	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C/s}$) ในช่วง 0-60วินาที	อุณหภูมิคงที่ ($^{\circ}\text{C}$)
1	0.05	27.9 \pm 0.5
2	0.10	32.2 \pm 0.5
3	0.15	39.0 \pm 0.5
4	0.20	46.3 \pm 0.5
5	0.25	50.1 \pm 0.5
6	0.32	56.6 \pm 0.5
7	0.30	53.3 \pm 0.5
8	0.58	80.9 \pm 0.5
9	0.63	88.8 \pm 0.5
10	0.78	98.4 \pm 0.5
11	0.83	105.6 \pm 0.5
12	0.91	114.7 \pm 0.5

จากข้อมูลสามารถคำนวณหาจุดตัด x, y ที่แรงดัน 12 โวลต์ ได้ดังนี้

จาก

$$y = -0.0009x^2 + 0.4998x + 45.203$$

นำสมการมาคำนวณหาอนุพันธ์ลำดับหนึ่งจะได้

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dx} &= \frac{d}{dx} (-0.0009x^2 + 0.4998x + 45.203) \\ &= (-0.0009)(2)x + 0.4998 \\ &= (-0.0018)x + 0.4998 \end{aligned}$$

ดังนั้น x จะได้

$$\begin{aligned} x &= (-0.4998 / -0.0018) \\ &= 277.67 \end{aligned}$$

จากนั้นนำ x ไปหาค่า y จะได้

$$\begin{aligned} y &= -0.0009(277.67^2) + 0.4998(277.67) + 45.203 \\ y &= 114.43 \end{aligned}$$

เมื่อนำสมการโพลีโนเมียลที่แรงดัน 5 โวลต์ มาคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ x จะได้ดังนี้
เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จาก

$$y = -0.0003x^2 + 0.176x + 26.297$$

นำสมการมาคำนวณหาอนุพันธ์ลำดับหนึ่งจะได้

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= \frac{d}{dx}(-0.0003x^2 + 0.176x + 26.297) \\ &= (-0.0003)(2)x + 0.176 \\ &= (-0.0006)x + 0.176\end{aligned}$$

ดังนั้น X จะได้

$$\begin{aligned}x &= (-0.176/-0.0006) \\ &= 293.33\end{aligned}$$

จากนั้นนำ x ไปหาค่า y จะได้

$$\begin{aligned}y &= -0.0003(293.33^2) + 0.176(293.33) + 26.297 \\ y &= 51.06\end{aligned}$$

เมื่อนำสมการโพลีโนเมียลที่แรงดัน 1 โวลต์ มาคำนวณเพื่อหาค่าคงที่ x จะได้ดังนี้

จาก

$$y = -0.00005x^2 + 0.0314x + 23.417$$

นำสมการมาคำนวณหาอนุพันธ์ลำดับหนึ่งจะได้

$$\begin{aligned}\frac{dy}{dx} &= \frac{d}{dx}(-0.00005x^2 + 0.0314x + 23.417) \\ &= (-0.00005)(2)x + 0.0314 \\ &= (-0.0001)x + 0.0314\end{aligned}$$

ดังนั้น X จะได้

$$\begin{aligned}x &= (-0.0314/-0.0001) \\ &= 314\end{aligned}$$

จากนั้นนำ x ไปหาค่า y จะได้

$$\begin{aligned}y &= -0.00005(314^2) + 0.0314(314) + 23.417 \\ y &= 28.35\end{aligned}$$

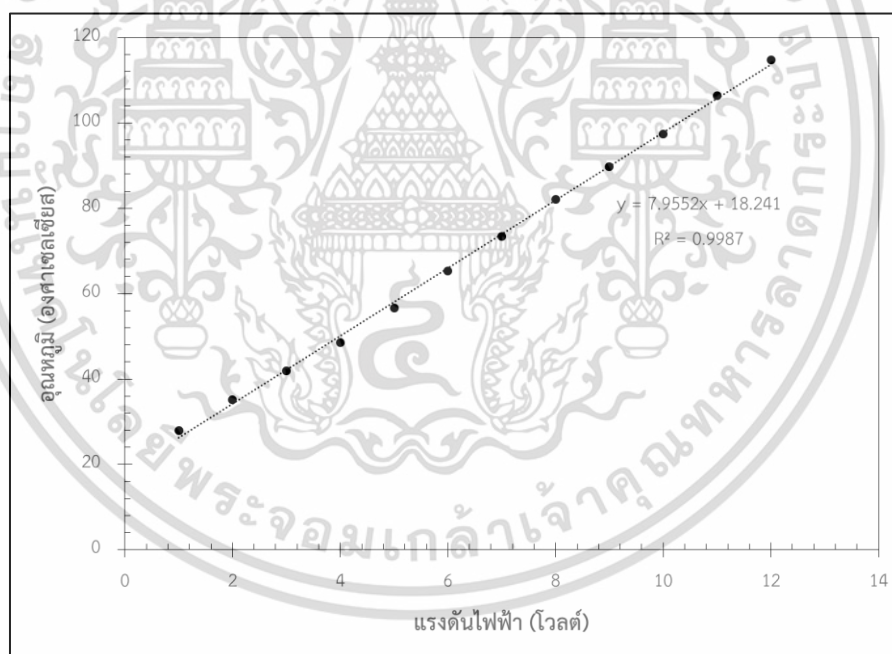
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโมดูลและความร้อนที่เกิดขึ้นที่บริเวณแท่นวางชิ้นงาน (T_H) ผู้วิจัยได้ทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าต่างๆ ตั้งแต่ 1-12 โวลต์ ให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าบวกให้กับขั้วบวกของโมดูลและแรงดันไฟลบให้กับขั้วลบของโมดูล และบันทึกค่าที่อุณหภูมิคงที่ เพื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 4.2

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [29] และสอดคล้องกับสมการที่ (3) มีความสัมพันธ์ของแรงดันและอุณหภูมิดังสมการที่ (13)

$$T = 7.9552V + 18.241 \quad (13)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงาน
 V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโมดูล

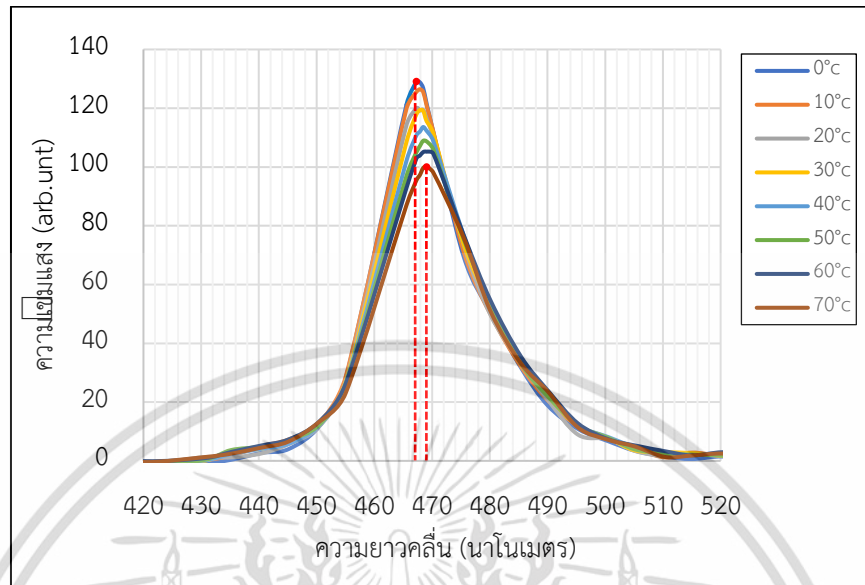


รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัส

4.2 ผลการวัดสเปกตรัมของแอลอีดีที่อุณหภูมิต่างๆ

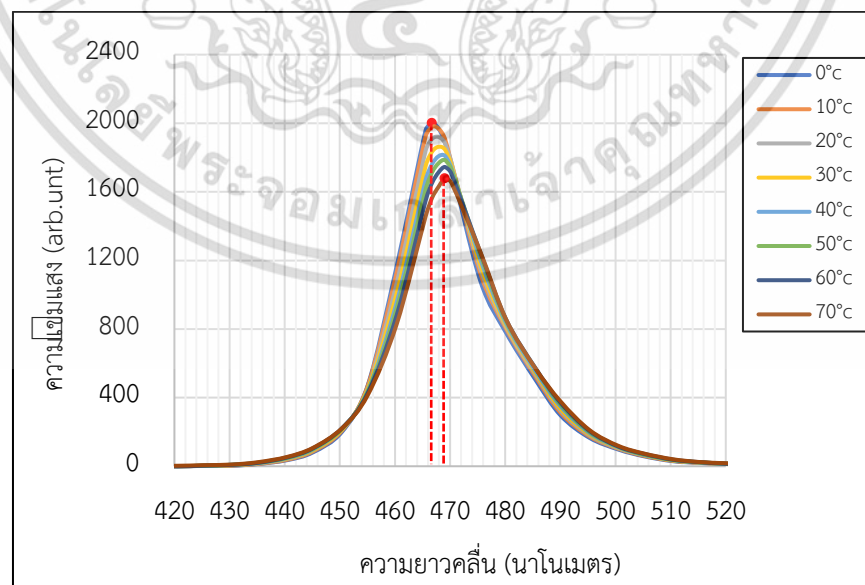
ในการทดลองวัดการสเปกตรัมของแอลอีดี ผู้วิจัยได้กำหนดช่วงอุณหภูมิการศึกษาในช่วง 0-70 องศาเซลเซียส โดยใช้หลอดแอลอีดีสีน้ำเงิน โดยอาศัยระบบวัดที่ออกแบบดังที่กล่าวมาในหัวข้อที่ 3.1 ผลการวัดสเปกตรัมแสดงดังรูปที่ 4.3-4.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.3 สเปกตรัมของแอลอิตีสน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ที่กระแสไบอัส 10 ไมโครแอมป์

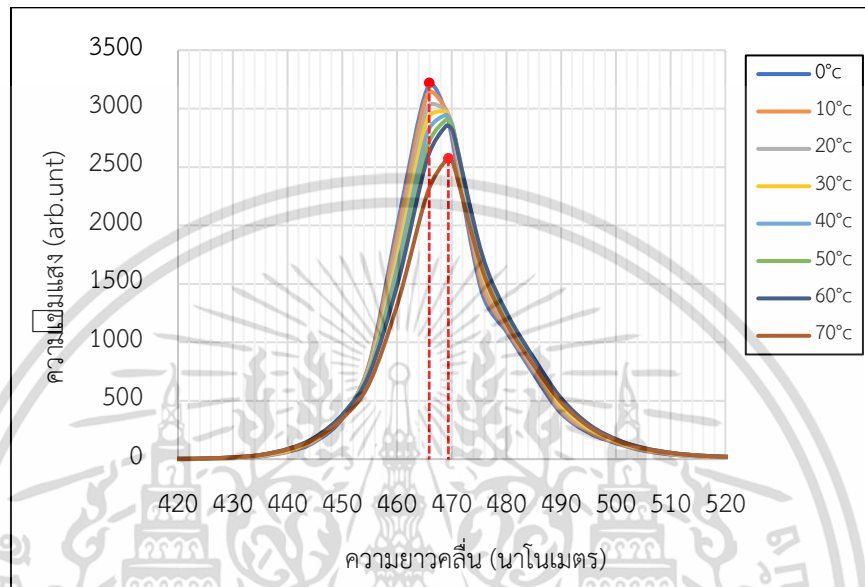
รูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงของแอลอิตีสน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 10 ไมโครแอมป์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0-70 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงจะลดลง และมีพิคการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นจาก 467.31 เป็น 469.06 นาโนเมตร เป็นการเพิ่มความยาวคลื่นแบบ Redshift โดยเปลี่ยนแปลงไป 1.75 นาโนเมตร



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมของแอลอิตีสน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ที่กระแสไบอัส 100 ไมโครแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 100 ไมโครแอมป์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0-70 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงจะลดลง และมีพีคการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นจาก 466.72 เป็น 469.06 นาโนเมตร เป็นการเพิ่มความยาวคลื่นแบบ Redshift โดยเปลี่ยนแปลงไป 2.34 นาโนเมตร



รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของแอลอีดีสีน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส ที่กระแสไบอัส 1000 ไมโครแอมป์

รูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นการเปลี่ยนแปลงของความเข้มแสงของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 1000 ไมโครแอมป์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0-70 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงจะลดลง และมีพีคการเปล่งแสงเพิ่มขึ้นจาก 465.56 เป็น 469.06 นาโนเมตร เป็นการเพิ่มความยาวคลื่นแบบ Redshift โดยเปลี่ยนแปลงไป 3.5 นาโนเมตร

จากกราฟแสดงให้เห็นว่าค่าความเข้มแสงของแอลอีดีที่กระแสไบอัส 10-1000 ไมโครแอมป์ ในช่วงอุณหภูมิ 0-70 องศาเซลเซียส หลอดแอลอีดีจะมีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 430-520 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของแสงสีน้ำเงิน และมีพีคการเปล่งแสงสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 465.56 นาโนเมตร ถึง 469.06 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส ทั้งนี้สเปกตรัมการเปล่งแสงของแต่ละกระแสที่ไบอัสจะมีลักษณะคล้ายกันคือ เมื่อกระแสไบอัสเพิ่มขึ้น ความเข้มแสงจะเพิ่มขึ้นตาม และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลทำให้ค่าความเข้มแสงของแอลอีดีลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [5-8] การลดลงของความเข้มแสงนี้อาจมีสาเหตุจากปัจจัยต่างๆ เช่น การรวมตัวกันแบบของอิเล็กตรอนและโฮลแบบไม่เปล่งแสง การรวมตัวกันแบบของอิเล็กตรอนและโฮลที่พื้นผิว การสูญเสียพาหะจากบริเวณที่พาหะเกิดการรวมตัวกัน (active region) เป็นต้น [7-8] โดยสรุปได้ดังตาราง

ที่ 4-2
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-2 ความยาวคลื่นของแอลอีดีที่กระแส 10, 100, และ 1000 ไมโครแอมป์

Temperature (°C)	λ peak (nm)		
	10 μ A	100 μ A	1000 μ A
0	467.31	466.72	465.56
10	467.89	466.72	465.56
20	467.31	468.47	468.47
30	467.89	468.47	468.47
40	468.47	468.47	468.47
50	468.47	468.47	468.47
60	469.06	468.47	469.06
70	469.06	469.06	469.06

