ระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงของโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน

PHOTOCURRENT MEASUREMENT OF SILICON PHOTODIODE

ปิยะวรรณ คำสม

ปิยาอร พาพันธ์

โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์)

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOCURRENT MEASUREMENT OF SILICON PHOTODIODE

PIYAWAN KAMSOM

PIYAON PAPAN

A SPECIAL PROJECT SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF

THE REQUIREMENT FOR

THE DEGREE OF BACHELOR OF SCIENCE (APPLIED PHYSICS)

DEPARTMENT OF PHYSICS, FACULTY OF SCIENCE

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

ACADEMIC YEAR 2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ	ระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงของโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน Photocurrent Measurement of Silicon Photodiode
ชื่อนักศึกษา	นางสาวปิยะวรรณ คำสม รหัสนักศึกษา 58051099 นางสาวปิยาอร พาพันธ์ รหัสนักศึกษา 58051100
ปริญญา	วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา	ฟิสิกส์
ปีการศึกษา	2561
อาจารย์ที่ปรึกษา	ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.) อนุมัติให้โครงงานพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต(ฟิสิกส์ประยุกต์) ประจำปีการศึกษา 2561

คณะกรรมการสอบ	ลายมือชื่อ
ดร.กาจปัญญา สุวรรณสุขโข ประธานกรรมการ	
อ.ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง กรรมการ	
ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษา	

ลิขสิทธิ์ของคณะวิทยาศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงงานพิเศษ ระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงของโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน
ชื่อนักศึกษา นางสาวปิยะวรรณ คำสม รหัสนักศึกษา 58051099
นางสาวปิยาอร พาพันธ์ รหัสนักศึกษา 58051100
ปริญญา วิทยาศาสตรบัณฑิต (ฟิสิกส์ประยุกต์)
ภาควิชา ฟิสิกส์
คณะ วิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง (สจล.)
ปีการศึกษา 2561
อาจารย์ที่ปรึกษา ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข

บทคัดย่อ

โครงงานพิเศษนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสง เพื่อศึกษาการตอบสนองต่อแสงในแต่ละความยาวคลื่นของโฟโตไดโอดชนิดซิลิกอน โดยใช้เครื่องมือโมโนโครเมเตอร์ในการจำแนกแสงออกเป็นความยาวคลื่นต่างๆและทำการเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้าทางแสงที่ได้จากโฟโตไดโอดเบอร์ S1223และ BPX 65 BXในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-800นาโนเมตร จากการทดลองสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงได้สูงในช่วงสเปกตรัม 570-590 นาโนเมตร ซึ่งเป็นแสงที่มีพลังงานโฟตอนสูง ดังนั้นเมื่อแสงที่มีค่าพลังงานโฟตอนสูงมาตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดเบอร์ BPX 65 BX และเบอร์S1223 ทำให้โฟโตเบอร์BPX 65 BX มีประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกมากกว่าโฟโตไดโอดเบอร์ S1223 และความสามารถการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอดทั้งสอง สามารถตอบสนองต่อแสงได้ในช่วงความยาวคลื่น400-450นาโนเมตรและ500-650นาโนเมตร ซึ่งใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จากDatasheet

คำสำคัญ : การวัดกระแสไฟฟ้าทางแสง โฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Title	Photocurrent Measurement of Silicon Photodiode
Students	Miss Piyawan Kamsom Student ID 58051099
	Miss Piyaon Papan Student ID 58051100
Degree	Bachelor of Science (Applied Physics)
Department	Physics
Faculty	Science
University	King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (KMITL)
Academic Year	2018
Advisor	Dr. Witoon Yindeesuk

Abstract

This special project was the design and measurement photocurrent of silicon photodiode to study the sensitivity of photodiode. The wavelengths of light were separate by a monochromator and selected wavelength to compare photocurrent of photodiode number S1223 with BPX 65 BX in wavelengths from 400 to 800 nm. In the experiment, the photodiode can produce maximum photocurrent at wavelengths around 570 to 590 nm because this range has higher photon energy more than another range. When the light hit on the surface of photodiode number BPX 65 BX and S1223, the photodiode number BPX 65 BX had a higher external quantum efficiency more than photodiode number S1223. Both photodiodes had responsivity at wavelengths around 400 - 450 nm and 500 - 650 nm approximately according to the datasheet of the photodiode

Keywords : Photocurrent , Photodiode

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยการสนับสนุนจาก ดร.วิฑูรย์ ยินดีสุข ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยฉบับนี้ ได้ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัยให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี จนงานวิจัยนี้มีความครบถ้วนและสมบูรณ์

ขอขอบคุณคณะกรรมการสอบเป็นอย่างสูงประกอบด้วย ดร.กาจปัญญา สุวรรณสุขโข ที่ให้เกียรติมาเป็นประธานกรรมการคุมสอบ และอาจารย์ธรรมรัตน์ แต่งตั้ง ที่ให้เกียรติมามาเป็นกรรมการคุมสอบ อีกทั้งยังอาจารย์ทั้งสองยังได้ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางการทำงานวิจัยให้ลุล่วงไปได้ด้วยดี และขอขอบคุณพี่ๆในห้องปฏิบัติการณ์315ที่คอยชี้แนะและให้คำปรึกษาในการทำงานวิจัย โดยเฉพาะพี่ศิริชัย สาตร์พันธุ์ ที่คอยให้คำปรึกษาเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุนและกำลังใจ จนกระทั่งงานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ปิยะวรรณ คำสม

ปิยาอร พาพันธ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ข
กิตติกรรมประกาศ..... ค
สารบัญ..... ง
สารบัญรูปภาพ..... ฉ
บทที่ 1 บทนำ **1**
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ..... 1
1.2 วัตถุประสงค์ 1
1.3 ขอบเขตการวิจัย 2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย..... 2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 2
1.6 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย..... 3
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง **4**
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง 4
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง..... 4
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง..... 6
2.2 การดูดกลืนแสง..... 8
2.2.1 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ..... 8
2.2.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ..... 8
2.3 แหล่งกำเนิดแสง..... 11
2.3.1 ไดโอดเปล่งแสง..... 11
2.3.2 หลักการทำงานของไดโอดเปล่งแสง..... 11
2.4 โฟโตไดโอด (Photodiodes) 13
2.4.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด 13
2.4.2 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า..... 15
2.4.3 ลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด 17
2.4.4 กระแสไฟฟ้าที่ผลิตในชั้นปลอดพาหะ 20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

หน้า

2.4.5 ปรากฏการที่ p-n junction อยู่ในภาวะสมดุล 21
2.5 เซลล์แสงอาทิตย์ 23
2.5.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ 23
2.5.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์.....24
2.6 กระแสไฟฟ้าทางแสง..... 25
2.6.1 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าทางแสง 25
2.6.2 ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : QE).....27
บทที่3 วิธีดำเนินงานวิจัย 28
3.1 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน 28
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 28
3.3 วิธีการทดลอง..... 29
บทที่4 ผลการทดลอง 38
4.1 กราฟแสดงผลการทดลอง 38
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 47
5.1 สรุปผลการวิจัย 47
5.2 ข้อเสนอแนะ 47
เอกสารอ้างอิง 48
ภาคผนวก..... 49
ภาคผนวก ก 50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่ **หน้า**

2.1 ความถี่และความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ 5

2.2 สเปกตรัมความไวต่อแสงของสายตามนุษย์ 5

2.3 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก 7

2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์ 7

2.5 การเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยแสงในสารกึ่งตัวนำ 9

2.6 การดูดกลืนทางแสงที่ระยะทางแตกต่างกัน 9

2.7 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ 10

2.8 โครงสร้างภายในของหลอดไฟ LED 12

2.9 การเกิดแสงจากหลอดไฟ LED 12

2.10 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn 13

2.11 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn 14

2.12 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด 15

2.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sh} และความเข้มของแสงอินพุต 15

2.14 การวัดความเข้มของแสงด้วยโฟโตไดโอด 17

2.15 ตัวอย่างวงจรสำหรับไบแอสย้อนให้โฟโตไดโอด 18

2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและความเข้มของแสง 18

2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิดในโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอนและอุณหภูมิสภาพแวดล้อม 19

2.18 การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของโฟโตไดโอด 20

2.19 เส้นลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันในรอยต่อ pn 21

2.20 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆก่อนจะเกิดรอยต่อ 21

2.21 แสดงรอยต่อ p-n เมื่อสัมผัสกันแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุล 22

2.22 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ 24

2.23 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อยังไม่มีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ 24

2.24 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ 25

2.25 แสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบลงบนเซลล์ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลมีการจับคู่กัน 25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

2.26 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อ p-n 26
3.1 การเชื่อมต่อระบบวัดPhotocurrent โดยใช้Detector 29
3.2 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบวัดโดยใช้Detector 29
3.3 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่1 30
3.4 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่2 30
3.5 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่3 31
3.6 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่4 32
3.7 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่5 32
3.8 กราฟแสดงการทำงานของ monochromator ทดสอบด้วยหลอดไฟ LED day light..... 33
3.9 การวัดความเข้มของแสงโดยใช้ Power meter ในย่านความยาวคลื่น 400-800 nm..... 33
3.10 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 1..... 34
3.11 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 2 34
3.12 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 3 35
3.13 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 4 35
3.14 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อในระบบวัด Photocurrent โดยใช้ Photodiode..... 36
3.15 การทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงโดยใช้มัลติมิเตอร์..... 36
3.16 ขั้นตอนการเลือกความยาวคลื่นตามที่ต้องการโดยใช้โปรแกรม AD131a ขั้นตอนที่1..... 37
3.17 ขั้นตอนการเลือกความยาวคลื่นตามที่ต้องการโดยใช้โปรแกรม AD131a ขั้นตอนที่2..... 37
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงที่ได้จาก Detector Power Meter 38
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด BPX 65 BX 39
4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก(IPCE) ของโฟโตไดโอด BPX 65 BX..... 40
4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับความไวต่อการตอบสนองของแสงของโฟโตไดโอด BPX 65 BX 41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ **หน้า**