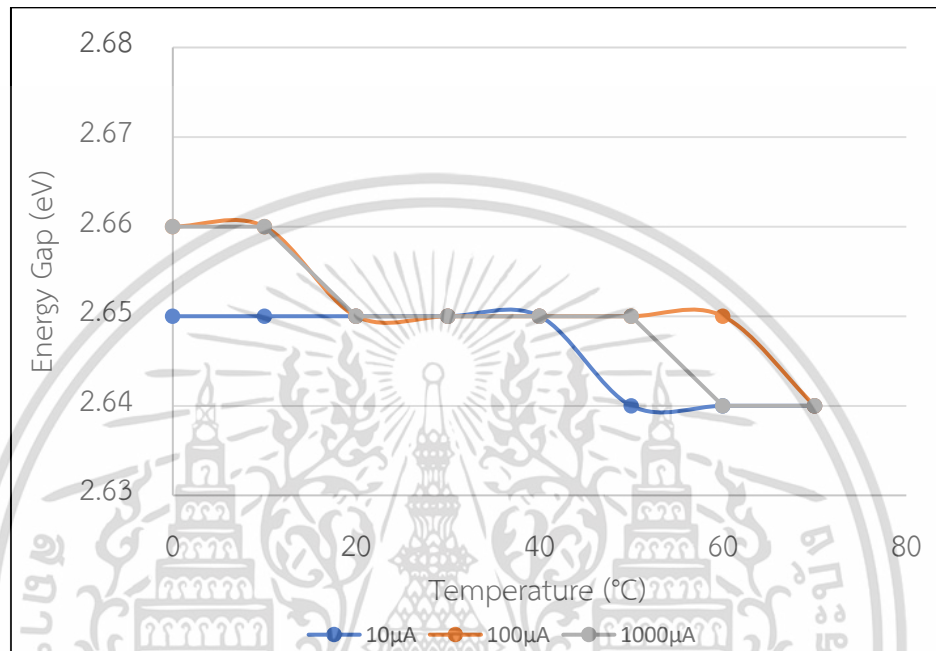
การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าช่องว่างพลังงาน (E_g) สามารถทำได้โดยการนำค่าความยาวคลื่นของแอลอีดีสีน้ำเงินที่ได้จากการวัดสเปกตรัมแสงแสดงในตารางที่ 4.2 มาคำนวณหา E_g โดยใช้สมการที่ (1) คำนวณ โดยค่า E_g ของแอลอีดีสีน้ำเงินที่ไบอัสกระแส 10 - 1000 ไมโครแอมป์ แสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4-3 ค่าช่องว่างพลังงานของแอลอีดีที่กระแส 10, 100, และ 1000 ไมโครแอมป์

Temperature (°C)	10 μ A		100 μ A		1000 μ A	
	wavelength (nm)	E_g (eV)	wavelength (nm)	E_g (eV)	wavelength (nm)	E_g (eV)
0	467.31	2.65	466.72	2.66	465.56	2.66
10	467.89	2.65	466.72	2.66	465.56	2.66
20	467.31	2.65	468.47	2.65	468.47	2.65
30	467.89	2.65	468.47	2.65	468.47	2.65
40	468.47	2.65	468.47	2.65	468.47	2.65
50	468.47	2.65	468.47	2.65	468.47	2.65
60	469.06	2.64	468.47	2.65	469.06	2.64
70	469.06	2.64	469.06	2.64	469.06	2.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้อมูลในตารางที่ 4-3 แสดงให้เห็นว่าค่า E_g ที่ได้จากกระแสไบอัสที่ในช่วง 10 ถึง 1,000 μA ไม่แตกต่างกันมาก นอกจากนี้ ค่า E_g จะลดลงเล็กน้อยเมื่ออุณหภูมิของแอลอีดีเพิ่มขึ้นจาก 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส ในการเปรียบเทียบค่า E_g ที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่า E_g ทางทฤษฎีของแอลอีดีสีน้ำเงิน สามารถหาได้โดยคำนวณ E_g จากสมการที่ (2)



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานและอุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงที่กระแส 10, 100 และ 1000 ไมโครแอมป์

จากรูปที่ 4.6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าช่องว่างพลังงานและอุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงที่กระแสไบอัส 10, 100 และ 1000 ไมโครแอมป์ จะเห็นได้ว่าเมื่ออุณหภูมิของไดโอดเปล่งแสงเพิ่มจาก 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส ส่งผลทำให้ค่าช่องว่างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงลดลงเล็กน้อย โดยที่กระแส 10 ไมโครแอมป์ ค่าช่องว่างพลังงานจะอยู่ที่ 2.65 eV และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 50 องศาเซลเซียส ค่าช่องว่างพลังงานจะลดลงเหลือ 2.64 eV ที่กระแส 100 ไมโครแอมป์ ค่าช่องว่างพลังงานจะอยู่ที่ 2.66 eV และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 20 องศาเซลเซียส ค่าช่องว่างพลังงานจะลดลงเหลือ 2.65 eV และลดลงเหลือ 2.64 eV เมื่อถึงอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ที่กระแส 1000 ไมโครแอมป์ ค่าช่องว่างพลังงานจะอยู่ที่ 2.66 eV และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 20 องศาเซลเซียส ค่าช่องว่างพลังงานจะลดลงเหลือ 2.65 eV และลดลงเหลือ 2.64 eV เมื่อถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

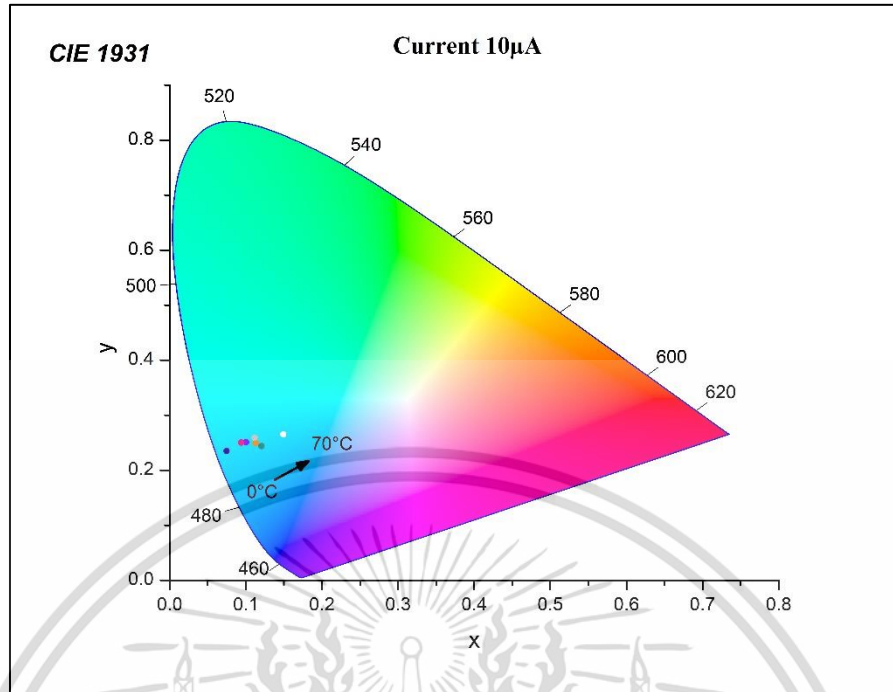
ตารางที่ 4-4 ค่าช่องว่างพลังงานของแอลอีดีทางทฤษฎีและการทดลองที่กระแส 100 ไมโครแอมป์

Temperature (°C)	E_g (Theory)	E_g (Experiment)	Percentage Error (%)
0	2.71	2.66	1.8
10	2.70	2.66	1.5
20	2.69	2.65	1.5
30	2.68	2.65	1.1
40	2.67	2.65	0.7
50	2.66	2.65	0.4
60	2.65	2.65	0.0
70	2.64	2.64	0.0

จากตารางที่ 4-4 จะเห็นว่าค่า E_g ทางทฤษฎีและการทดลองของแอลอีดีสีน้ำเงินจะลดลงเมื่ออุณหภูมิของแอลอีดีเพิ่มขึ้น ในช่วงอุณหภูมิตั้งแต่ 0 ถึง 40 °C ค่า E_g ทางทฤษฎีจะสูงกว่าค่าการทดลองและมีเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนอยู่ที่ 1.8-0.7% ตามลำดับ ในช่วงอุณหภูมิสูงตั้งแต่ 50 ถึง 70 °C ค่าทั้งสองจะสอดคล้องใกล้เคียงกัน โดยมีเปอร์เซ็นต์คลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.4-0.0%

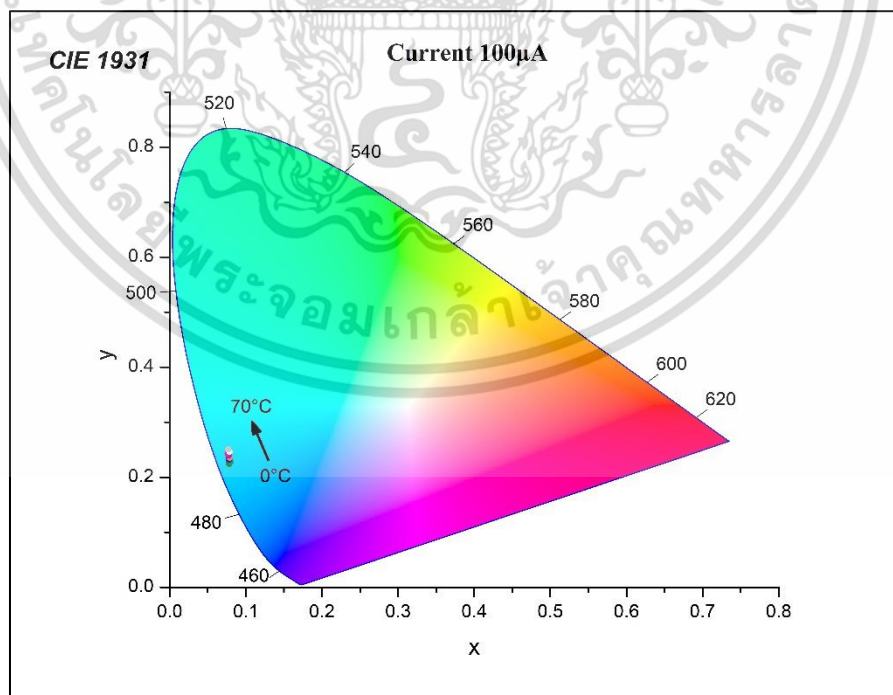
4.3 ผลการวิเคราะห์ค่าสี X Y Chromatic ของแอลอีดีที่อุณหภูมิต่างๆ

การวิเคราะห์ค่าสี X Y Chromatic ของแอลอีดี ผู้วิจัยได้นำผลการวัดสเปกตรัมที่ได้จากหัวข้อ 4.2 มาวิเคราะห์เพื่อหาความแตกต่างของเฉดสี เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 0-70 องศาเซลเซียส โดยใช้เทคนิค CIE 1931 ที่ได้ระบุไว้ในหัวข้อ 3.3 มาใช้ในการวิเคราะห์ ผลจากการนำสเปกตรัมมาวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.6-4.8



รูปที่ 4.7 CIE Chromaticity ของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 10 ไมโครแอมป์

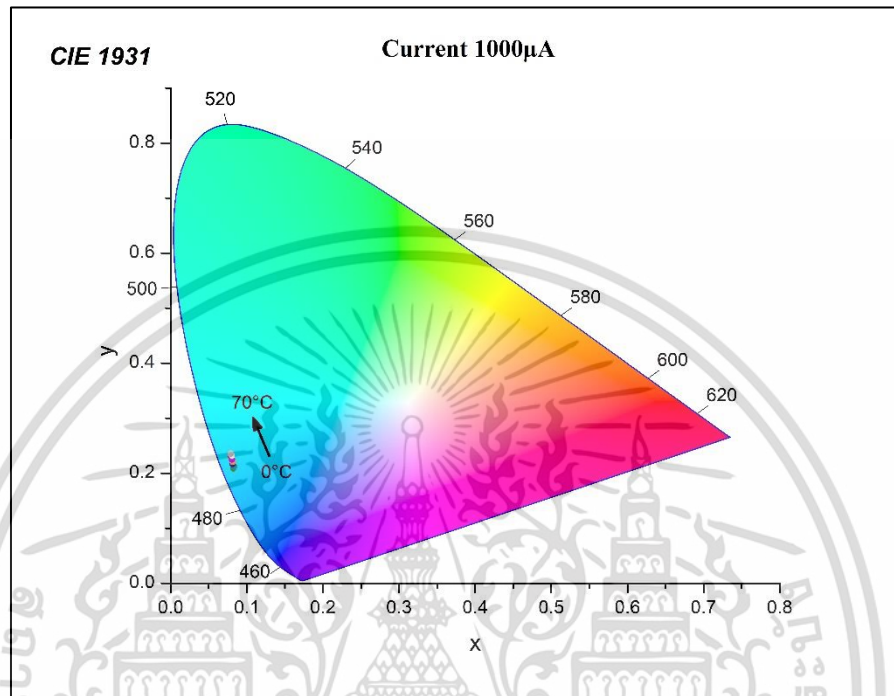
รูปที่ 4.7 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเขตสีของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 10 ไมโครแอมป์ ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0 – 70 องศาเซลเซียส จากภาพแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของเขตสีของแอลอีดีที่มีแนวโน้มสว่างมากขึ้น



รูปที่ 4.8 CIE Chromaticity ของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 100 ไมโครแอมป์

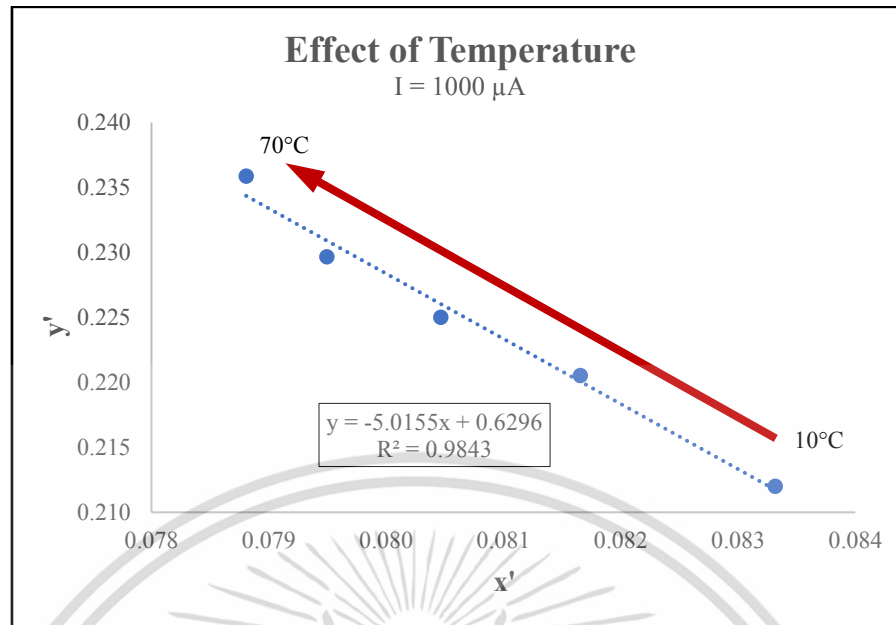
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 4.8 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 100 ไมโครแอมป์ ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0 – 70 องศาเซลเซียส จากภาพแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของเฉดสีของแอลอีดีที่มีแนวโน้มสว่างมากขึ้น



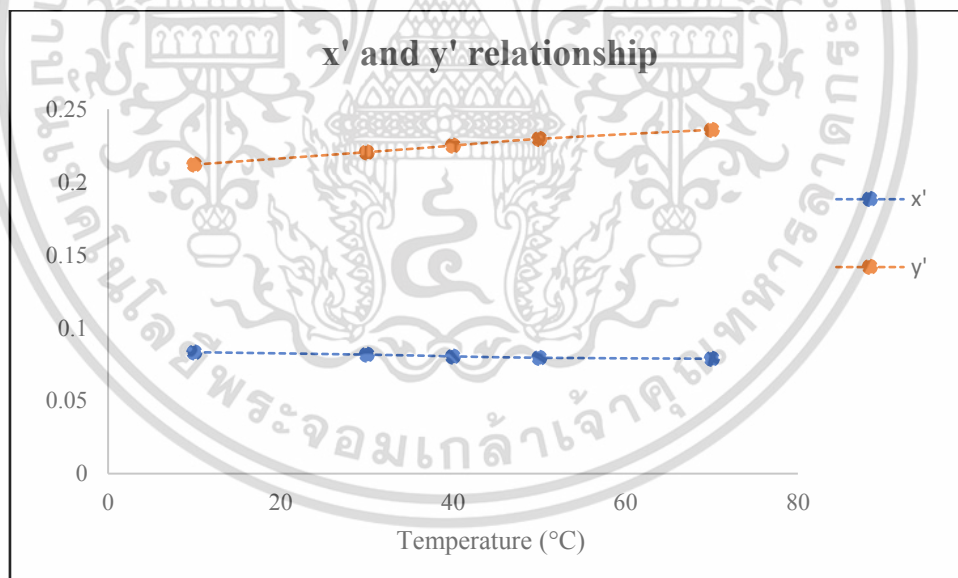
รูปที่ 4.9 CIE Chromaticity ของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 1000 ไมโครแอมป์

รูปที่ 4.9 แสดงการเปลี่ยนแปลงของเฉดสีของแอลอีดีสีน้ำเงินที่กระแสไบอัสคงที่ 1000 ไมโครแอมป์ ที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 0 – 70 องศาเซลเซียส จากภาพแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของเฉดสีของแอลอีดีที่มีแนวโน้มสว่างมากขึ้น



รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่าง x' และ y' ที่กระแสไบอัสคงที่ 1000 ไมโครแอมป์

รูปที่ 4.10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x' และ y' ที่กระแสไบอัสคงที่ 1000 ไมโครแอมป์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า x' มีแนวโน้มลดลง ในทางตรงข้าม y' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่าง x' และ y' ที่อุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง x' และ y' ที่อุณหภูมิ 0 – 70 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง x' และ y' เป็นแบบผกผันกัน คืออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ค่า x' มีแนวโน้มลดลง ในทางตรงกันข้ามค่า y' มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปภาพที่ 4.7-4.11 สามารถนำค่า x' และ y' มาวิเคราะห์หาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลข โดยใช้สมการที่ (12) โดยค่าความแตกต่างของสีที่คำนวณ แสดงดังตารางที่ 4-5

ตารางที่ 4-5 ค่าความแตกต่างของสีที่กระแสดังที่ใดๆ เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนจาก 0 องศาเซลเซียส เป็น 70 องศาเซลเซียส

Temperature (°C)	10(μ A)		100(μ A)		1000(μ A)	
	0	70	0	70	0	70
L*	30.04	37.77	742.27	800.94	1076.47	1104.21
a*	-150.46	-126.70	-2070.71	-2382.44	-2750.47	-3128.21
b*	-153.79	-116.46	-2479.34	-2102.90	-4076.03	-3294.26
ΔE	44.92		492.26		868.69	

ตารางที่ 4-5 แสดงความแตกต่างของเฉดสีของแอลอีดีที่กระแสดังที่ 10 – 1000 ไมโครแอมป์แบบเป็นตัวเลข จะเห็นได้ว่าเมื่อกระแสเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าเฉดสีมีความแตกต่างเพิ่มขึ้นจาก 44.92 เป็น 868.69 การเปลี่ยนแปลงของกระแสไบอัสนั้นส่งผลต่อค่าความแตกต่างของสีแอลอีดีได้ โดยการปรับกระแสไบอัสเพิ่มขึ้นจะทำให้พลังงานที่ถูกส่งเข้าไปภายในสารกึ่งตัวนำเปลี่ยนไปและมีผลต่อรวมตัวกันของอิเล็กตรอนในชั้น conduction band และโฮลที่ชั้น valance band ผลลัพธ์ของการเปลี่ยนแปลงนี้ทำให้ค่าความแตกต่างของสีเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนำเสนอชุดทดลองสำหรับศึกษาสมบัติทางแสงของหลอดแอลอีดีที่อุณหภูมิสูง เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ซึ่งลงทะเบียนเรียนรายวิชาปฏิบัติการโครงสร้างของอะตอมและฟิสิกส์โซลิตสเทท ชุดทดลองที่จัดเตรียมสามารถให้ความร้อนกับหลอดแอลอีดีผ่านโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถทำความร้อนให้กับสิ่งประดิษฐ์ได้จากอุณหภูมิห้อง 28 องศาเซลเซียส ถึง 114 องศาเซลเซียส เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง 1-12 โวลต์ และเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ 12 โวลต์ พบว่าสามารถทำความร้อนได้ 114 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 300 วินาที และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 0.91 องศาเซลเซียส/วินาที ในช่วงเวลา 0-60 วินาที ผลการวัดสเปกตรัมของแสงจากหลอดแอลอีดีสีน้ำเงินที่อุณหภูมิ 0 ถึง 70 องศาเซลเซียส จะเห็นการลดลงของความเข้มแสงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดการเลื่อนของพีคไปยังย่านความยาวคลื่นที่สูงขึ้น (Red shift) ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอุณหภูมิมิผลต่อความเข้มแสงของหลอดแอลอีดี สาเหตุเกิดจากคุณสมบัติทางอิเล็กทรอนิกส์ของวัสดุสารกึ่งตัวนำ (p-n junction) เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานมากขึ้นและสามารถ recombination กับโฮลได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามค่าความเข้มแสงของแอลอีดีที่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอาจมีความแตกต่างกันไปตามสมบัติและวัสดุของแอลอีดีและอาจมีการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อนขึ้น ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและเงื่อนไขการทดสอบที่ใช้ จากการนำข้อมูลการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสงมาคำนวณและวิเคราะห์อิทธิพลของอุณหภูมิต่อค่าช่องว่างพลังงานของไดโอดเปล่งแสงพบว่า อุณหภูมิมิผลต่อค่าช่องว่างพลังงาน (energy band gap) ของไดโอดเปล่งแสง จากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิไดโอดเปล่งแสงเพิ่มสูงขึ้น ค่าช่องว่างพลังงานของไดโอดจะลดลง ผลการวัดสเปกตรัมของแสงจากไดโอดเปล่งแสงสีน้ำเงินที่กระแสไบอัส 10 ถึง 1000 ไมโครแอมป์ พบว่ากระแสไบอัสมีผลต่อค่าความเข้มแสงของไดโอดเปล่งแสง โดยเมื่อไบอัสกระแสเพิ่มขึ้น ค่าความเข้มแสงของไดโอดเปล่งแสงจะเพิ่มขึ้น ผลของกระแสไบอัสที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลต่อเกณฑ์ของไดโอดเปล่งแสง เมื่อกระแสไบอัสเพิ่มขึ้น ค่าเกณฑ์มีแนวโน้มสว่างมากขึ้น โดยมีค่าความแตกต่างของสีที่กระแส 10, 100 และ 1000 ไมโครแอมป์ อยู่ที่ 44.92, 492.26 และ 868.69 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.2 ข้อเสนอแนะ

ในขั้นตอนการติดตั้งอุปกรณ์สำหรับวัดสเปกตรัมแสงที่อุณหภูมิต่างๆ เนื่องจากในงานวิจัยได้นำ Thermocouple Type K มายึดติดกับฐานของ LED โดยยึดด้วยวัสดุทนความร้อน(สติ๊กเกอร์พอยล์) โดยตรง ซึ่งอาจทำให้อุณหภูมิถูกรบกวนด้วยอุณหภูมิของสภาพแวดล้อม แนะนำให้ออกแบบการวัดอุณหภูมิในระบบปิด เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำของอุณหภูมิ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sze, S. M. and Kwok, K. Ng. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd. Canada : John Wiley & Sons, Inc.
- [2] Kittel, C. 2005. *Introduction to solid state physics*. 8th. U.S. : John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Hummel, R. E. 2001. *Electronic Properties of Materials*. 3rd. Springer
- [4] Vishay Intertechnology, Inc. 2019. Dome Lens SMD LED.
- [5] Petit, M. Michez, L. Raimundo, J. M. Dumas, P. 2015. “Electrical and optical measurements of the bandgap energy of a light-emitting diode” *Physics Education*. DOI: 10.1088/0031-9120/51/2/025003.
- [6] Wagner, E. P. 2016. Investigating Bandgap Energies, Materials, and Design of Light Emitting Diodes. *Journal of Chemical Education*. 93 : 1289–1298
- [7] Stuart, T. 2018. Determination of Chromaticity Coordinates and Bandgaps of III-V LEDs Using Electroluminescence Spectroscopy. *Edinburgh Instruments Ltd*.
- [8] Sai Pan, Chenhong Sun, Yugang Zhou, Wei Chen, Rong Zhang and Youdou Zheng. 2020. Investigation of the Electroluminescence Mechanism of GaN-Based Blue and Green Light-Emitting Diodes with Junction Temperature Range of 120–373 K. *applied sciences*. 10 : 1-13
- [9] อัจฉรา ปัญญา. 2014. รางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ประจำปี พ.ศ. 2557 (ค.ศ. 2014): LED สีส้มเงิน. *Thai J. Phys.* 31 : 1-6
- [10] ททัชนก หมั่นกล้า. 2556. พลังหลอดไฟ LED (Light emitting diode). *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*.
- [11] สืบค้นเมื่อ 12 กันยายน 2564. Light-emitting diode
[Online]. Available : [Light-emitting diode - New World Encyclopedia](#)
- [12] สืบค้นเมื่อ 12 กันยายน 2564
[Online]. Available : [VLDK1235G-08 Vishay, LED, Amber, SMD | Farnell DE](#)
- [13] Reynolds, K. J. Kock, J. P. D. Tarassenko, L. and Moyle, J. T. B. 1991. Temperature Dependence of LED and Its Theoretical Effect on Pulse Oximetry. *British Journal of Anaesthesi*. 67 : 638-643.
- [14] Varshni, Y.P. 1967. Temperature Dependence of the Energy Gap in Semiconductors, *Physica*. 34 : 149-154.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [15] สืบค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2564. ทฤษฎีและหลักการ.
[Online]. Available : [ch2.pdf \(siam.edu\)](#)
- [16] Saleh, A-S. Hamed, H. S. 2019. “Experimental investigation of using thermoelectric cooling for computer chips” *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2019.03.009>
- [17] เจนจินดา ไชยวงศา, ณพวีร์ หงส์วิเศษชัย, ยศวดี ต๊ะศรี. 2560. “ชุดทำความร้อนและความเย็นด้วยเทอร์โมอิเล็กทริก”..ปริญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [18] อรุณรัตน์ สันฐิติกวินสกุล. 2563. สเปกโทรสโกปีสำหรับเคมีอินทรีย์. มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.
- [19] M. J. Delgado-González, Y. Carmona-Jiménez, M. C. Rodríguez-Dodero, and M. V. García-Moreno. 2018. Color Space Mathematical Modeling Using Microsoft Excel. *Journal of Chemical Education*. 95 : 1885–1889
- [20] วลัยกร นิตยพัฒน์. 2558. วิทยาศาสตร์ของสี. *คหกรรมศาสตร์ มศว*. 13(1) : 6-11
- [21] ภัคนัย ทองท้อมพร. สืบค้นเมื่อ 22 พฤษภาคม 2564. การมองเห็นและการวัดสี
[Online]. Available :
- [22] Stuart, T. 2018. Time-Resolved Electroluminescence Spectroscopy of a White Light Emitting Diode. *Edinburgh Instruments*.
- [23] สืบค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2564. Planckian locus in the CIE 1931 chromaticity diagram
[Online]. Available : [Planckian locus - Wikipedia](#)
- [24] Wendy Luedtke. 2019. Chromaticity Diagrams
[Online]. Available : [LED FAOs \(Part 3\): Chromaticity Diagrams – et cetera... \(etconnect.com\)](#)
- [25] เจริญชัย เหลืองอ่อน. 2553. “การวัดสีด้วยเทคนิค UV-Vis-Nir Spectrophotometry” ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ
- [26] สืบค้นเมื่อ 16 พฤษภาคม 2564. CIE LAB 1976 color space.
[Online]. Available : [CIE LAB 1976 color space. | Download Scientific Diagram \(researchgate.net\)](#)
- [27] Muna E. Raypah Mutharasu Devarajan, and Fauziah Sulaiman. 2017. Modeling Spectra of Low-Power SMD LEDs as a Function of Ambient Temperature. *IEEE Trans.Ind. Electron*. 64 : 1180-1186.
- [28] สืบค้นเมื่อ 18 กรกฎาคม 2564.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [Online]. Available : [12V 240W Peltier Chip Semiconductor Cooling Plate Refrigerator Cooling Plate Rodalind \(ainfotechph.top\)](http://12V_240W_Peltier_Chip_Semiconductor_Cooling_Plate_Refrigerator_Cooling_Plate_Rodalind@ainfotechph.top)
- [29] Ando Junior, O.H., Calderon N.H. and Souza, S.S. 2018. Characterization of a Thermoelectric Generator (TEG) System for Waste Heat Recovery. *Energies*, 11(6), 1555.
- [30] Sconza A. and Torzo G., 2000. An undergraduate laboratory experiment for measuring the energy gap in semiconductors, *European Journal of Physics*, 10, 123-126.
- [31] Precker J.W. and da Silva M.A., 2002. Experimental estimation of the band gap in silicon and germanium from the temperature–voltage curve of diode thermometers, *American Journal of Physics*, 70 (11), 1150-1153.
- [32] Low J.J., Kreider M.L., Pulsifer D.P., Jones A.S. and Gilani T.H., 2009 Band gap energy in silicon, *American Journal of Undergraduate Research*, 8, 29-34.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566

**การทดลองสำหรับศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสเปกตรัม
การเปล่งแสงหลอดแอลอีดี**
**Experiment for Study Effect of Temperature Dependence of
Spectrum in LED**

เบญจวรรณ อุ่นผูก^{1*} ภานุพล โขลกกระทอก¹ นลิตา สว่างจิตต์¹ ชวนนท์ มะโน¹ และ กัทริยา ดำรงศักดิ์¹
Benjawan Unpook¹ Bhanupol Klonkratog¹ Nalita Sawangjit¹ Chawanon Mano¹ and Pattareeya Damrongsak¹
¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
¹Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang
วันที่ส่งบทความ : 15 สิงหาคม 2565 วันที่แก้ไขบทความ : 19 กันยายน 2565 วันที่ตอบรับบทความ : 13 มีนาคม 2566
Received: 15 August 2022, Revised: 19 September 2022, Accepted: 13 March 2023

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบการทดลองสำหรับศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสเปกตรัมการเปล่งแสงหลอดแอลอีดี และเพื่อศึกษาความเที่ยงตรงของชุดทดลองที่จัดสร้างขึ้น ในการทดลองจะใช้หลอดแอลอีดีสีน้ำเงินขนาด 1 วัตต์เป็นตัวอย่าง ใช้ชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกขนาด 120 วัตต์ ในการให้ความร้อนกับแหล่งกำเนิดแสง ใช้สเปกโตรมิเตอร์ในการวัดสเปกตรัมของแอลอีดี ผู้วิจัยได้นำชุดทดลองมาใช้ในวิชาปฏิบัติการสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ หลักสูตรวิทยาศาสตร์บัณฑิต (สาขาฟิสิกส์ประยุกต์) ผลการวิจัยพบว่าระบบที่จัดเตรียมสามารถทำความร้อนให้กับสิ่งประดิษฐ์ได้ และเมื่ออุณหภูมิของหลอดแอลอีดีเพิ่มขึ้นจาก 30 ถึง 70 องศาเซลเซียส หลอดแอลอีดีจะมีสเปกตรัมการเปล่งแสงลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับทฤษฎี

คำสำคัญ : ระบบการทดลอง, โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก, แอลอีดี

Abstract

The purpose of this research was to develop an experimental system to study the influence of heat on the emission spectrum of LED and to study the precision of the developed system. In this study, a blue LED chip (1 Watt) was used as a sample. A 120 Watt thermoelectric (TE) module was used as a heater for the light source. A spectrometer was used to measure the emission spectrum of the LED. The developed system was used in

*ผู้ติดต่อ E-mail address: 62605100@kmitl.ac.th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนกรกฎาคม-มิถุนายน 2566

semiconductor devices laboratory subject in Bachelor of science (Applied Physics program). The results of the study showed that as the temperature increases from 30 to 70 °C, the emission spectrum of LED tends to decrease and agree with the theory.

Keywords: Experimental system, Thermoelectric module, Light emitting diode

1. บทนำ

สมบัติของวัสดุและสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งเป็นหัวข้อสำคัญการศึกษาเรื่องฟิสิกส์ของแข็งและฟิสิกส์สารกึ่งตัวนำ ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการออกแบบและสร้างวงจรรวมอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ มากมาย ซึ่งการจัดการเรียนการสอนเพื่อให้ผู้เรียนสามารถเข้าใจเนื้อหาทางทฤษฎีได้อย่างเห็นภาพชัดเจนนั้น จำเป็นที่จะต้องมีการจัดการเรียนการสอนภาคปฏิบัติเพื่อให้ผู้เรียนเข้าใจและเห็นปรากฏการณ์ที่ผู้สอนต้องการจะสื่อได้อย่างชัดเจน อีกทั้งจะช่วยให้ผู้เรียนได้ลงมือทำ ผึกทักษะการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ได้ออกแบบการทดลองเพื่อเก็บและวิเคราะห์ผล รวมถึงได้ฝึกทักษะการทำงานเป็นกลุ่ม

วิชาปฏิบัติการโครงสร้างของอะตอมและฟิสิกส์โซลิตสแตท เป็นวิชาที่มีการจัดการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรี ให้กับนักศึกษาชั้นปีที่ 3 หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งรายวิชานี้ได้กำหนดผลการเรียนรู้ที่คาดหวังของหัวข้อหนึ่งคือเพื่อให้ นักศึกษาอธิบายสมบัติทางทวงแสงของหลอดแอลอีดีที่อุณหภูมิสูงได้ ซึ่งหลอดแอลอีดีหรือไดโอดเปล่งแสงเป็นอุปกรณ์ที่สร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำ ถูกนำมาใช้แทนหลอดไฟเพื่อให้ความสว่างในอาคาร ถนน และงานด้านต่าง ๆ สิ่งประดิษฐ์นี้กำเนิดแสงด้วยกลไก Electroluminescence กล่าวคือเมื่อมีกระแสไฟฟ้าในสิ่งประดิษฐ์ จะทำให้สามารถเปล่งแสงออกมาได้ [1] ซึ่งความสว่างและสีของแอลอีดีนั้นแปรผันตามอุณหภูมิแวดล้อม และจากทฤษฎีเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น สิ่งประดิษฐ์จะมีความเข้มแสงลดลง [2]-[3] ดังนั้นเพื่อให้ นักศึกษามีความเข้าใจในพฤติกรรมของการเปล่งแสงของสิ่งประดิษฐ์เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนแปลง อีกทั้งการทำกิจกรรมการเรียนการสอนบรรลุวัตถุประสงค์ จำเป็นจะต้องมีสื่อการสอนเพื่อให้ นักศึกษาได้เรียนรู้ และช่วยให้นักศึกษามีความเข้าใจในเนื้อหาและมีทักษะด้านการปฏิบัติการที่ดีขึ้น

อย่างไรก็ตามปัญหาหนึ่งของการจัดการเรียนการสอนในรายวิชปฏิบัติ จะเกี่ยวข้องกับการจัดหาชุดทดลองที่เหมาะสมสำหรับการเรียนรู้ในหัวข้อที่เกี่ยวข้องกับรายวิชา ซึ่งจะต้องอาศัยเวลาในการจัดซื้อจัดหาชุดทดลองที่ตรงกับความต้องการ อีกทั้งยังใช้งบประมาณที่สูงเพราะชุดทดลองส่วนใหญ่จะต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศ ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการสร้างนวัตกรรมชุดทดลองสำหรับใช้ในการเรียนการสอน เพื่อให้นักศึกษาใช้ในการเรียนรู้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการมีชุดทดลองที่อยู่ในสภาพพร้อมใช้งานจะส่งผลให้เกิดแรงจูงใจในการเรียนรู้ ทำให้ผู้เรียนมีความสนใจในการทดลอง และได้ผลการทดลองอย่างสะดวกและรวดเร็ว

งานวิจัยนี้นำเสนอชุดทดลองสำหรับศึกษาสมบัติทางทวงแสงของหลอดแอลอีดี สามารถปรับเปลี่ยนอุณหภูมิของแท่นวางสิ่งประดิษฐ์เพื่อศึกษาสมบัติสเปกตรัมการเปล่งแสงของหลอดภายใต้อุณหภูมิที่ตรงที่กำหนด โดยผู้วิจัยได้ทดลองนำชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกมาใช้เป็นส่วนประกอบในระบบ เพื่อให้ความร้อนกับหลอดแอลอีดี ทดแทนการใช้เตาให้ความร้อน ซึ่งจะสามารถควบคุมอุณหภูมิให้มีค่าคงที่ตามต้องการได้จากการปรับค่าแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโมดูล ร่วมกับการใช้สเปกโตรมิเตอร์ เพื่อวัด

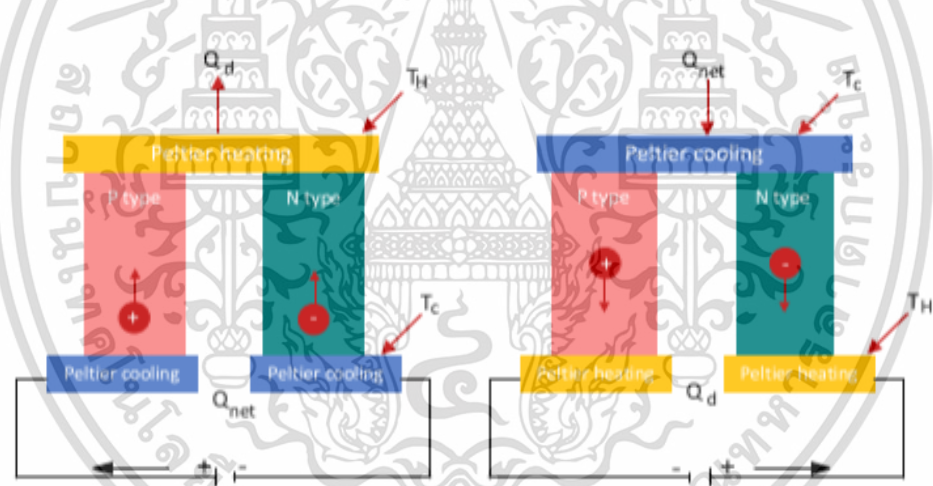
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สเปกตรัมความเข้มแสงของหลอด ชุดทดลองที่จัดเตรียมถูกศึกษาสมบัติการให้ความร้อนกับหลอดแอลดี ในช่วงอุณหภูมิต่าง ๆ และตรวจวัดสเปกตรัมแสงของหลอดว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎี ก่อนจะนำไปใช้ กับนักศึกษากลุ่มตัวอย่าง เพื่อทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำของระบบ

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก

โมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก (Thermoelectric module) เป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงาน ความร้อนให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือสามารถเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้เป็นพลังงานความร้อนได้ โครงสร้างของ โมดูลจะประกอบด้วยวัสดุสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ได้แก่ วัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (วัสดุ A) และวัสดุสารกึ่ง ตัวนำชนิดพี (วัสดุ B) มาประกอบกัน ดังรูปที่ 1 เมื่อจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับโมดูลจะทำให้เกิดความร้อน/ ความเย็นขึ้นที่บริเวณขั้วรอยต่อของวัสดุ เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า ปรากฏการณ์เพลเทียร์ (Peltier effect) โดยการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของอุณหภูมิจะขึ้นกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าดังแสดงในรูปที่ 1 (ก) โหมดทำความร้อน และ (ข) โหมดทำความเย็น



รูปที่ 1. โหมดการทำงานเทอร์โมอิเล็กทริก (ก) โหมดทำความร้อน (ข) โหมดทำความเย็น

อัตราการเกิดความร้อนที่รอยต่อของวัสดุ จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ (1)

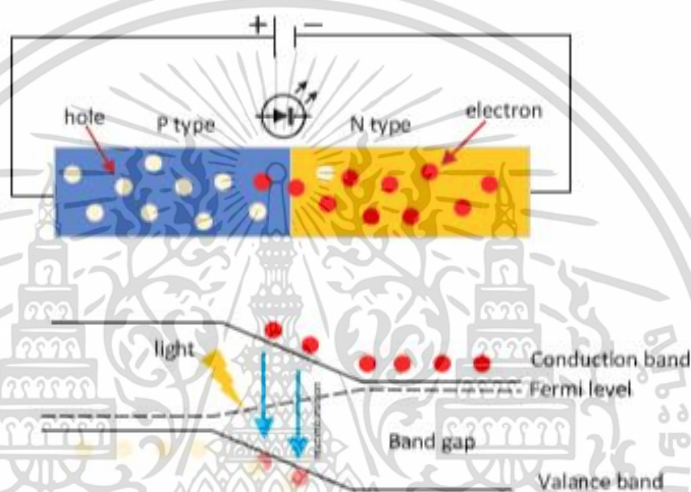
$$\frac{dQ}{dt} = (\Pi_A - \Pi_B)I \tag{1}$$

- เมื่อ $\frac{dQ}{dt}$ คืออัตราการเกิดความร้อนที่รอยต่อ
- Π_A และ Π_B คือสัมประสิทธิ์เพลเทียร์ของวัสดุ A และวัสดุ B
- I คือกระแส

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566

2.2 การเปล่งแสงของหลอดแอลอีดีและอิทธิพลของอุณหภูมิ

หลอดแอลอีดีเป็นสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถแปลงพลังงานไฟฟ้าให้ออกมาเป็นแสงสว่าง โดยอาศัยปรากฏการณ์ที่เรียกว่า อิเล็กโทรลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence) โดยทั่วไปแล้วสิ่งประดิษฐ์นี้จะสร้างจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพี มีโครงสร้างดังรูปที่ 2 เมื่อสิ่งประดิษฐ์ได้รับการไบอัสตรง กล่าวคือต่อไฟฟ้าขั้วบวกให้กับด้านพีและไฟฟ้าขั้วลบให้กับด้านเอ็นจะทำให้อิเล็กตรอนที่สามารถวิ่งข้ามรอยต่อจากสารชนิดเอ็นไปรวมกับโฮลในสารชนิดพี และคายพลังงานแสงออกมา