4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโตไดโอดBPX 65 BX..... 42

4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเบอร์S1223..43

4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโตไดโอดเบอร์ S1223 44

4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโดไดโอดเบอร์ S1223 45

4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอดเบอร์ S1223..... 46

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

ปัจจุบันพลังงานแสงอาทิตย์ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเพราะเป็นพลังงานที่สะอาดและไม่มีวันหมดไปโดยการเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์เป็นพลังงานไฟฟ้านั้นใช้หลักการของปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Effect) โดยอุปกรณ์ที่ใช้ในการแปลงพลังงานนี้เรียกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) เซลล์แสงอาทิตย์หรืออุปกรณ์เซลล์แสงอาทิตย์เป็นสิ่งประดิษฐ์ของมนุษย์ในการแปลงพลังงานโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งเป็นรูปแบบที่ใช้กันมากที่สุดในชีวิตประจำวัน เทคโนโลยีเซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคโนโลยีที่น่าสนใจที่จะนำมาเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานทางเลือก สำหรับการแก้วิกฤตพลังงานในอนาคตเป็นความต้องการพลังงานเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เซลล์แสงอาทิตย์สร้างขึ้นโดยใช้แผ่นวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมาผ่านขบวนการเพื่อให้เป็นสารชนิดพี (P-type) และชนิดเอ็น (N-type) รอยต่อระหว่างชั้นทั้งสองเรียกว่า PN junction ซึ่งเป็นส่วนที่สร้างกระแสไฟฟ้าจากแสงอาทิตย์ ทำให้เกิดความสนใจที่จะศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการตอบสนองของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ความยาวคลื่นต่างๆ โดยใช้โมโนโครเมเตอร์ในการวัดPhotocurrent และใช้โฟโตไดโอดในการทดสอบกระแสไฟฟ้าทางแสงเนื่องจากแสงที่เราใช้ในการทดสอบกับเซลล์แสงอาทิตย์มีค่าน้อยมากจึงไม่สามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าได้เราจึงใช้โฟโตไดโอดในการทดสอบกระแสไฟฟ้าทางแสงแทน เพราะโฟโตไดโอดมีลักษณะการทำงานตรวจจับสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าและโครงสร้างพื้นฐานที่ทำจากสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ PN เหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์แต่โฟโตไดโอดมีพื้นที่หน้าตัดในการรับแสงที่เล็กกว่าเซลล์แสงอาทิตย์จึงสามารถรับแสงที่ออกมาจากMonochromator ได้เต็มพื้นที่มากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ดังนั้นเราจึงทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงของโฟโตไดโอดเพื่อหาค่าการตอบสนองต่อความยาวคลื่นที่ดีที่สุดสำหรับการนำไปพัฒนาโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ต่อไปในอนาคต

1.2 วัตถุประสงค์

1) ศึกษาระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสง

2) ออกแบบและสร้างระบบวัดกระแสไฟฟ้าในแต่ละความยาวคลื่นโดยใช้โมโนโครเมเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1) ใช้ระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงในการหาค่าการตอบสนองของโฟโตไดโอดที่ความยาวคลื่น 400-800 nm

2) ใช้ระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงหาคุณสมบัติของโฟโตไดโอดเพื่อนำมาวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานและประสิทธิภาพควอนตัม

3) หาค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงระดับไมโครแอมป์จากโฟโตไดโอดโดยใช้โมโนโครเมเตอร์

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1) ศึกษาหลักการทำงานและวัสดุที่นำมาใช้

2) ออกแบบและสร้างระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสง

3) ทดสอบสมบัติระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงโดยใช้โมโนโครเมเตอร์

4) ตรวจสอบระบบ

5) วิเคราะห์และสรุปผล

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1) ได้ทักษะและความรู้ในการใช้เครื่องมือโมโนโครเมเตอร์ในการวัดระบบกระแสไฟฟ้าทางแสงของโฟโตไดโอด

2) สามารถใช้ระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงหาประสิทธิภาพควอนตัมที่ดีที่สุดจากย่านความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตรของโฟโตไดโอดที่คล้ายคลึงกันกับเซลล์แสงอาทิตย์เพื่อนำไปพัฒนาการออกแบบเซลล์แสงอาทิตย์ในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ระยะเวลาการดำเนินงานวิจัย

การดำเนินงาน	ระยะเวลา								
	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.
ศึกษาหลักการทำงานและวัสดุที่นำมาใช้	←	—	→						
ออกแบบและสร้างระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสง		←	—	—	→				
ทดสอบสมบัติระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสง				←	—	—	→		
ตรวจสอบระบบ						←	—	→	
วิเคราะห์และสรุปผล								←	→

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น (Wave) และอนุภาค (particle) ปรากฏการณ์ที่เราเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อนแสง (reflection) การแทรกสอดแสง (interference) และการหักเหแสง (refraction) แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาค ได้แก่ การส่องแสงเข้าสู่ผิวโลหะแล้วทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกสู่สุญญากาศ เรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (external photoelectric effect) หรือการเพิ่มขึ้นของสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกแสง

2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

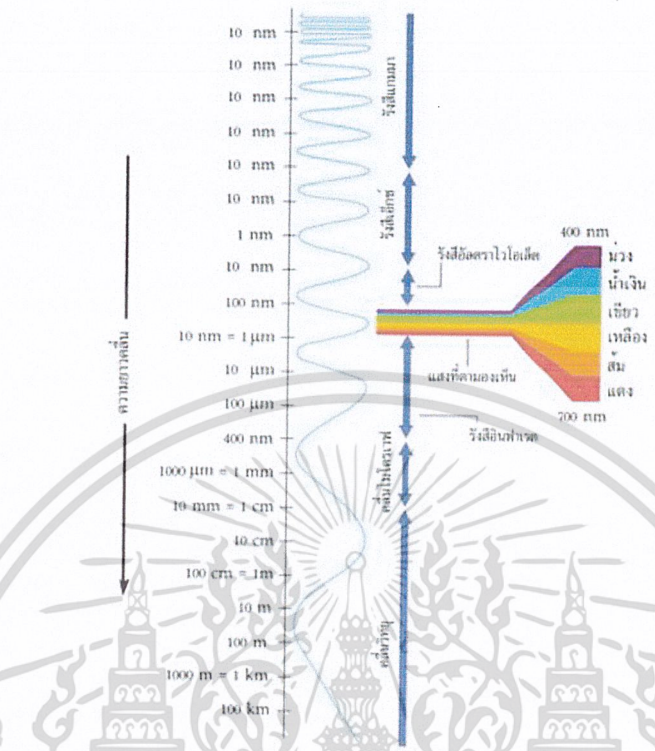
แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ถ้าให้ λ เป็นความยาวคลื่นแสง ν คือความถี่ของคลื่นแสงและ c_0 คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($c_0 = 2.99792458 \times 10^8 m/s$) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \tag{2.1}$$

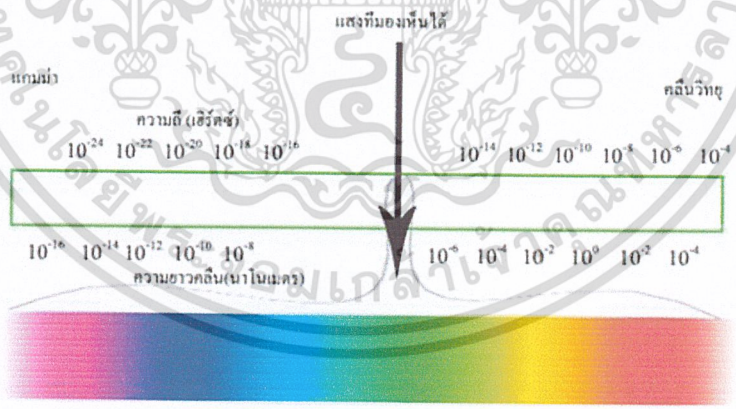
แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400～700 nm แสงที่มองเห็นนี้ในสเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นแสงสีต่างๆ ได้แก่ สีม่วง สีคราม สีน้ำเงิน สีเขียว สีเหลือง สีส้ม และสีแดง ในแสงสีต่างๆเหล่านี้เป็นสีที่ตาของมนุษย์มีความไวมากที่สุดคือ แสงสีเขียว ดังรูปที่แสดงความถี่และความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆและรูปแสดงสเปกตรัมความไวต่อแสงของสายตามนุษย์ซึ่งสเปคตรัมของแสงสามารถแยกได้ดังนี้

สี	ความยาวคลื่น (nm)
ม่วง	380-450
น้ำเงิน	450-500
เขียว	500-570
เหลือง	570-590
แสด	590-610
แดง	610-760

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 ความถี่และความยาวของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมความไวต่อแสงของสายตามนุษย์