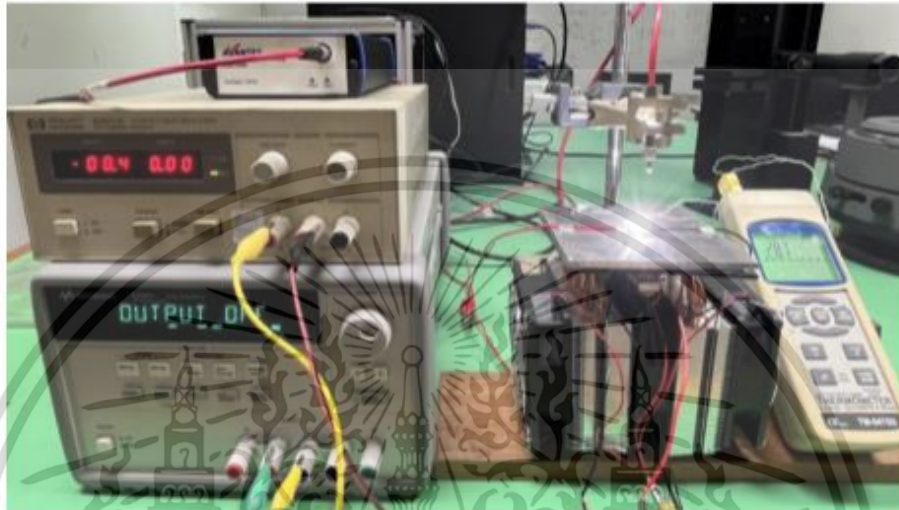
รูปที่ 2. โครงสร้างและพลังงานบริเวณรอยต่อ p-n Junction ของไดโอดที่จ่ายกระแสแบบ Forward biased

จากการทบทวนงานวิจัยพบว่า การเปล่งแสงของหลอดแอลอีดีจะขึ้นกับอุณหภูมิของสิ่งประดิษฐ์ โดยเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้ความเข้มแสงที่เปล่งออกมามีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจมีสาเหตุจากปัจจัยต่างๆ เช่น การรวมตัวกันแบบของอิเล็กตรอนและโฮลแบบไม่เปล่งแสงที่ระดับพลังงานระดับลึก (Non-radiative recombination via deep levels) การรวมตัวกันแบบของอิเล็กตรอนและโฮลที่พื้นผิว (Surface recombination) เป็นต้น [1]

ในการออกแบบชุดทดลอง ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตเนื้อหาในการเรียนการสอน และได้จัดสร้างชุดทดลองดังรูปที่ 3 ซึ่งระบบที่จัดสร้างจะประกอบด้วย

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566

ภาพระบบจริงที่จัดเตรียมขึ้นในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชุดทดลองสำหรับศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสเปกตรัมการเปล่งแสงหลอดแอลอีดี

ก่อนที่จะนำระบบไปใช้งานในการทดลอง ผู้วิจัยได้ศึกษาสมบัติการทำความร้อนของชุดทำความเย็นเทอร์โมอิเล็กทริกที่มีความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสอย่างไร รวมถึงได้ศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่นวางชิ้นงานเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าค่าต่าง ๆ เพื่อให้สามารถกำหนดช่วงเวลาที่จะวัดสเปกตรัมได้อย่างเหมาะสม

สำหรับการทดลองวัดสเปกตรัมการเปล่งแสงภายใต้อุณหภูมิต่าง ๆ มีขั้นตอนดังนี้

1. ติดตั้งหลอดแอลอีดีสีน้ำเงินบนแท่นวางชิ้นงานที่ทำจากวัสดุอลูมิเนียม
2. ติดตั้งเทอร์โมคัปเปิลบนแท่นวางสิ่งประดิษฐ์

3. ปรับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับโมดูลเพื่อควบคุมให้แท่นวางหลอดแอลอีดีมีอุณหภูมิคงที่ 30-70 องศาเซลเซียส เปลี่ยนแปลงทุก ๆ 10 องศาเซลเซียส

4. วัดสเปกตรัมแสงของหลอดแอลอีดีสีเมื่ออุณหภูมิมีค่า 30-70 องศาเซลเซียส

5. นำสเปกตรัมแสงที่อุณหภูมิต่าง ๆ มาพลอตกราฟเพื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงและวิเคราะห์ผลของความร้อนที่มีต่อการส่องสว่างของหลอดแอลอีดี

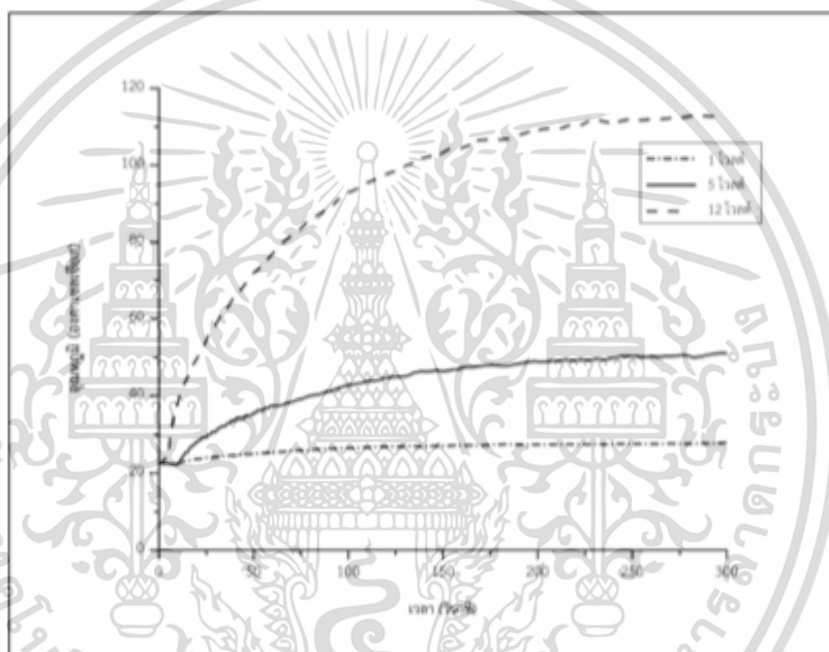
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของแท่งวางชิ้นงาน

ในการทดสอบว่าระบบวัดที่สร้างขึ้นนั้น สามารถทำความร้อนได้อุณหภูมิสูงสุดเท่าไร มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างไร และสามารถรักษาอุณหภูมิกคงที่ภายในเวลาเท่าไร เมื่อไม่ดูแลจ่ายไฟด้วยแรงดันไฟฟ้าคงที่ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 0-12 โวลต์ ผู้วิจัยจึงได้ทดลองวัดความความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิ โดยมีผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5. ตัวอย่างความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและอุณหภูมิที่แรงดันไฟฟ้า 1, 5 และ 12 โวลต์

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าแท่งทำความร้อนจะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นแบบไม่เป็นเชิงเส้น จะมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วง 0.05-0.91 องศาเซลเซียส/วินาที และมีแนวโน้มอุณหภูมิกคงที่ในช่วง 27-114 องศาเซลเซียสภายในเวลา 300 วินาที สรุปได้ดังตารางที่ 1

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566

ตารางที่ 1. การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่แรงดันไฟฟ้าคงที่ 1-12 โวลต์

แรงดันไฟฟ้า (V)	อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ (°C/s) ในช่วง 0-60วินาที	อุณหภูมิคงที่ (°C)
1	0.05	27.9 ±0.5
2	0.10	32.2 ±0.5
3	0.15	39.0 ±0.5
4	0.20	46.3 ±0.5
5	0.25	50.4 ±0.5
6	0.32	56.6 ±0.5
7	0.30	53.3 ±0.5
8	0.58	80.9 ±0.5
9	0.63	88.8 ±0.5
10	0.78	98.4 ±0.5
11	0.83	105.6 ±0.5
12	0.91	114.7 ±0.5

3.2 ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแท่งวางชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครล

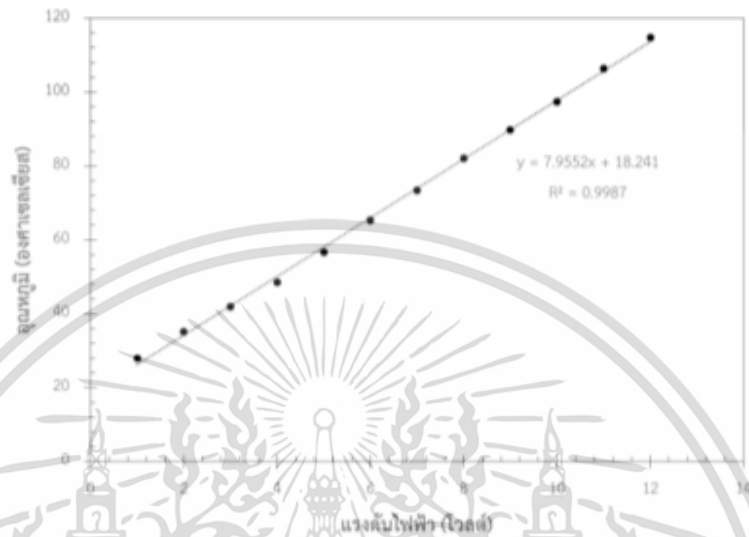
ในการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครลและความร้อนที่เกิดขึ้นที่บริเวณแท่งวางชิ้นงาน (T_w) ผู้วิจัยได้ทดลองจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ค่าต่าง ๆ ตั้งแต่ 1-12 โวลต์ ให้กับไมโครลเทอร์โมอิเล็กทริก โดยจ่ายแรงดันไฟบวกให้กับขั้วบวกของไมโครลและแรงดันไฟลบให้กับขั้วลบของไมโครล และบันทึกค่าอุณหภูมิที่คงที่ เพื่อนำมาพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้ากับอุณหภูมิ แสดงดังรูปที่ 6

ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับไมโครลเทอร์โมอิเล็กทริกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิของแท่งวางชิ้นงานเพิ่มสูงขึ้น มีความสัมพันธ์กันแบบเชิงเส้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย [5] และสอดคล้องกับสมการที่ (1) มีความสัมพันธ์ของแรงดันและอุณหภูมิดังสมการที่ (2)

$$T = 7.9552V + 18.241 \quad (2)$$

เมื่อ T คืออุณหภูมิของแท่งวางชิ้นงาน
 V คือแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับไมโครล

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566



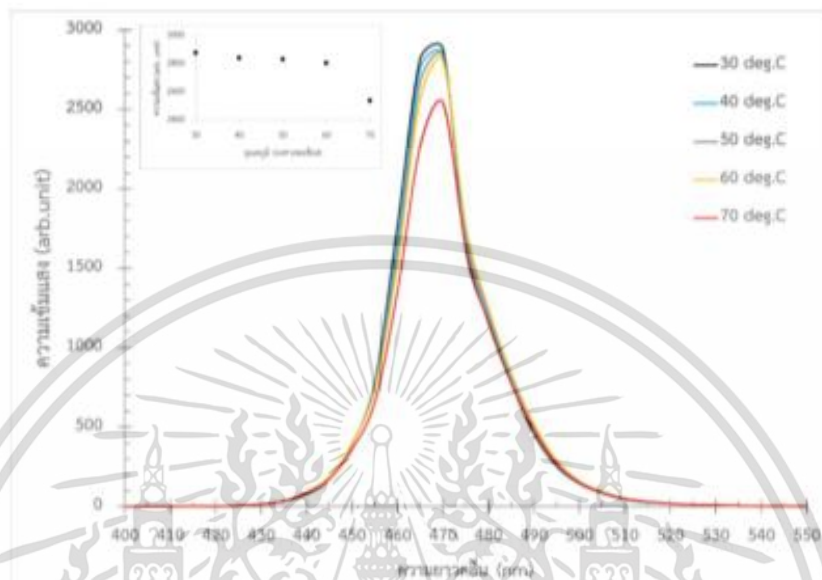
รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิของแท่งวางชิ้นงานกับแรงดันไฟฟ้าที่ใช้อัด

3.3 ผลการวัดการส่องสว่างของหลอดแอลอีดี

ในการทดลองวัดการส่องสว่างของหลอดแอลอีดี ผู้วิจัยได้กำหนดช่วงอุณหภูมิการศึกษาในช่วง 30-70 องศาเซลเซียส โดยจะใช้สมการความสัมพันธ์ที่ได้จากการทดลองในหัวข้อ 3.2 ช่วยในการกำหนดค่าแรงดันที่จ่ายให้กับโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก เพื่อให้หลอดที่ติดตั้งที่บริเวณแท่งวางชิ้นงานมีค่าคงที่ 30-70 องศาเซลเซียส ในการทดลองจะใช้หลอดแอลอีดีสีน้ำเงิน และใช้สเปกโตรมิเตอร์ในการวัดสเปกตรัมแสง ผลการวัดแสดงดังรูปที่ 7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566



รูปที่ 7. สเปกตรัมแสงของหลอดแอลอีดีสีน้ำเงินในช่วงอุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส

จากกราฟจะเห็นว่าหลอดแอลอีดีมีการเปล่งแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 430-520 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงของแสงสีน้ำเงิน มีที่การเปล่งแสงสูงสุดเพิ่มขึ้นจาก 466.72 นาโนเมตร ถึง 469.06 นาโนเมตร เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 30 องศาเซลเซียส ถึง 70 องศาเซลเซียส ความเข้มแสงของหลอดมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา [6]-[8] ซึ่งการลดลงของความเข้มแสงนี้อาจมีสาเหตุจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น การรวมตัวกันแบบของอิเล็กตรอนและโฮลแบบไม่เปล่งแสง การรวมตัวกันของอิเล็กตรอนและโฮลที่พื้นผิว การสูญเสียพาหะจากบริเวณที่พาหะเกิดการรวมตัวกัน (Active region) เป็นต้น [7]-[8]

3.4 ผลการทดสอบระบบกับกลุ่มตัวอย่าง

ผู้วิจัยได้นำชุดทดลองที่จัดเตรียมขึ้นไปใช้กับกลุ่มตัวอย่าง ซึ่งเป็นนักศึกษาระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ลงทะเบียนเรียนวิชา ปฏิบัติการโครงสร้างของอะตอมและฟิสิกส์โซลิตสเตท และนำผลการทดลองที่นักศึกษาส่งรายงานจำนวน 3 กลุ่ม มาวิเคราะห์หาความถูกต้อง แม่นยำของผลการวัดของระบบพบว่า

1. เมื่อให้นักศึกษาทดลองวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่แน่นอนข้างขึ้นงาน ผลการวัดจะมีความสอดคล้องและมีความสัมพันธ์ระหว่าง T-V ใกล้เคียงกัน มีสมการความสัมพันธ์สรุปดังตารางที่ 2 โดยในกลุ่มตัวอย่างที่ 1, 2 และ 3 ได้ค่า ความชันเป็น 7.4751, 7.5481 และ 7.526 ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับสมการที่ (1) จึงสามารถสรุปว่าระบบที่จัดสร้างนี้มีความถูกต้องและเชื่อถือได้

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566

ตารางที่ 2. การวัดหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิของนักศึกษากลุ่มตัวอย่าง

การทดลอง	สมการความสัมพันธ์ (T-V)
กลุ่ม 1	$y = 7.4751x + 19.372$ $R^2 = 0.9957$
กลุ่ม 2	$y = 7.5481x + 18.626$ $R^2 = 0.9969$
กลุ่ม 3	$y = 7.526x + 18.527$ $R^2 = 0.9963$



รูปที่ 8. ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าและอุณหภูมิที่พบวางชิ้นงานจากกลุ่มนักศึกษาตัวอย่าง

2. เมื่อให้นักศึกษาทดลองวัดสเปกตรัมแสงของหลอดแอลอีดีสีน้ำเงินที่อุณหภูมิ 30-70 องศาเซลเซียส พบว่าผลการวัดจะเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงของหลอดแอลอีดีลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 8 จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบที่จัดสร้างสามารถใช้ศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อสเปกตรัมการเปล่งแสงหลอดแอลอีดีได้จริง

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนำเสนอชุดทดลองสำหรับศึกษาสมบัติทางแสงของหลอดแอลอีดีที่อุณหภูมิสูง เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนในระดับปริญญาตรี ชั้นปีที่ 3 สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ ซึ่งลงทะเบียนเรียนรายวิชาปฏิบัติการโครงสร้างของอะตอมและฟิสิกส์โซลิตสเตรท ชุดทดลองที่จัดเตรียมสามารถให้ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
51

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 32 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2566

กับหลอดแอลอีดีผ่านโมดูลเทอร์โมอิเล็กทริก สามารถทำความร้อนให้กับสิ่งประดิษฐ์ได้จากอุณหภูมิห้อง (28 องศาเซลเซียส) ถึง 114 องศาเซลเซียส เมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าในช่วง 1-12 โวลต์ และเมื่อจ่ายแรงดันไฟฟ้าคงที่ 12 โวลต์ พบว่าสามารถทำความร้อนได้ 114 องศาเซลเซียส ภายในเวลา 300 วินาที และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ 0.91 องศาเซลเซียส/วินาที ในช่วง เวลา 0-60 วินาที ผลการวัดสเปกตรัมของแสงจากหลอดแอลอีดีสีน้ำเงินจะเห็นการลดลงของความเข้มแสงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น และเกิดการเลื่อนของพีคไปยังย่านความยาวคลื่นที่สูงขึ้นซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี ผลการทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำของระบบชุดทดลองจากกลุ่มตัวอย่างจำนวน 3 กลุ่ม พบว่าผลการวัดความสัมพันธ์ของอุณหภูมิและแรงดันไฟฟ้าของทั้ง 3 กลุ่มมีค่าใกล้เคียงกันแสดงให้เห็นว่าระบบมีความถูกต้องและแม่นยำ

เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] Sze, S.M. and Ng.K.K. 2007. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd, John Wiley & Sons Inc., United States of America.
- [2] Kittel, C. 2005. *Introduction to solid state physics*. 8th, John Wiley & Sons Inc, United States of America.
- [3] Hummel, R.E. 2001. *Electronic Properties of Materials*. 3rd, Springer Berlin, Heidelberg.
- [4] Saleh, A.S. and Saber, H.H. 2020. Experimental investigation of using thermoelectric cooling for computer chips. *Journal of King Saud University*, 32(5), 321-329.
- [5] AndoJunior, O.H., Calderon N.H. and Souza, S.S. 2018. Characterization of a Thermoelectric Generator (TEG) System for Waste Heat Recovery. *Energies*, 11(6), 1555.
- [6] Varshni Y.P. 1967. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors, *Physica*, 34(1), 149-154.
- [7] Titkov, I.E., Karpov, S.Y., Yadav, A., Zerova, V.L., Zolonas, M., Galler, B., Strassburg, M., Pietzonka, J., Lugauer, H.J. and Rafailov, E.U. 2014. Temperature-Dependent Internal Quantum Efficiency of Blue High-Brightness Light-Emitting Diodes. *IEEE Journal of Quantum-Electronics*, 50(11), 911-920.
- [8] Jeong, S.S. and Ko, J.H. 2012. Analysis of the spectral characteristics of white light-emitting diodes under various thermal environments. *Journal of Information Display*, 13(1), 37-42.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การระบุค่าเฉดสี

การระบุเฉดสีเป็นค่าตัวเลขได้มีการพัฒนาโดยองค์การนานาชาติเกี่ยวกับแสงและสีคือ International Commission on Illumination (CIE) วิธีการที่รู้จักกันแพร่หลายได้แก่ ระบบ Yxy ในปี ค.ศ. 1931 ซึ่งอยู่บนฐานค่า 3 ค่า xyz ที่นิยามโดย CIE และระบบ $L^*a^*b^*$ color space ในปี ค.ศ. 1976 ที่มีฐานจากทฤษฎีสีตรงข้าม ซึ่งสมมติว่าประสาทตามนุษย์รับรู้สีโดยมีคู่ตรงข้าม 3 คู่ ได้แก่

สว่าง (light)	มืด (dark)
แดง (red)	เขียว (green)
เหลือง (yellow)	น้ำเงิน (blue)

1. ระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ (CIELAB) และ CIELCH ระบบสี CIE $L^*a^*b^*$ หรือ CIELAB เป็นระบบการวัดสีที่คำนึงถึงองค์ประกอบ 3 ประการ คือ
 1. Light source คือ แหล่งกำเนิดแสง
 2. Color object คือ วัตถุที่มีสี
 3. Observer คือ ผู้สังเกตการณ์

CIELAB เป็นระบบการวัดสีที่พัฒนาจากระบบ CIE Tristimulus Value (x , y และ z) และ CIE Chromaticity Coordinates (x , y และ Y) โดยปรับปรุงและเปลี่ยนแปลงจนสามารถบอก ความแตกต่างของสีได้อย่างสม่ำเสมอและใกล้เคียงกับความแตกต่างของสีที่ตามองเห็น ปัจจุบันสมการที่ใช้ในการระบุสีเป็นที่ยอมรับกว้างขวางคือ CIELAB 1976

โดย L^* ใช้กำหนดค่าความสว่าง (Lightness)

$L = 0$ สีที่ได้จะมีมืดเป็นสีดำ

$L = 100$ สีที่ได้จะสว่างเป็นสีขาว

a^* ใช้กำหนดสีแดงหรือสีเขียว

a เป็น + วัตถุที่มีออกแดง

a เป็น - วัตถุที่มีออกเขียว

b^* ใช้กำหนดสีเหลืองหรือสีน้ำเงิน

b เป็น + วัตถุที่มีออกเหลือง

b เป็น - วัตถุที่มีออกน้ำเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การหาค่าความแตกต่างของสีที่เป็นตัวเลข สามารถนำข้อมูลที่ได้จากระบบ CIE LEB มาคำนวณโดยใช้สมการที่ (9)

ตัวอย่างการคำนวณ

2.1 นำค่าความยาวคลื่นที่ได้จากการวัดสเปกตรัมแสงมาคำนวณเพื่อหา XYZ

$$X = \sum_{380}^{780} X_i T_i \quad (6)$$

$$Y = \sum_{380}^{780} Y_i T_i \quad (7)$$

$$Z = \sum_{380}^{780} Z_i T_i \quad (8)$$

เมื่อ $X_i, Y_i,$ และ Z_i คือ ค่าพิกัดโคออร์ดิเนตจาก CIE chromaticity coordinate
และ T_i คือ ค่าความเข้มแสงที่วัดได้จากสเปกโตรมิเตอร์

ผลการคำนวณค่า X,Y และ Z ที่กระแสไบอัส 10 – 1000 μA

Temperature (°C)	10 μA			100 μA			1000 μA		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0	27.3219	119.0709	375.5766	681.8112	1961.0442	6099.3912	1114.8813	2825.3543	9599.3747
10	73.8064	149.2643	388.7746	712.6147	2022.9607	6139.4940	1140.0920	2900.9219	9642.6003
20	40.2662	126.8504	372.4406	681.4200	2035.0414	6061.7794	1112.4016	2962.7558	9595.4772
30	67.3022	148.5241	380.0469	687.6375	2057.3263	5982.4037	1117.1669	3017.0333	9547.0195
40	57.5325	144.2871	372.2130	667.9074	2070.5898	5906.0290	1100.0496	3076.2477	9494.7919
50	51.3197	137.2245	359.6894	656.6826	2093.3169	5865.6316	1083.9319	3131.5972	9419.7177
60	93.0689	165.5350	365.3103	673.8739	2114.7934	5792.4008	1086.8491	3143.1909	9292.5346
70	59.8035	139.0508	336.9094	648.3009	2112.7632	5655.9712	967.9161	2897.0974	8417.1810

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณค่า x' y' ที่กระแสไบอัส 10 – 1000 μA

Temperature (°C)	10 μA		100 μA		1000 μA	
	x	y	x	y	x	y
0	0.05234	0.22812	0.07799	0.22432	0.08234	0.20867
10	0.12063	0.24396	0.08029	0.22794	0.08332	0.212
20	0.07463	0.2351	0.07763	0.23183	0.08137	0.21672
30	0.11295	0.24925	0.07879	0.23573	0.08166	0.22052
40	0.10023	0.25136	0.07726	0.23953	0.08047	0.22502
50	0.09361	0.2503	0.07622	0.24297	0.07949	0.22967
60	0.14917	0.26532	0.07853	0.24645	0.08037	0.23244
70	0.11162	0.25954	0.07702	0.25101	0.07881	0.23588

2.2 นำค่า XYZ มาคำนวณหา L^* , a^* และ b^* จากสมการ

$$L^* = 116 f(Y) - 16$$

$$a^* = 500[f(x) - f(Y)]$$

$$b^* = 200[f(Y) - f(Z)]$$

เมื่อ

$$f(x) = \begin{cases} \left(\frac{x}{x_n}\right)^{1/3}, & \left(\frac{x}{x_n}\right) > 0.008856 \\ \frac{903.3\left(\frac{x}{x_n}\right) - 16}{116}, & \left(\frac{x}{x_n}\right) \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f(Y) = \begin{cases} \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{1/3}, & \left(\frac{Y}{Y_n}\right) > 0.008856 \\ \frac{903.3\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16}{116}, & \left(\frac{Y}{Y_n}\right) \leq 0.008856 \end{cases}$$

$$f(Z) = \begin{cases} \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{1/3}, & \left(\frac{Z}{Z_n}\right) > 0.008856 \\ \frac{903.3\left(\frac{Z}{Z_n}\right) - 16}{116}, & \left(\frac{Z}{Z_n}\right) \leq 0.008856 \end{cases}$$

โดยค่า X_n , Y_n , และ Z_n มีค่าเป็น 94.8777, 100.0000 และ 107.3827 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการคำนวณค่า $f(X)$, $f(Y)$ และ $f(Z)$ ที่กระแสไบอัส 10 – 1000 μA

Current (μA)	10		100		1000	
Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	0	70	0	70	0	70
$f(X)$	0.0960	0.2101	2.3954	2.2777	3.9169	3.4006
$f(Y)$	0.3969	0.4635	6.5368	7.0425	9.4178	9.6570
$f(Z)$	1.1659	1.0458	18.9335	17.5571	29.7980	26.1283

ผลการคำนวณค่า L^* , a^* และ b^* ที่กระแสไบอัส 10 – 1000 μA

Temperature ($^{\circ}\text{C}$)	10(μA)		100(μA)		1000(μA)	
	0	70	0	70	0	70
L^*	30.04	37.77	742.27	800.94	1076.47	1104.21
a^*	-150.46	-126.70	-2070.71	-2382.44	-2750.47	-3128.21
b^*	-153.79	-116.46	-2479.34	-2102.90	-4076.03	-3294.26
ΔE	44.92		492.26		868.69	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ค

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dome Lens SMD LED

VLD.1232R...



VLD.1232G...

**DESCRIPTION**

The dome lens SMD LED series has been designed in a small untinted and clear molded package with lens for surface mounting as gullwing or reverse gullwing version. The VLD.1232... series is using recent ultrabright InGaN / sapphire chip technology with high luminous flux.

PRODUCT GROUP AND PACKAGE DATA

- Product group: LED
- Product series: power
- Package: SMD dome lens
- Angle of half intensity: $\pm 9^\circ$

FEATURES

- Utilizing latest advanced InGaN technology
- Package type: surface-mount
- Package form: gullwing, reverse gullwing
- Dimensions (L x W x H in mm): 2.3 x 2.3 x 2.8
- High luminous flux and luminous intensity
- Luminous intensity and color categorized per packing unit
- Luminous intensity ratio per packing unit $I_{\text{max}}/I_{\text{min}} \leq 1.6$
- ESD-withstand voltage: up to 2 kV according to JESD22-A114-B
- Preconditioning according to JEDEC® level 2a
- Suitable for reflow soldering according to J-STD-020
- Material categorization: for definitions of compliance please see www.vishay.com/doc?999912

**APPLICATIONS**

- Traffic signals and signs
- Interior and exterior lighting
- Smoke detectors
- Bio sensing
- Indicator and backlighting purposes for audio, video, LCDs switches, symbols, illuminated advertising etc.

SAFETY ADVICES

Depending on the mode of operation, these devices emit highly concentrated blue light which can be hazardous to the human eye. Products which incorporate these devices have to follow the safety precautions given in IEC 62471 "Photobiological Safety of Lamps and Lamp Systems".