ถ้าให้แสงเดินทางในวัตถุที่มีเนื้อเรียบตลอดและเป็นวัตถุไอโซโทรปี (isotropy) แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัตถุหนึ่งไปยังอีกวัตถุหนึ่งที่ขอบของวัตถุทั้งสองนั้นแสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ ซึ่งการเดินทางของแสงในวัตถุที่มีค่าดัชนีหักเหของแสงเท่ากับ (n) จะทำให้ความเร็วของแสง (c) ช้ากว่าในสุญญากาศ ดังนั้นความเร็วแสงในวัตถุเท่ากับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$c = \frac{c_0}{n} \tag{2.2}$$

ค่าดัชนีหักเหแสง (n) ของวัตถุใดๆจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นและความถี่ของแสง เมื่อค่าดัชนีหักเหแสงนี้มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก ε ของวัตถุ (dielectric constant) ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}} \tag{2.3}$$

โดยที่ ε_0 คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ $= 8.854182 \times 10^{-12} F/m$

2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

ในทางฟิสิกส์ควอนตัมคลื่นแสงจะถูกพิจารณาว่าเป็นโฟตอน (Photon) และยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคอีกด้วย ซึ่งอนุภาคของแสงจะมีพลังงานอยู่ภายในตัวเองและถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ ν อนุภาคของแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ $h\nu$ โดยที่ h คือค่าคงที่ของแพลงค์ (Planck's constant) = $4.136 \times 10^{-15} eV$ และแสงที่มีความยาวคลื่น λ ใดๆจะมีพลังงานโฟตอนเป็น

$$E_{photon} = h\nu = \frac{hc_0}{\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \tag{2.4}$$

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำหรือ $E_{Photon} \geq E_{G(semi)}$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสงทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสงที่มีขนาดความถี่ต่ำสุด $\nu_{\min}$ หรือความยาวคลื่นสูงสุด $\lambda_{\max}$ ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้ แต่ในกรณีที่ $E_{Photon} \leq E_{G(semi)}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\nu_{\min} \geq \frac{E_G}{h} \tag{2.5}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{hc_0}{E_G} = \frac{1.24}{E_G} \quad \mu m \tag{2.6}$$

โดย $\nu_{\min}$ คือ ความถี่ต่ำสุดที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้

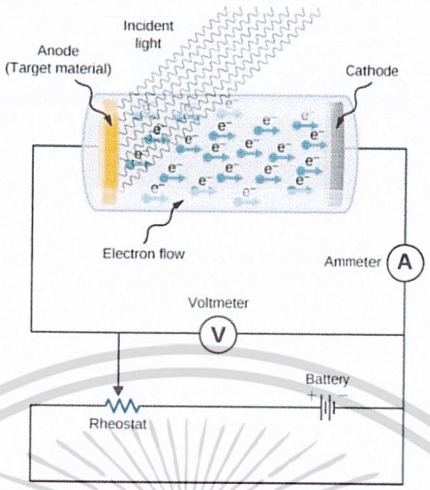
$\lambda_{\max}$ คือความยาวคลื่นสูงสุดที่ทำให้เกิดการดูดกลืนแสงได้

E_G คือขนาดความกว้างของช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

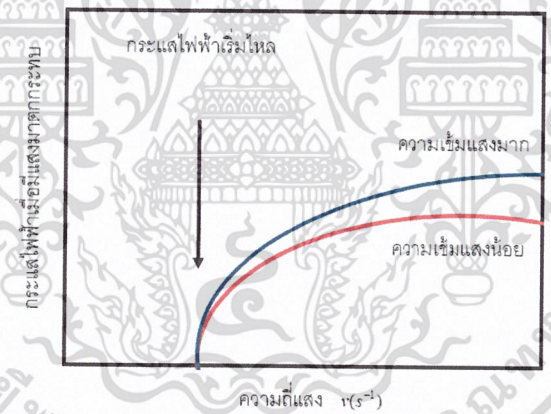
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในหลอดสุญญากาศแล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะหลุดออก อธิบายได้ดังนี้ ในหลอดสุญญากาศจะมีแผ่นขั้วไฟฟ้าบวกและลบบรรจุอยู่ เมื่อขั้วไฟฟ้าเหล่านั้นถูกต่อออกไปยังวงจรภายนอกซึ่งมีแบตเตอรี่ไบอัสอยู่และมีแสงส่องลงบนขั้วไฟฟ้าลบจะพบว่า ถ้าแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความถี่สูงกว่าค่าหนึ่งๆจะทำให้มีกระแสไหลในวงจร แต่ถ้ามีความถี่ต่ำเกินไปก็จะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร



รูปที่ 2.3 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่าๆหนึ่ง

ปรากฏการณ์นี้ไอน์สไตน์ได้อธิบายไว้ว่าเมื่อแสงที่มีความถี่ ν เดินทางไปในพื้นที่ว่าง แสงนั้นไม่ได้มีพลังงานเป็นค่าต่อเนื่องแต่แสงจะเป็นอนุภาคที่มีพลังงานเท่ากับที่วิ่งไปในพื้นที่ว่างนั้นเรียกว่า light quantum ต่อมาเรารู้จักกันในชื่อ “โฟตอน” จากนั้นไอน์สไตน์ได้อธิบายไว้ว่า พลังงานสูงที่สุดของอิเล็กตรอนหลุดออกจากโลหะ E มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวของโลหะ $h\nu$ ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก $q\phi$ และเขียนสมการได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$E = hV - q\phi \tag{2.7}$$

โดยที่ ϕ เรียกว่า เวิร์กฟังก์ชัน (Work function) และ $q\phi$ มีหน่วยเป็น eV

จากสมการนี้ทำให้ทราบว่าค่าความถี่ต่ำที่สุดของแสงจะทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกได้

2.2 การดูดกลืนแสง

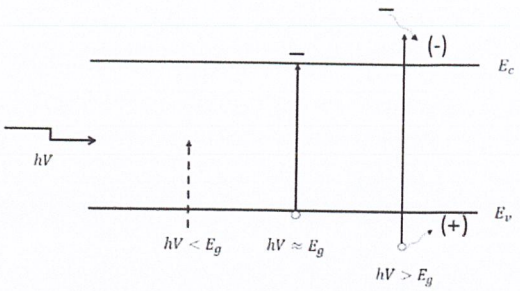
2.2.1 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ

การดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบคอนดักชันในกรณีที่ฉนวนและสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (fundamental absorption) และตำแหน่งหรือความยาวคลื่นแสงของสเปกตรัมมีการดูดกลืนแสง เรียกว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) ซึ่งการดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก โดยอิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบคอนดักชันในโลหะหรือสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานหรือสนามไฟฟ้าจากแสงถูกเร่งให้โมเมนตัมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงและทำให้อิเล็กตรอนมีพลังงานเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ (free carrier absorption) การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นแสงยาวมากๆ

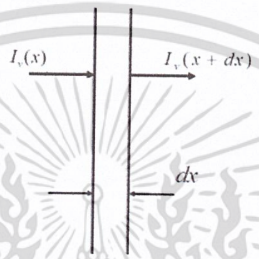
2.2.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ (Optical Absorption in Semiconductor)

เมื่อสารกึ่งตัวนำถูกฉายด้วยแสงโฟตอนจะถูกดูดกลืนหรือเดินทางผ่านสารกึ่งตัวนำซึ่งขึ้นอยู่กับพลังงานโฟตอนและช่องว่างแถบพลังงาน E_G ถ้าพลังงานโฟตอนมีค่าน้อยกว่า E_G โฟตอนจะไม่ถูกดูดกลืน ในกรณีนี้แสงจะเดินทางผ่านทะลุสารและสารกึ่งตัวนำจะเป็นตัวโปร่งแสง ถ้า $E_{Photon} = hV > E_G$ โฟตอนจะทำปฏิกิริยาภายในกับวาเลนซ์อิเล็กตรอนทำให้อิเล็กตรอนมีระดับที่สูงขึ้นบนแถบนำ ที่แถบวาเลนซ์ก็จะมีอิเล็กตรอนจำนวนมากและที่แถบนำจะมีสถานะว่างจำนวนมาก ดังนั้นโอกาสของปฏิกิริยาภายในจะสูงขึ้นเมื่อ $hV > E_G$ โดยปฏิกิริยานี้จะสร้างอิเล็กตรอนในแถบความนำและสร้างโฮลในแถบวาเลนซ์ซึ่งจะเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮล ในกระบวนการดูดกลืนพื้นฐานสำหรับค่า hV ที่แตกต่างกันสามารถดูได้ดังรูปที่ 2.5 เมื่อ $hV > E_G$ คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ถูกสร้างและพลังงานส่วนเกินของอิเล็กตรอน-โฮลซึ่งอยู่ในรูปพลังงานจลน์ซึ่งจะกระจายออกในรูปของความร้อนในสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยแสงในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.6 การดูดกลืนทางแสงที่ระยะทางแตกต่างกัน

ความเข้ม (intensity) ของฟลักซ์โฟตอนแสดงได้โดย $I_V(X)$ และแสดงในเทอมของพลังงาน/ชม^2-วินาที ดังรูปที่ 2.6 แสดงความเข้มโฟตอนที่ตกกระทบที่ตำแหน่ง X และฟลักซ์โฟตอนปรากฏที่ระยะทาง X+dX พลังงานที่ถูกดูดกลืนต่อหน่วยเวลาในระยะทาง dx คือ

$$\alpha I_V(x)dx \tag{2.8}$$

ซึ่ง α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืน (absorption coefficient) สัมประสิทธิ์การดูดกลืนคือความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนต่อหน่วยระยะทาง มีหน่วยเป็น cm^{-1} จากรูป 2.9 สามารถเขียนสมการได้

$$I_V(\mathrm{x}+\mathrm{dx}) - \mathrm{I}_V(x) = \frac{dI_V(\mathrm{x})}{dx}\cdot dx = -\alpha I_V(x)dx \tag{2.9}$$

หรือ

$$\frac{dI_v(X)}{dx} = -\alpha I_v(x) \tag{2.10}$$

ถ้าเงื่อนไขเริ่มต้นคือ $I_v(0) = \mathrm{I}_{v0}$ สามารถหาคำตอบได้จากสมการดิฟเฟอเรนเชียลสมการ (2.10)

$$I_v(x) = I_{v0}e^{-\alpha x} \tag{2.11}$$

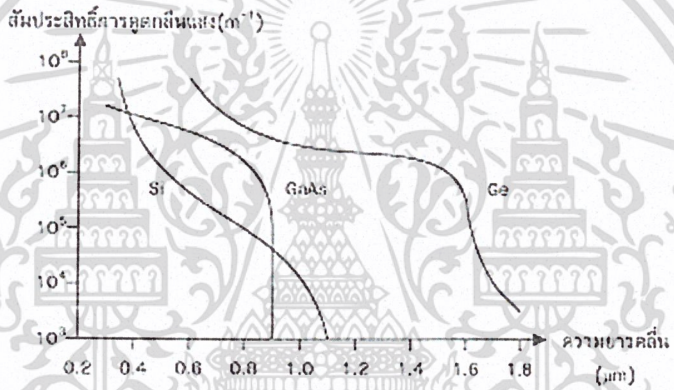
ความเข้มของฟลักซ์โฟตอนจะลดลงอย่างเอกซ์โปเนนเชียลกับระยะทางตลอดสารกึ่งตัวนำ ถ้าสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนมีค่ามากโฟตอนจะถูกดูดกลืนด้วยระยะทางที่สั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนในสารกึ่งตัวนำเป็นความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนกับช่องว่างแถบพลังงานและสัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อ $hV > E_G$ หรือ $\lambda < 1.24/E_G$ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนจะมีค่าน้อยมากเมื่อ $hV < E_G$ ดังนั้นในสารกึ่งตัวนำจะมีความโปร่งแสงเมื่อพลังงานของโฟตอนอยู่ในช่วงนี้ ถ้าสมมติว่าโฟตอนที่ถูกดูดกลืนหนึ่งตัวมีพลังงาน hV สร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮล หนึ่งคู่แล้วอัตราการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล คือ

$$g' = \frac{\alpha I_V(\mathrm{x})}{hV} \tag{2.12}$$

อัตราส่วน $I_V(\mathrm{x})/\mathrm{hV}$ คือฟลักซ์โฟตอนโดยเฉลี่ยแล้วโฟตอนที่ถูกดูดกลืนแสงหนึ่งตัวจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลน้อยกว่าหนึ่งคู่แล้วสมการ 2.11 จะต้องถูกคูณด้วยสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพ (efficiency factor)



รูปที่ 2.7 แสดงสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงกับความยาวคลื่นของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

จากในรูป 2.7 เมื่อสัมประสิทธิ์การดูดกลืนมีค่าเพิ่มขึ้น พลังงานโฟตอนที่ถูกดูดกลืนจะมีค่ามากขึ้นด้วย และถูกดูดกลืนที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำมากกว่าในเนื้อสารที่ลึกลงไป กรณีนี้จึงเป็นการผลิตพาหะส่วนเกินให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ จำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนต่อ cm^3 ต่อ sec เป็นความสัมพันธ์กับระยะทาง x จากพื้นผิวและเขียนได้ว่า $\alpha N_0 e^{-\alpha x}$ โดยที่ N_0 คือฟลักซ์ของโฟตอนที่ตกกระทบบนพื้นผิว ($cm^{-2}\,\mathrm{sec}^{-1}$)ของสารกึ่งตัวนำ เราสามารถรวมโฟตอนที่สะท้อนจากพื้นผิวเข้าไป โดยให้ $R(\lambda)$ คือสัดส่วนของโฟตอนที่ถูกสะท้อน (สำหรับซิลิคอน $R \approx 35\%$) สมมติว่าโฟตอนที่ดูดกลืนแต่ละตัวสร้างคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น ดังนั้นอัตราการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮลจึงเป็นความสัมพันธ์กับระยะทางจากพื้นผิว ซึ่งความสามารถของสารกึ่งตัวนำในการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกันจะถูกกำหนดด้วยค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (Absorption Coefficient) ตามกฎแลมเบิร์ด (lambert's Law) ดังสมการ

$$N(x) = N_0 \exp(-\alpha(\lambda)x) \tag{2.13}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ x คือ ระยะทางจากผิวของสารกึ่งตัวนำ

N_0 คือจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำต่อตารางเซนติเมตร

$\alpha(\lambda)$ คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำที่ความยาวคลื่นใดๆ

2.3 แหล่งกำเนิดแสง

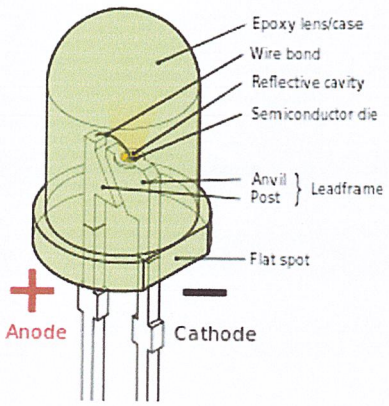
2.3.1 ไดโอดเปล่งแสง (light emitter diode: LED)

ไดโอดเปล่งแสง (Light emitting diode ย่อว่า LED) เป็นส่งประดิษฐ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่เปลี่ยนพลังงานแสงด้วยปรากฏการณ์ลูมิเนสเซนซ์ โครงสร้างพื้นฐานเป็นรอยต่อชนิด p-n ของสารกึ่งตัวนำ นับเป็นสิ่งประดิษฐ์เปล่งแสงที่มีขนาดเล็กเพียงประมาณ $0.3\times0.3\times0.2mm^3$ และถ้าเป็นLED ที่ใช้ในการสื่อสารด้วยแสงจะเล็กลงอีกหลายสิบเท่า LED ที่เปล่งแสงมองเห็นนิยมใช้ในสิ่งประดิษฐ์แสดงผล(ดิสเพลย์) ส่วน LED ที่เปล่งอินฟาเรดนิยมใช้ในการสื่อสารด้วยแสง
คุณสมบัติเด่นของ LED เมื่อเปรียบเทียบกับสิ่งประดิษฐ์กำเนิดแสงชนิดอื่นๆคือ มีขนาดเล็กใช้งานได้นาน ใช้แรงดันไฟฟ้าต่ำ (ประมาณ2-5V) ทำให้ใช้วงจรไอซีเป็นตัวจ่ายไฟฟ้าได้ ข้อเสียของ LED คือการใช้กำลังไฟฟ้าต่อ 1 ชิปค่อนข้างมาก(ระดับ mW ~ หลายสิบ mW) ไดโอดเปล่งแสงชนิดแสงสีขาวจะถูกสร้างขึ้นจาก LED สีแดง, สีเขียวและสีฟ้า ผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นผลสีที่ไม่ดีมากเนื่องจากการเปล่งแสงที่มีความยาวคลื่นแคบเพียงสามแถบเท่านั้นแต่ถ้าจะให้มีผลลัพธ์ที่ดีจะต้องใช้แสงของหลอด LED สีฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูงสุดเพื่อมาพัฒนาเป็นหลอด LED สีขาว โดยการนำแสงสีฟ้ามาเจือ Ce แล้วทำการเคลือบด้วยฟอสเฟอร์จะได้เป็นแสงสีเหลืองเมื่อผ่านการกระตุ้นจากสารเรืองแสง และนำแสงสีเขียวกับแสงสีแดงมาผ่านการกระตุ้นจากสารเรืองแสง ผลลัพธ์ที่ได้จากการผสมกันของสีแดงสีฟ้าและสีเขียว จะปรากฏให้ตาเรามองเห็นเป็นแสงสีขาว

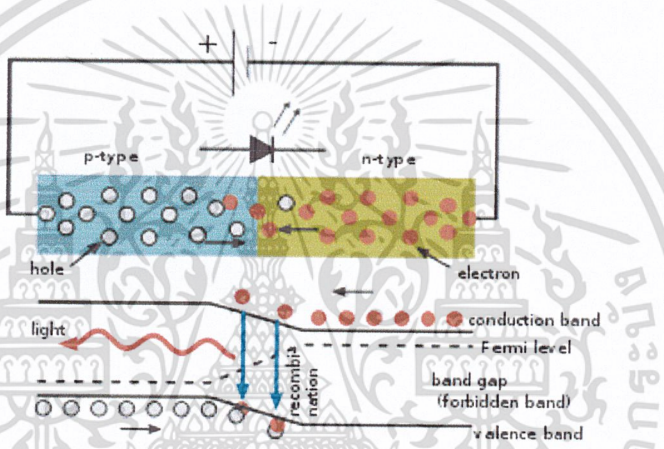
2.3.2 หลักการทำงานของไดโอดเปล่งแสง (light-emitting diode หรือย่อว่า LED)