PARTS TABLE

PART	COLOR	LUMINOUS INTENSITY (mcd)			at I_f (mA)	WAVELENGTH (nm)			at I_f (mA)	FORWARD VOLTAGE (V)			at I_f (mA)	TECHNOLOGY
		MIN.	TYP.	MAX.		MIN.	TYP.	MAX.		MIN.	TYP.	MAX.		
VLDB1232G-08	Blue	1800	3500		20	458	465	472	20	2.6	3.0	3.4	20	InGaN on sapphire
VLDB1232R-08	Blue	1800	3500		20	458	465	472	20	2.6	3.0	3.4	20	InGaN on sapphire
VLDTG1232G-08	True green	7100	16 000		20	515	525	541	20	2.6	2.9	3.4	20	InGaN on sapphire
VLDTG1232R-08	True green	7100	16 000		20	515	525	541	20	2.6	2.9	3.4	20	InGaN on sapphire

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



www.vishay.com

VLDB1232.., VLDTG1232..

Vishay Semiconductors

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)				
VLDB1232..., VLDTG1232...				
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	VALUE	UNIT
Reverse voltage ⁽¹⁾	Short term application only	V_R	5	V
DC Forward current	$T_{amb} \leq 60\text{ }^{\circ}\text{C}$	I_F	30	mA
Power dissipation		P_V	100	mW
Junction temperature		T_J	100	$^{\circ}\text{C}$
Operating temperature range		T_{amb}	-40 to +100	$^{\circ}\text{C}$
Storage temperature range		T_{stg}	-40 to +100	$^{\circ}\text{C}$
Thermal resistance junction-to-ambient	Mounted on PC board (pad size > 16 mm ²)	R_{thJA}	400	K/W

Note

⁽¹⁾ Driving the LED in reverse direction is suitable for a short term application only

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
VLDB1232G..., VLDB1232R..., BLUE						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Luminous intensity ⁽¹⁾	$I_F = 20\text{ mA}$	I_V	1800	3500	-	mcd
Luminous flux/luminous intensity		ϕ_V/I_V	-	0.35	-	mlm/mcd
Dominant wavelength ⁽¹⁾	$I_F = 20\text{ mA}$	λ_d	458	465	472	nm
Radiant intensity	$I_F = 20\text{ mA}$	I_e	-	62	-	mW/sr
Peak wavelength	$I_F = 20\text{ mA}$	λ_p	-	460	-	nm
Spectral bandwidth at 50 % $I_{rel\ max}$	$I_F = 20\text{ mA}$	$\Delta\lambda$	-	18	-	nm
Angle of half intensity	$I_F = 20\text{ mA}$	ϕ	-	± 9	-	$^{\circ}$
Forward voltage ⁽¹⁾	$I_F = 20\text{ mA}$	V_F	2.6	3.0	3.4	V
Reverse current	$V_R = 5\text{ V}$	I_R	-	0.01	10	μA

Note

⁽¹⁾ Tolerances: $\pm 15\%$ for I_V , $\pm 0.1\text{ V}$ for V_F , $\pm 1\text{ nm}$ for λ_d

OPTICAL AND ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_{amb} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, unless otherwise specified)						
VLDTG1232G..., VLDTG1232R..., TRUE GREEN						
PARAMETER	TEST CONDITION	SYMBOL	MIN.	TYP.	MAX.	UNIT
Luminous intensity ⁽¹⁾	$I_F = 20\text{ mA}$	I_V	7100	16 000	-	mcd
Luminous flux/luminous intensity		ϕ_V/I_V	-	0.35	-	mlm/mcd
Dominant wavelength ⁽¹⁾	$I_F = 20\text{ mA}$	λ_d	515	525	541	nm
Radiant intensity	$I_F = 20\text{ mA}$	I_e	-	37	-	mW/sr
Peak wavelength	$I_F = 20\text{ mA}$	λ_p	-	519	-	nm
Spectral bandwidth at 50 % $I_{rel\ max}$	$I_F = 20\text{ mA}$	$\Delta\lambda$	-	28	-	nm
Angle of half intensity	$I_F = 20\text{ mA}$	ϕ	-	± 9	-	$^{\circ}$
Forward voltage ⁽¹⁾	$I_F = 20\text{ mA}$	V_F	2.6	2.9	3.4	V
Reverse current	$V_R = 5\text{ V}$	I_R	-	0.01	10	μA

Note

⁽¹⁾ Tolerances: $\pm 15\%$ for I_V , $\pm 0.1\text{ V}$ for V_F , $\pm 1\text{ nm}$ for λ_d

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COLOR CLASSIFICATION				
GROUP	DOMINANT WAVELENGTH (nm)			
	BLUE		TRUE GREEN	
	MIN.	MAX.	MIN.	MAX.
2	458	464	-	-
3	462	468	515	523
4	466	472	521	529
5	-	-	527	535
6	-	-	533	541

Note

- Wavelengths are tested at a current pulse duration of 25 ms and an accuracy of ± 1 nm

LUMINOUS INTENSITY CLASSIFICATION - BLUE			
GROUP	LUMINOUS INTENSITY (mcd)		
	STANDARD	MIN.	MAX.
BA		1800	2240
BB		2240	2800
CA		2800	3550
CB		3550	4500
DA		4500	5600
DB		5600	7100

LUMINOUS INTENSITY CLASSIFICATION - TRUE GREEN			
GROUP	LUMINOUS INTENSITY (mcd)		
	STANDARD	MIN.	MAX.
EA		7100	9000
EB		9000	11 200
FA		11 200	14 000
FB		14 000	18 000
GA		18 000	22 400
GB		22 400	28 000

Note

- Luminous intensity is tested at a current pulse duration of 25 ms and an accuracy of ± 15 %.
- The above type numbers represent the order groups which include only a few brightness groups. Only one group will be shipped on each reel (there will be no mixing of two groups on each reel).
- In order to ensure availability, single brightness groups will not be orderable.
- In a similar manner for colors where wavelength groups are measured and binned, single wavelength groups will be shipped on any one reel.
- In order to ensure availability, single wavelength groups will not be orderable.

TYPICAL CHARACTERISTICS (T_{amb} = 25 °C, unless otherwise specified)

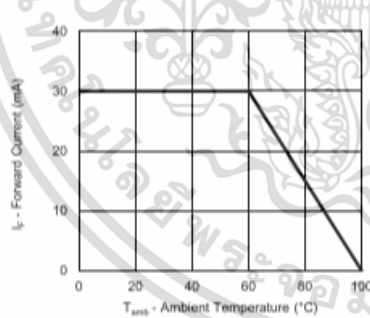


Fig. 1 - Maximum Permissible Forward Current vs. Ambient Temperature

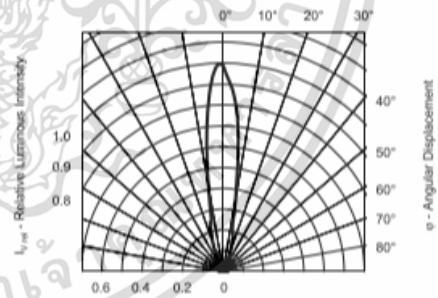


Fig. 2 - Relative Luminous Intensity vs. Angular Displacement

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

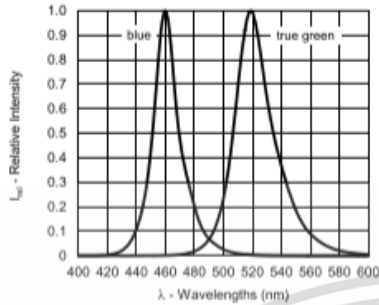


Fig. 3 - Relative Intensity vs. Wavelength

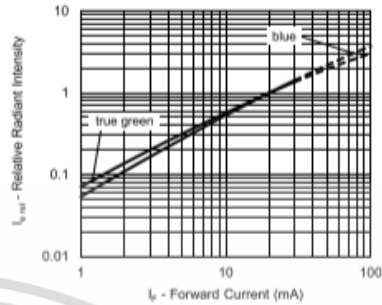


Fig. 6 - Relative Radiant Intensity vs. Forward Current

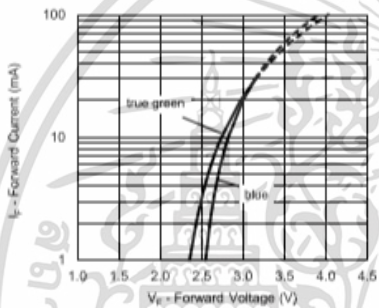


Fig. 4 - Forward Current vs. Forward Voltage

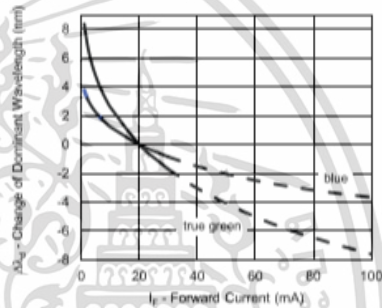


Fig. 7 - Change of Dominant Wavelength vs. Forward Current

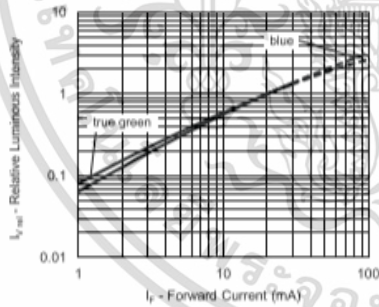


Fig. 5 - Relative Luminous Intensity vs. Forward Current

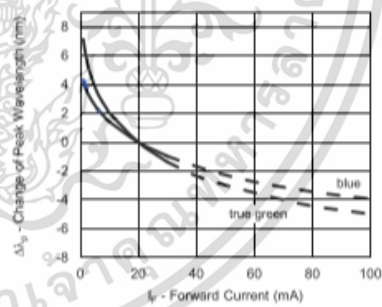


Fig. 8 - Change of Peak Wavelength vs. Forward Current

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

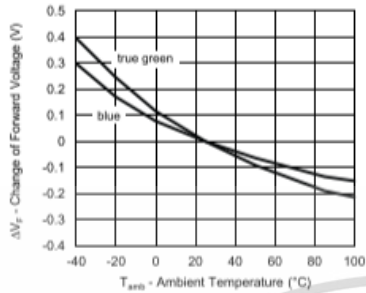


Fig. 9 - Change of Forward Voltage vs. Ambient Temperature

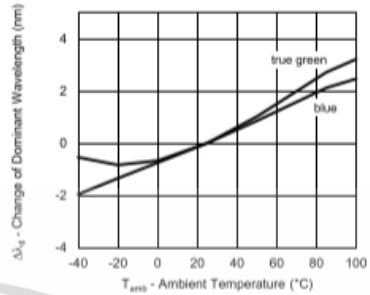


Fig. 12 - Change of Dominant Wavelength vs. Ambient Temperature

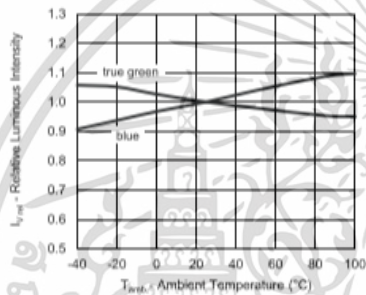


Fig. 10 - Relative Luminous Intensity vs. Ambient Temperature

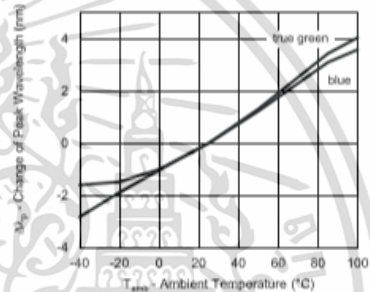


Fig. 13 - Change of Peak Wavelength vs. Ambient Temperature

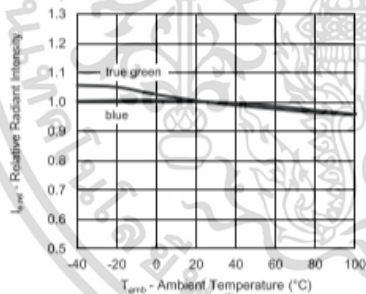
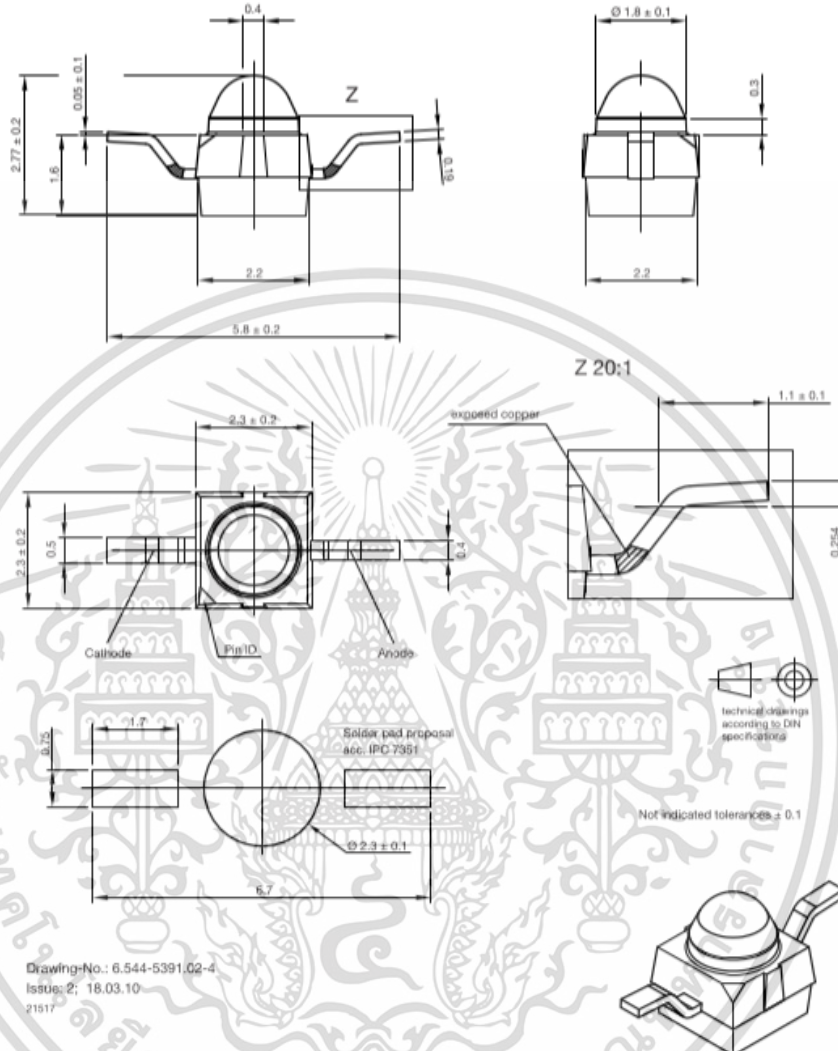