โครงสร้างประกอบไปด้วยสารกึ่งตัวนำสองชนิด (สารกึ่งตัวนาชนิด N และสารกึ่งตัวนาชนิด P) ประกบเข้าด้วยกัน มีผิวข้างหนึ่งเรียบคล้ายกระจกเมื่อจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงผ่านตัว LED โดยจ่ายไฟบวกให้ขาแอโนด (A) จ่ายไฟลบให้ขาแคโทด (K) ทำให้อิเล็กตรอนที่สารกึ่งตัวนำชนิด N มีพลังงานสูงขึ้น จนสามารถวิ่งข้ามรอยต่อจากสารชนิด N ไปรวมกับโฮลในสารชนิด P การที่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านรอยต่อ PN ทำให้เกิดกระแสไหล เป็นผลให้ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนเปลี่ยนไปและคายพลังงานออกมาในรูปคลื่นแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.8 โครงสร้างภายในของหลอดไฟ LED



รูปที่2.9 การเกิดแสงจากหลอดไฟ LED

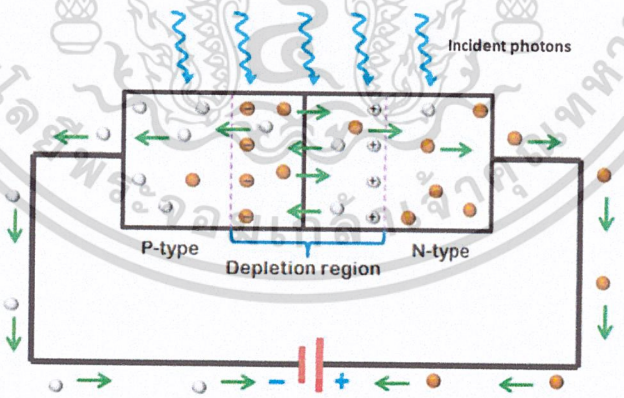
สีของแสงที่เกิดจากรอยต่อจะขึ้นอยู่กับชนิดของวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้าง LED ทั้งชนิดที่เป็นของเหลวและก๊าซ เช่น ใช้แกลเลียมฟอสไฟด์ (Gallium phosphide, Gap)ทำให้เกิดแสงสีแดง ใช้แกลเลียมอาซีไนด์ ฟอสไฟด์ (Gallium arsenide phosphide, GaAsP) เกิดแสงสีเหลืองและเขียว การควบคุมปริมาณแสงสว่างจะควบคุมกระแสที่ไหลผ่านหลอด LED หากกระแสที่ไหลสูงมากไปจะทำให้หลอดมีความสว่างมาก แต่หากป้อนกระแสสูงมากไปจะทำให้บริเวณรอยต่อของสารกึ่งตัวนำเกิดความร้อนปริมาณมากจนทำให้โครงสร้างหลอดเสียหายไม่สามารถใช้งานได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 โฟโตไดโอด (Photodiodes)

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจากสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบ โดยที่โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (Internal Photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ PN ทำหน้าที่คล้ายไดโอดเมื่อมีแสงตกกระทบที่รอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าขึ้น โดยทั่วไปโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง โดยที่รอยต่อPNจะถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่แสงผ่านได้ เช่น กระจกใส และมีการผลิตโฟโตไดโอดจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น Si, GaAs, GaAsP , และ GaP ซึ่งไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นต่างกัน สำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วมากคือพินโฟโตไดโอดและอะวะลานช์โฟโตไดโอด ซึ่งโฟโตไดโอดจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณความเข้มของแสง เมื่อโฟโตไดโอดได้รับไบแอสย้อนกลับ (Reverse Bias) ด้วยแรงดันค่าหนึ่งและมีแสงมาตกกระทบที่บริเวณรอยต่อ ถ้าแสงที่มาตกกระทบมีความยาวคลื่นที่เหมาะสม จะมีกระแสไหลในวงจรโดยอิเล็กตรอนที่ยึดติดอยู่กับอะตอมจะหลุดออกจากวงโคจร เกิดเป็นอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระขึ้น อิเล็กตรอนและโฮลจะเคลื่อนที่ไปในเขตปลอดพาหะ เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าย้อนกลับด้วยปริมาณที่แปรเปลี่ยนตามความเข้มของแสง เรียกว่ากระแสโฟโต(Photocurrent)

2.4.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.10 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

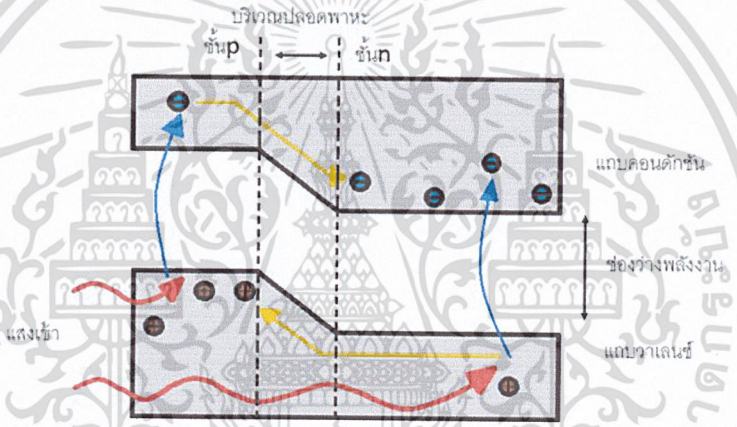
การทำงานของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อpnรูปที่2.10ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดpและต่อติดกับชนิดnเป็นรอยต่อpnที่รอยต่อpnนี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุซิลิคอนนั้นชั้น p เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ 1 μm ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ pn เป็นย่านปลอดพาหะในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาณการโดปสารเจือปนของชั้น p ชั้น n และชั้นล่างสุด (n^+)ให้เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้โฟโตไดโอดไวต่อแสงในย่านที่ต้องการได้และสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้ เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ถ้า

$$hv \geq E_g \tag{2.14}$$

แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืนโดยพลังงานโฟตอนของแสงจะเข้าไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชันและที่แถบเวเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่



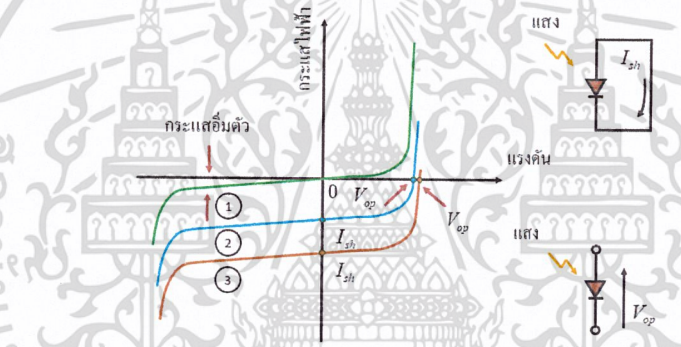
รูปที่ 2.11 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ชั้นปลอดพาหะ และชั้น n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายใน (built – in potential) พัดพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนกรณีโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเวนซ์ในชั้น n หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ชั้น p จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนของแสง (photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมในชั้น n จะทำให้ชั้น n มีประจุไฟฟ้าเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ต่อจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปสู่วงจรภายนอก

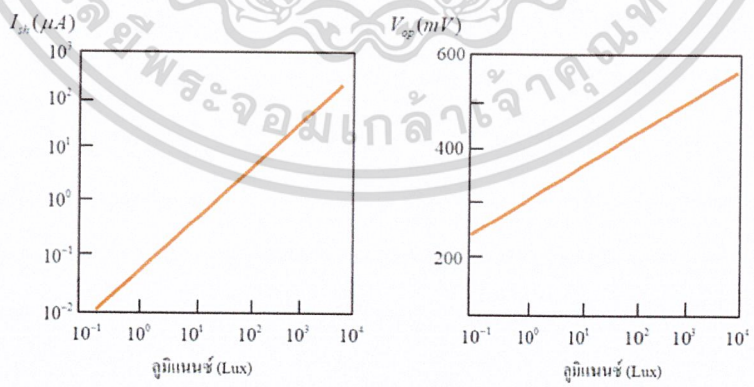
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

ในขณะที่ยังไม่มีการส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาพมืดจะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้เป็นตัวเรกติฟายเออร์ดังแสดงในรูป 2.12 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอดจะทำให้เส้น I-V เลื่อนแบบขนานไปสู่หมายเลข 2 และถ้าความเข้มแสงมากขึ้นก็จะเป็นหมายเลข 3 ในขณะที่กำลังส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรโฟโตไดโอดจะได้ค่า I_{sh} หรือ I'_{sh} โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปสู่แคโทด ถ้าเป็นวงจรเปิดเราจะได้แรงดันวงจรเปิด V_{op} หรือ V'_{op} และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sh} จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มของแสงในลักษณะเชิงเส้นตรงที่ดีมากดังแสดงในรูปที่ 2.13 เส้นหมายเลขที่ 1 แสดงในสภาพมืดและมีรูปร่างเหมือนของโฟโตไดโอดทั่วไป เส้นหมายเลขที่ 2 และ 3 แสดงในสภาพมีแสงและเส้นกราฟจะเคลื่อนลงด้านล่าง



รูปที่ 2.12 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.13 ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sh} ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินพุต ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด V_{op} และความเข้มของแสงอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าความเข้มของแสงอยู่ในช่วง $10^{-12}-10^{-13}$ (W) I_{sh} จะเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงประมาณ 6-8 หลัก ความเข้มของแสงที่ต่ำที่สุดที่ยังคงทำให้ I_{sh} เปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับค่า NEP (Noise Equivalent Power) ของโฟโตไดโอด ส่วนความเข้มแสงที่สูงที่สุดที่ยังคงทำให้ I_{sh} เป็นเส้นตรงจะขึ้นกับค่าความต้านทานของโหลดและแรงดันไบแอสย้อนกลับตามสมการต่อไปนี้

$$P_{\max} = \frac{V_{Bi} + V_R}{(R_s + R_L)\cdot R_\lambda} \tag{2.15}$$

โดยที่ $P_{\max}$: ความเข้มแสงที่สูงสุดที่กระแสไฟฟ้ายังเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงกับความเข้มของแสง

V_{Bi} : ศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) (V)

V_R : แรงดันป้อนย้อนกลับ (V)

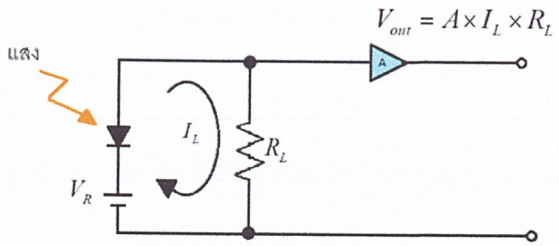
R_L : ความต้านทานโหลด (Ω)

R_λ : เรสปอนซิวิตีหรือความไวของโฟโตไดโอด (A/W)ที่ความยาวคลื่น λ

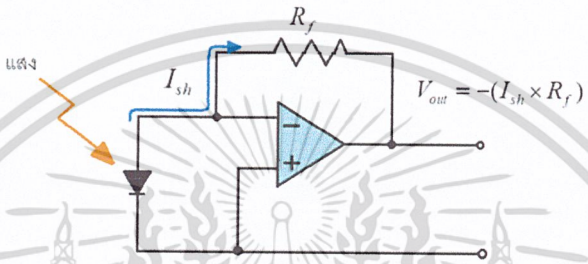
R_S : ความต้านทานอนุกรม(Ω)

เนื่องจากแรงดันวงจรเปิด V_{op} แปรผันตรงกับค่า ln P (P คือความเข้มของแสง) และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ V_{op} เปลี่ยนแปลงมากด้วยดังนั้นจึงไม่เหมาะที่จะใช้ V_{op} เป็นเกณฑ์ในการวัดความเข้มของแสง การใช้กระแสลัดวงจร I_{sh} เป็นเกณฑ์ในการวัดความเข้มของแสงทำได้โดยการใช้วงจรดังที่แสดงในรูป 2.14 (ก) มีโหลดตัวต้านทาน R_L ต่ออยู่ที่เอาต์พุตของโฟโตไดโอด ดังนั้นแรงดัน $I_{sh}\times R_L$ จึงสามารถขยายได้โดยใช้แอมพลิฟายเออร์ A และถ้ามีการไบอัสย้อนกลับด้วยแรงดัน V_R จะช่วยทำให้สามารถวัดแสงที่มีการเปิดและปิดแสงด้วยความเร็วสูงได้เร็วขึ้น แต่มีข้อเสียที่ลักษณะเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเข้มของแสงในวงจรนี้ไม่ค่อยจะดีนัก รูปที่ 2.14 (ข) เป็นวิธีการใช้ออปแอมป์แบบวงจรป้อนกลับซึ่งมีความต้านทานอินพุตสมมูล (equivalent input resistance) มีค่าน้อยกว่า R_f หลายหลักทำให้สามารถใช้วงจรนี้วัด I_{sh} ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าอุดมคติได้ดีมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ก.ทำการไบแอสแบบย้อนกลับและวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลด R_L



ข.ต่อโฟโตไดโอดกับออปแอมป์และวัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร I_{sh}

รูปที่ 2.14 การวัดความเข้มของแสงด้วยโฟโตไดโอด

2.4.3 ลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด

1. สเปกตรัมผลตอบสนอง ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่าน้อยกว่าช่องพลังงานของสารกึ่งตัวนำ(E_g) จะไม่เกิดการดูดกลืนแสง ความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกดูดกลืนได้จะต้องมีค่าดังนี้

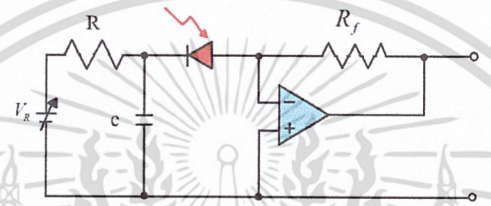
$$\lambda \leq \frac{1240}{E_g} \quad \text{(nm)} \qquad (2.16)$$

ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้อง กรณีของวัสดุ Si มีค่า E_g เท่ากับ 1.1 eV ดังนั้นความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกดูดกลืนด้วย Si ต้องสั้นกว่า1,100nm หรือกรณีของวัสดุ GaAs มีค่า E_g เท่ากับ 1.4eV ดังนั้นความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกดูดกลืนด้วย GaAs ต้องสั้นกว่า 700nm และการที่สเปกตรัมมีลักษณะเป็นภูเขาเพราะว่าระยะทางแทรกซึม (penetration depth) ของแสงจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นยาวกว่า 300nm ผ่านได้ต้องการให้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 300nm ต้องใช้หน้าต่างกระจกชนิดควอตซ์ (quartz)

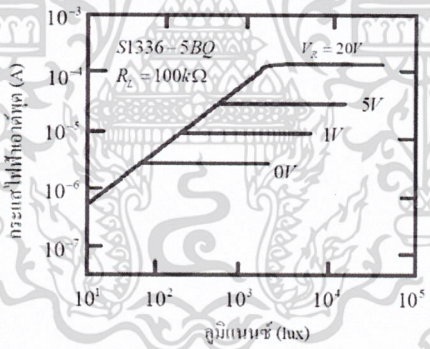
2.การไบแอสย้อนโฟโตไดโอด เนื่องจากโฟโตไดโอดทำงานโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ดังนั้นโฟโตไอดสามารถให้สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้แม้จะไม่มีการป้อนพลังงานไฟฟ้าจากวงจรภายนอก แต่การป้อนแรงดันไบแอสแบบย้อนเข้าสู่โฟโตไดโอดขณะทำงานด้วยจะช่วยให้โฟโตไดโอดมีความเร็วตอบสนองได้ดีขึ้น และมีคุณสมบัติเชิงเส้นที่ดีขึ้น โดยปกติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของโฟโตไดโอดขึ้นกับความเข้มของแสง คือการเกิดจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นกับความเข้มของแสง เนื่องจากการไบแอสย้อนจะทำให้ชั้นปลอดพาหะมีความหนาเพิ่มขึ้นได้บ้าง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มได้บ้างเล็กน้อยตามขนาดของแรงดันไบแอสย้อนกลับ ดังรูปที่ 2.15 แสดงตัวอย่างวงจรการไบแอสย้อนให้โฟโต รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและความเข้มของแสงโดยมีแรงดันไบแอสย้อน V_R เป็นพารามิเตอร์ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม V_R จะทำให้คุณสมบัติเชิงเส้นของโฟโตไดโอดดีขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการไบแอสย้อนจะมีข้อดี แต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียด้วย เช่น ทำให้มีกระแสไฟฟ้ามืดและสัญญาณรบกวนเพิ่มด้วยและการไบแอสย้อนที่ค่าแรงดันสูงมากๆจนเกิดขีดจำกัดจะทำให้โฟโตไดโอดเสียหาย



รูปที่ 2.15 ตัวอย่างวงจรสำหรับไบแอสย้อนให้โฟโตไดโอด



รูปที่ 2.16 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและความเข้มของแสงโดยมีแรงดันไบแอสย้อน V_R เป็นพารามิเตอร์

3. ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดหมายถึง เวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนถึงการมีกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยช่วงเวลาขาขึ้น t_r หรือค่าช่วงเวลาขาลง t_f นิยามของ t_r ได้แก่ช่วงระยะเวลาที่สัญญาณเอาต์พุตเพิ่มจาก 10% เป็น 90% t_r มีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับแฟกเตอร์ต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1) ค่าคงที่เวลา τ_1 (Time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้า C_t ของโฟโตไดโอดและค่าค่าความต้านทานของโหลด R_L (C_t เป็นผลรวมทั้งของตัวโฟโตไดโอด C_j เป็นของภาชนะที่บรรจุโฟโตไดโอด)

3.2) ค่าเวลาการแพร่ซึม τ_2 (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกชั้นปลอดพาหะ ถ้ากรณีที่ค่าคงที่เวลามีค่ามากกว่าค่าเวลาการแพร่ซึม กล่าวคือถ้า $\tau_1 > \tau_2$ จะได้รูปใกล้เคียงของ t_r ว่าเท่ากับ

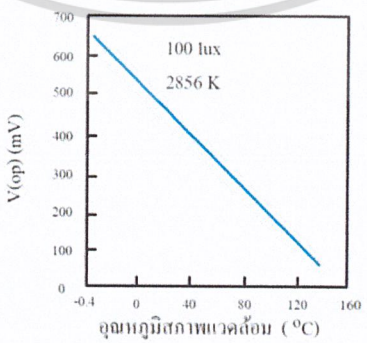
$$t_r = 2.2r_1 = 2.2C_t \times R_L \tag{2.17}$$