Fig. 11 - Relative Radiant Intensity vs. Ambient Temperature

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PACKAGE DIMENSIONS in millimeters: **VLD.1232R..** (reverse gullwing)


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

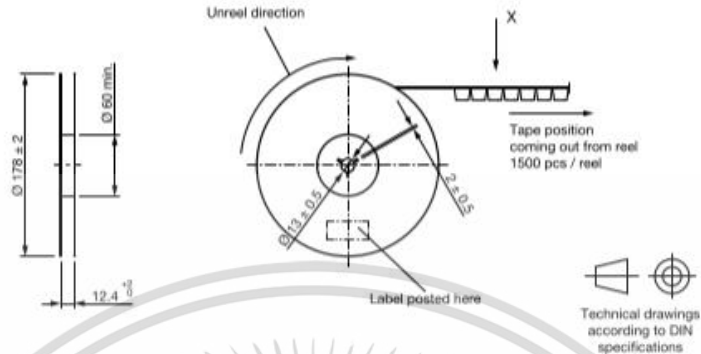


www.vishay.com

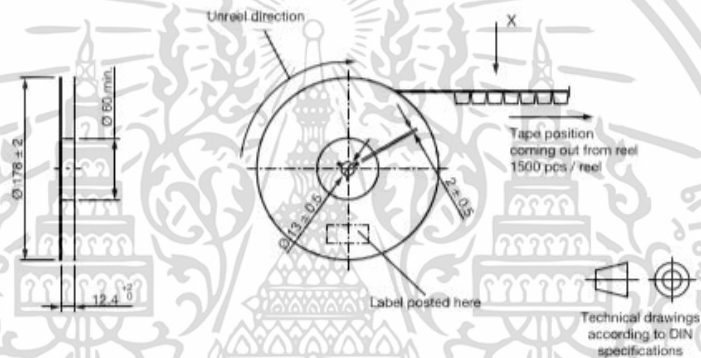
VLDB1232.., VLDTG1232..

Vishay Semiconductors

TAPING AND REEL DIMENSIONS in millimeters: **VLD.1232G** (gullwing)



TAPING AND REEL DIMENSIONS in millimeters: **VLD.1232R** (reverse gullwing)



COVER TAPE PEEL STRENGTH

According to DIN EN 60286-3

0.1 N to 1.3 N

300 ± 10 mm/min

165° to 180° peel angle

LABEL

Standard bar code labels for finished goods

The standard bar code labels are product labels and used for identification of goods. The finished goods are packed in final packing area. The standard packing units are labeled with standard bar code labels before transported as finished goods to warehouses. The labels are on each packing unit and contain Vishay Semiconductor GmbH specific data.

Rev. 1.0, 12-Feb-2019

8

Document Number: 80003

For technical questions, contact: LED@vishay.com

THIS DOCUMENT IS SUBJECT TO CHANGE WITHOUT NOTICE. THE PRODUCTS DESCRIBED HEREIN AND THIS DOCUMENT ARE SUBJECT TO SPECIFIC DISCLAIMERS, SET FORTH AT www.vishay.com/doc?91000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

SOLDERING PROFILE

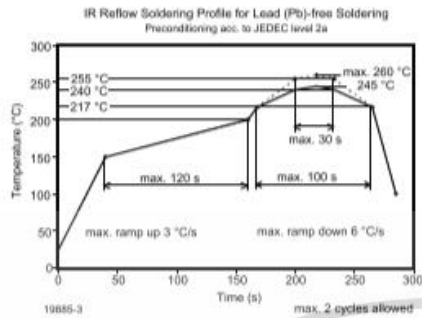


Fig. 14 - Vishay Lead (Pb)-free Reflow Soldering Profile (according to J-STD-020)

FINAL PACKING

The sealed reel is packed into a cardboard box. A secondary cardboard box is used for shipping purposes.

RECOMMENDED METHOD OF STORAGE

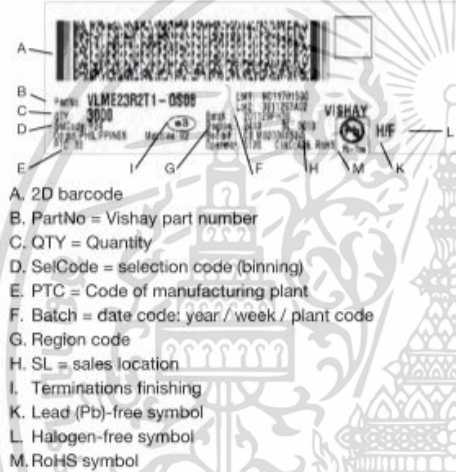
Dry box storage is recommended as soon as the aluminum bag has been opened to prevent moisture absorption. The following conditions should be observed, if dry boxes are not available:

- Storage temperature 10 °C to 30 °C
 - Storage humidity ≤ 60 % RH max.
- After more than 672 h under these conditions moisture content will be too high for reflow soldering.

In case of moisture absorption, the devices will recover to the former condition by drying under the following condition: 192 h at 40 °C + 5 °C / - 0 °C and < 5 % RH (dry air / nitrogen) or 96 h at 60 °C + 5 °C and < 5 % RH for all device containers or 24 h at 100 °C + 5 °C not suitable for reel or tubes.

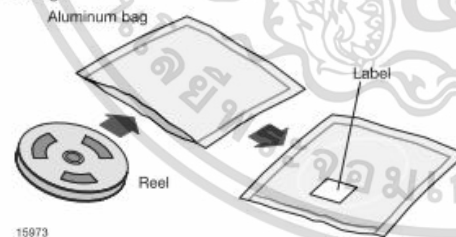
An EIA JEDEC standard JESD22-A112 level 2a label is included on all dry bags.

BAR CODE PRODUCT LABEL (example)



DRY PACKING

The reel is packed in an anti-humidity bag to protect the devices from absorbing moisture during transportation and storage.



ESD PRECAUTION

Proper storage and handling procedures should be followed to prevent ESD damage to the devices especially when they are removed from the antistatic shielding bag. Electrostatic sensitive devices warning labels are on the packaging.

VISHAY SEMICONDUCTORS STANDARD BAR CODE LABEL

The Vishay Semiconductors standard bar code labels are printed at final packing areas. The labels are on each packing unit and contain Vishay Semiconductors specific data.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



AvaSpec-2048 Fiber Optic Spectrometer

AvaSpec-2048

The AvaSpec-2048 Fiber Optic Spectrometer is based on the AvaBench-75 symmetrical Czerny-Turner design with 2048 pixel CCD Detector Array. The spectrometer has a fiber optic entrance connector (standard SMA, others possible), collimating and focusing mirror and diffractive grating. A choice of 16 different gratings with different dispersion and blaze angles enable applications in the 200-1100nm range. The AvaSpec-2048 can be delivered with 2 platforms of electronics; either with USB1.1 with 14 bit AD converter or the new USB2.0 interface with 16 bit AD converter. The AvaSpec-2048 is especially suitable for low light level and high resolution applications. An optional detector coating enhances the CCD performance for the UV range and a detector collection lens offers high sensitivity. Digital IO ports enable external triggering and control of shutter and pulsed light sources from the Avantes line of instruments.



The AvaSpec-2048 is also available as dual channel or multiple channel instrument (up to 8 channels), where all spectra are taken simultaneously. The AvaSpec-2048 comes with AvaSoft-basic, a complete manual, USB interface cable and a PS-12V/1.0A power supply. AvaSoft-full and application software can be ordered separately. Alternatively the AvaSpec-2048-SPU has a switch to run on USB power or external power. The new AvaSpec2048-USB2 has a USB2 interface with ultrafast datasampling of 900 spectra per second and data transfer in 1.8msec and supports analog in and outputs as well. Optional Bluetooth® (BT) communication and an SD card for on-board saving of spectra can be added. The AvaSpec-2048-USB2 runs on USB power and comes with AvaSoft-basic, a complete manual and USB interface cable. Multiple (up to 127) USB2 spectrometers with different detector types can be externally coupled (see section multi-channel spectrometers, page 32).

Technical Data

Spectrometer platform	AvaSpec-2048	AvaSpec-2048-USB2
Optical Bench	Symmetrical Czerny-Turner, 75 mm focal length	
Wavelength range	200-1100 nm	
Resolution	0.04 - 20 nm, depending on configuration (see table)	
Stray light	< 0.1%	
Sensitivity (AvaLight-HAL, 8 μ m fiber) in counts/ μ W per ms integration time	5000 (14-bit AD)	20,000 (16-bit A/D)
Detector	CCD linear array, 2048 pixels	
Signal/Noise	200:1	
AD converter	14 bit, 1.33 MHz	16 bit, 2 MHz
Integration time	2 msec - 60 seconds	1.11 ms - 10 min.
Interface	USB 1.1, 12 Mbps RS-232, 115.200 bps	USB 2.0 high speed, 480 Mbps RS-232, 115.200 bps

www.avantes.com • info@avantes.com

1

Spectrometers

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Sample speed with on-board averaging	17 msec / scan	1.1 msec /scan
Data transfer speed	14-31 ms / scan (depending on # pixels transferred)	1.8 msec /scan
Digital IO	DB-15 connector, 2 Digital in, 12 Digital out	HD-26 connector, 2 Analog in, 2 Analog out, 3 Digital in, 12 Digital out, trigger, sync.
Power supply	12 VDC, reverse polarity protection, 160 mA (PS-12V/1.0A) or 5VDC USB power	Default USB power, 350 mA Or with SPU2 external 12VDC, 350 mA
Dimensions, weight	175 x 110 x 44 mm (1 channel), 716 grams 175 x 165 x 85 mm (2 channel), 1.700 grams	175 x 110 x 44 mm(1 channel), 716 grams

Grating selection table for AvaSpec-2048

Use	Useable range	Spectral range (nm)	Lines/mm	Blaze (nm)	Order code
UV/VIS/NIR	200-1100**	900**	300	300	UA
UV/VIS	200-850	520	600	300	UB
UV	200-750	250-220*	1200	250	UC
UV	200-650	165-145*	1800	UV	UD
UV	200-580	115-70*	2400	UV	UE
UV	220-400	70-45*	3600	UV	UF
UV/VIS	250-850	520	600	400	BB
VIS/NIR	300-1100**	800**	300	500	VA
VIS	360-1000	500	600	500	VB
VIS	300-800	250-200*	1200	500	VC
VIS	350-750	145-100*	1800	500	VD
VIS	350-640	75-50*	2400	VIS	VE
NIR	500-1050	500	600	750	NB
NIR	500-1050	220-150*	1200	750	NC
NIR	600-1100**	500**	300	1000	IA
NIR	600-1100	500	600	1000	IB

depends on the starting wavelength of the grating; the higher the wavelength, the bigger the dispersion and the smaller the range to select.

** please note that not all 2048 pixels will be used for the useable range

Resolution table (FWHM) for AvaSpec-2048

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Grating (lines/mm)	Slit size (µm)					
	10	25	50	100	200	500
300	0.8	1.4	2.4	4.3	8.0	20.0
600	0.4	0.7	1.2	2.1	4.1	10.0
1200	0.1-0.2*	0.2-0.3*	0.4-0.6*	0.7-1.0*	1.4-2.0*	3.3-4.8*
1800	0.07-0.12*	0.12-0.21*	0.2-0.36*	0.4-0.7*	0.7-1.4*	1.7-3.3*
2400	0.05-0.09*	0.08-0.15*	0.14-0.25*	0.3-0.5*	0.5-0.9*	1.2-2.2*
3600	0.04-0.06*	0.07-0.10*	0.11-0.16*	0.2-0.3*	0.4-0.6*	0.9-1.4*

*depends on the starting wavelength of the grating; the higher the wavelength, the bigger the dispersion and the better the resolution

Ordering Information

AvaSpec-2048

Fiber Optic Spectrometer, 75 mm Avabench, 2048 pixel CCD detector, USB1.1/RS-232 interface, incl AvaSoft-Basic, USB cable and PS-12V/1.0A power supply, specify grating, wavelength range and options

AvaSpec-2048-USB2

Fiber Optic Spectrometer, 75 mm Avabench, 2048 pixel CCD detector, USB powered high speed USB2 interface, incl. AvaSoft-Basic, USB interface cable, specify grating, wavelength range and options

AvaSpec-2048-2

Dual channel Fiber Optic Spectrometer, 2 * 75 mm Avabench, 2048 pixel CCD detector, USB1.1/RS-232 interface, incl AvaSoft-Basic, USB cable and PS-12V/1.0A power supply, for both channels specify grating, wavelength range and options

Options

-SPU

incl. switch for USB powered USB1 or external power for RS232

-SPU2

incl. switch for USB powered USB2 or external power for RS232/BT

-SPU2-BT

Bluetooth® interface for USB2 platform only, including antenna and switch

SDXXX

Internal XXX MB SD card for on board data saving, for USB2 platform only

DUV

Deep UV detector coating >150 nm

DCL-UV/VIS

Detector Collection lens to enhance sensitivity, Quartz, 200-1100 nm

SLIT-XX

Slit size, please specify XX = 10, 25, 50, 100, 200, 500 µm

OSF-YYY

Order sorting filter for 2nd order effects filtering, please specify YYY= 375, 475, 515, 550, 600 nm

OSC

Order sorting coating with 590nm long pass filter for VA, BB (>350nm) and VB gratings in AvaSpec-2048

OSC-UA

Order sorting coating with 350 and 590nm longpass filter for UA gratings in AvaSpec-2048

OSC-UB

Order sorting coating with 350 and 590nm longpass filter for UB or BB (<350nm) gratings in AvaSpec-2048

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	นางสาวเบญจวรรณ อุ่นผูก
วัน เดือน ปีเกิด	วันจันทร์ ที่ 16 กันยายน พ.ศ.2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	10 หมู่5 ตำบลแม่เมาะ อำเภอแม่เมาะ จังหวัดลำปาง 52220
ประวัติการศึกษา	(2561) วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรด 2.44 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (2565) วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ เกรดเฉลี่ย 3.81



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้