จากสมการนี้ ทำให้เราทราบว่า ถ้าต้องการให้ช่วงเวลาขาขึ้น t_r มีค่าน้อยๆ จะต้องออกแบบให้ C_t หรือ R_L มีค่าน้อย นอกจากนี้โดยปกติ C_j (ของรอยต่อ p-n ในโฟโตไดโอด) แปรผันตรงกับพื้นที่รับแสง A และแปรผกผันกับ V_R และสภาพต้านทาน ρ ของวัสดุแผ่นฐานสารกึ่งตัวนำตามสูตร

$$C_j \alpha A\{(V_R + 0.5) \times \rho\}^{-1/2 \approx -1/3} \tag{2.18}$$

เพราะฉะนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองที่ความเร็วสูงๆ จึงควรออกแบบให้ A มีค่าน้อยและ ρ มีค่ามากและมีการไบแอสย้อนด้วย แต่ต้องระวังว่าการไบแอสย้อนขณะที่แสงมีความเข้มน้อยจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามืดซึ่งเป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวนได้

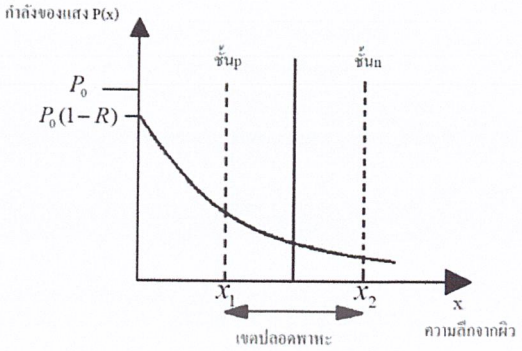
4.อิทธิพลของอุณหภูมิ อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำงานของโฟโตไดโอดมาก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงและกระแสไฟฟ้ามืดเกิดการเปลี่ยนแปลงกล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นดีขึ้น ในขณะที่ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นแย่ลงนอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานชันต์ R_{sh} ลดลงและสัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอลและสัญญาณรบกวนชนิดช็อตเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าแรงดันวงจรเปิด V_{op} ของโฟโตไดโอดก็ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยที่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น V_{op} จะลดลงแบบเชิงเส้นดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.17



รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิดในโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอนและอุณหภูมิสภาพแวดล้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 กระแสไฟฟ้าที่ผลิตในชั้นปลอดพาหะ



รูปที่ 2.18 การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของโฟโตไดโอดย่านปลอดพาหะอยู่ระหว่างตำแหน่ง x_1 และ x_2

จากในรูปที่ 2.18 ถ้าให้ x_1 และ $(x_2 - x_1)$ x_2 แสดงตำแหน่งขอบของชั้นปลอดพาหะในชั้น p และ n ตามลำดับดังนั้น กำลังของแสงที่ถูกดูดกลืนในชั้นปลอดพาหะนี้ $(x_2 - x_1)$ จึงสามารถคำนวณได้จาก

$$P(x_1) - P(x_2) = P_0[\exp(-\alpha x_1) - \exp(-\alpha x_2)] \tag{2.19}$$

ดังนั้นกระแสไฟฟ้า J_{0DL} ที่ชั้นปลอดพาหะจึงมีค่าเท่ากับ

$$J_{0DL} = \frac{e\eta_i}{h\nu}\Phi_0(1-R)[\exp(-\alpha x_1) - \exp(-\alpha x_2)] \tag{2.20}$$

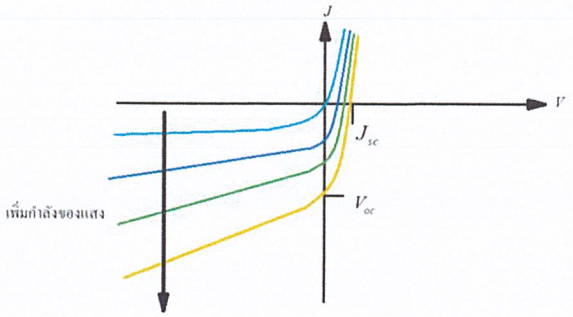
โดยที่ η_i คือประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency) โดยมีนิยามว่าอัตราส่วนของจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นในชั้นปลอดพาหะในหนึ่งหน่วยปริมาตรต่อจำนวนของโฟตอนที่ถูกดูดกลืนในชั้นนี้และ Φ_0 คือฟลักซ์ของแสงอินพุต

สมการที่ 2.20 นี้ช่วยบอกให้เราทราบว่าโฟโตโอดที่ดีควรออกแบบดังนี้คือ

1. ควรมีประสิทธิภาพควอนตัมภายในสูง
2. ควรมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงต่ำ
3. x_1 ควรมีค่าน้อยนั้นคือรอยต่อควรอยู่ตื้นและความหนาของชั้นปลอดพาหะ $x_2 - x_1$ ควรมีค่ามาก

การไบแอสย้อนเข้าสู่โฟโตไดโอดมีส่วยช่วยทำให้กระแสไฟฟ้าทางแสงมีค่ามากขึ้น เพราะว่าการไบแอสย้อนทำให้ชั้นปลอดพาหะมีความหนามากขึ้น ($w\alpha V^{1/2}$) นั่นคือ ช่วยเพิ่มค่าของ $x_2 - x_1$ ดังแสดงในรูปที่ 2.19 นอกจากสมการที่ 2.20 จะพบว่าถ้าเพิ่มกำลังของแสงจะทำให้กระแสไฟฟ้าทางแสงเอาต์พุตเพิ่มขึ้นแบบเชิงเส้นกับกำลังของแสงตามปกติจะใช้งานโฟโตไดโอดในจตุภาค (Quadrant) ที่3 และถ้าใช้งานในจตุภาคที่4 ก็จะเป็นกรณีของเซลล์แสงอาทิตย์ ดังรูป2.19

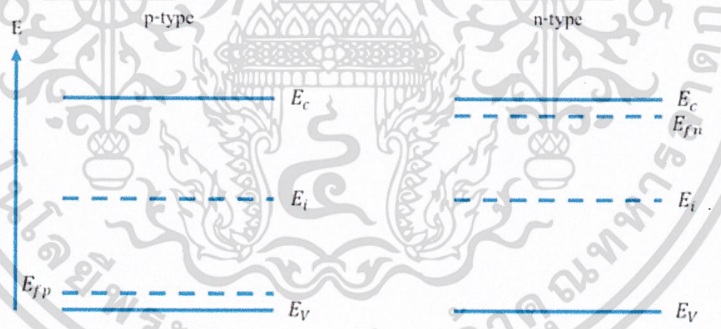
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 เส้นลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันในรอยต่อ pn ภายใต้การส่องด้วยแสงที่มีกำลังต่างๆ

2.4.5 ปรากฏการที่ p-n junction อยู่ในภาวะสมดุล

ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและความหนาแน่นของโฮล ในแถบความนำและแถบวาเลนซ์ ที่สภาวะสมดุลความร้อน ความหนาแน่นของพาหะเหล่านี้จะอิสระต่อกัน เป็นการแสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆก่อนการสัมผัสกัน จะสังเกตว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี จะมีระดับพลังงานเฟอร์มิอยู่สูงกว่าแถบวาเลนซ์ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะมีระดับพลังงานเฟอร์มิต่ำกว่าแถบความนำก่อนที่จะสัมผัสกัน ซึ่งการเขียนโครงสร้างแถบพลังงานเพื่อจะพิจารณาระดับพลังงานเฟอร์มิ ได้ดังรูป

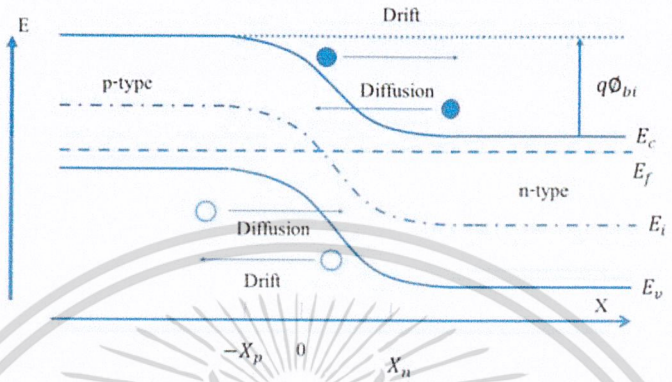


รูปที่ 2.20 แสดงค่าพารามิเตอร์ต่างๆก่อนจะเกิดรอยต่อ

เมื่อ p-n junction ถูกสร้างขึ้น โฮลทางด้าน p-type จะมีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทางด้านn-type และอิเล็กตรอนทางด้าน n-type จะมีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทางด้าน p-type ดังนั้นจากความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกันทั้งสองด้าน จึงทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะจากด้านที่มีความหนาแน่นมากไปยังความหนาแน่นน้อยคือ โฮลทางด้าน p-type ที่อยู่บริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปในด้าน n-type และอิเล็กตรอนทางด้าน n-type ที่อยู่บริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปในด้าน p-type ทำให้เกิดการรวมตัว (recombination) ของพาหะทั้งสอง ซึ่งผลการรวมตัวนี้จะทำให้อะตอมสารเจือบริเวณใกล้ๆกับp-n junctionกลายเป็นไอออนและแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาได้ ซึ่งอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารเจือทางด้าน n-type จะสูญเสียอิเล็กตรอนไป ทำให้แสดงตัวเป็นไอออนบวกและอะตอมของสารเจือทางด้าน p-type จะสูญเสียโฮลไปทำให้แสดงตัวเป็นไอออนลบจึงทำให้เกิดการสะสมประจุไฟฟ้าที่บริเวณ p-n junction ดังรูป 2.21



รูปที่ 2.21 แสดงรอยต่อ p-n เมื่อสัมผัสกันแล้วเข้าสู่สภาวะสมดุล

ซึ่งบริเวณที่เกิดต่อจะเกิดสนามไฟฟ้าภายในไปทำการขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน จึงทำให้การแพร่ของประจุพาหะทั้งสองชนิดค่อยๆลดลงจนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในมีอำนาจมากพอที่จะยับยั้งการแพร่ของประจุพาหะทั้งสองจึงเข้าสู่ภาวะสมดุล(Equilibrium) ซึ่งโครงสร้างแถบพลังงานเฟอร์มิของทั้งสองจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่าน p-n junction ดังรูปด้านบน ซึ่งกำหนดให้

E_{fp} คือระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ p-type

E_{fn} คือ ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ n-type

E_C คือระดับพลังงานแถบความนำ

E_V คือระดับพลังงานแถบวาเลนซ์

E_i คือระดับพลังงานที่อยู่กึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (Energy gap) ของสารกึ่งตัวนำ

จากภาวะสมดุลแล้วทำให้บริเวณภายในรอยต่อนี้ไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิด มีแต่อะตอมของสารเจือ n-type และ p-type ซึ่งอยู่ในสภาพไอออนบวกและไอออนลบในบริเวณปลอดพาหะและสนามไฟฟ้าที่อยู่บริเวณนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าภายใน (built in voltage) อีกด้วย ซึ่งแรงดันนี้ทำหน้าที่เป็นกำแพงศักย์ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

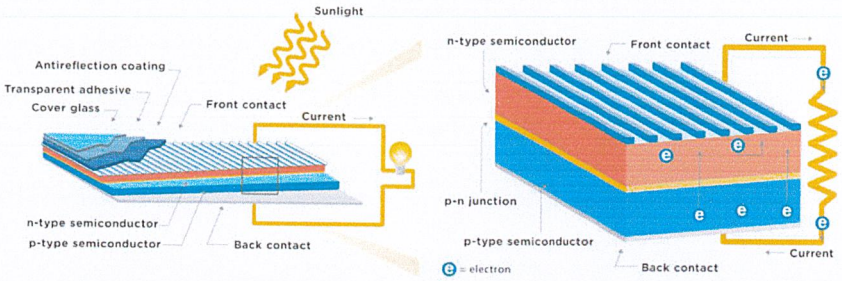
2.5 เซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์ (Solar Cell) เป็นสิ่งประดิษฐ์ทาง electronic ที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นอุปกรณ์สำหรับเปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า โดยการนำสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิกอน ซึ่งมีราคาถูกที่สุดและมีมากที่สุดบนพื้นโลกมาผ่านกระบวนการทางวิทยาศาสตร์ เพื่อผลิตให้เป็นแผ่นบางบริสุทธิ์ เมื่อมีแสงตกกระทบบนแผ่นเซลล์แสงอาทิตย์ รังสีของแสงที่มีอนุภาคของพลังงานประกอบที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน (Electron) ในสารกึ่งตัวนำจนมีพลังงานมากพอที่จะกระโดดออกมาจากแรงดึงดูดของอะตอม และเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระดังนั้นเมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ครบวงจรจะทำให้เกิดไฟฟ้ากระแสตรงขึ้น วัสดุสำคัญที่ใช้ทำเซลล์แสงอาทิตย์ได้แก่ สารซิลิคอน (Si) ซึ่งเป็นสารชนิดเดียวกับที่ใช้ทำชิพในคอมพิวเตอร์ และเครื่องอิเล็กทรอนิกส์ ซิลิคอนเป็นสารที่ไม่เป็นพิษ มีการนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ใช้กันอย่างแพร่หลายเพราะมีราคาถูก คงทน และเชื่อถือได้ นอกจากนี้ยังมีวัสดุชนิดอื่นที่สามารถนำมาผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ได้ เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (CIS) และ แคดเมียมเทลเลอไรด์ แต่ยังมีราคาสูง และบางชนิดยังไม่มีการพิสูจน์เรื่องอายุการใช้งานว่าสามารถใช้งานได้นาน ข้อเสียของ Si คือ การทำให้บริสุทธิ์และอยู่ในรูปของสารที่พร้อมจะทำเซลล์แสงอาทิตย์นั้นมีราคาแพงและแตกหักง่ายในขบวนการผลิต

2.5.1 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

โครงสร้างโดยทั่วไปของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ทำด้วยซิลิคอน จะมีผลึกซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานซึ่งมีความหนาประมาณ 200-400 ไมครอน ด้านที่รับแสงจะมีชั้นแพร่ซึมความหนาประมาณ 0.2-1.0 ไมครอน ออกแบบความลึกของรอยต่อพี-เอ็นของเซลล์แสงอาทิตย์ให้มีค่าน้อยๆเพราะต้องการให้แสงตกกระทบเซลล์แสงอาทิตย์ทะลุถึงรอยต่อพี-เอ็นให้มากที่สุด หากรอยต่อพี-เอ็นอยู่ลึกเกินไปจะทำให้จำนวนพาหะที่เกิดขึ้นจากการดูดกลืนแสงแพร่ซึมถึงรอยต่อพี-เอ็นได้น้อยลงส่งผลให้ปริมาณการเกิดความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าทางแสงที่ได้มีจำนวนน้อยลง ดังนั้นในการออกแบบขั้วโลหะรับแสงจึงมักมีการออกแบบให้เป็นลักษณะเป็นลายเส้นคล้ายก้างปลาหรือรูปแบบที่ใช้พื้นที่น้อยที่สุดเพื่อให้รับแสงอาทิตย์ได้มากที่สุดและขณะเดียวกันขั้วไฟฟ้าสามารถรวบรวมพาหะนำไฟฟ้าที่เกิดขึ้นได้มากที่สุด ส่วนขั้วไฟฟ้าด้านหลังของเซลล์แสงอาทิตย์จะเป็นผิวสัมผัสโลหะเต็มแผ่น ผิวทางด้านรับแสงที่นอกเหนือจากขั้วโลหะแล้วยังมีชั้นต้านการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating) ปิดทับเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดกลืนแสงด้วยชั้นต้านการสะท้อนแสง เมื่อนำเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้ไปประกอบแผงที่ห่อหุ้มมิดชิด ป้องกันความชื้นและฝุ่นละออง เพื่อให้เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณภาพดี

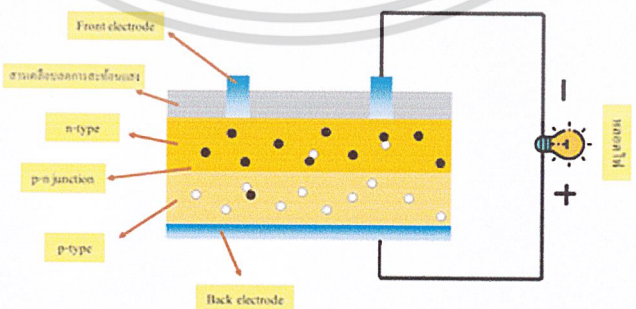
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์

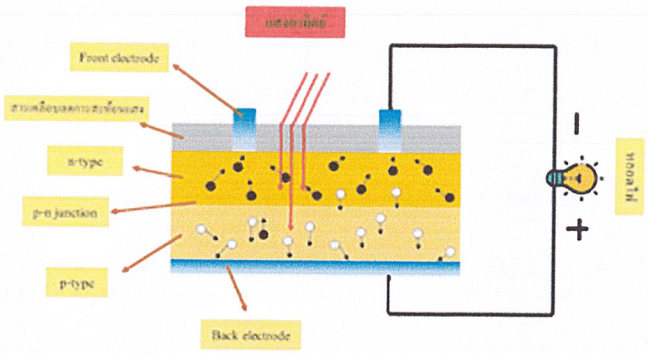
2.5.2 หลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์

การทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์เป็นกระบวนการเปลี่ยนแสงเป็นไฟฟ้าได้โดยตรงโดยเมื่อแสงซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและมีพลังงานมากระทบกับสารกึ่งตัวนำจะเกิดการถ่ายทอดพลังงานระหว่างกันพลังงานจากแสงจะทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนขึ้นในสารกึ่งตัวนำจึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและสามารถนำเอากระแสไฟฟ้าดังกล่าวไปใช้งานได้ในสภาวะที่เซลล์ยังไม่ได้รับแสง n-type ซิลิกอนซึ่งอยู่ด้านหน้าของเซลล์จะมีประจุพาหะส่วนใหญ่คืออิเล็กตรอนแต่ก็ยังมีโฮลปะปนอยู่บ้าง ส่วนด้านหน้าของ n-type จะมีแถบโลหะเรียกว่า Front electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน p-type ซิลิกอนซึ่งอยู่ด้านหลังของเซลล์ ประจุพาหะส่วนใหญ่คือโฮล แต่ยังมีอิเล็กตรอนปะปนอยู่บ้าง ด้านหลังของ p-type ซิลิกอนจะมีแถบโลหะเรียกว่า Back electrode ทำหน้าที่เป็นตัวรวบรวมโฮลดังรูปที่ 2.23 เมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ แสงอาทิตย์จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนและโฮล เมื่อพลังงานสูงพอจะทำให้อิเล็กตรอนและโฮลวิ่งเข้าหากันเพื่อจับคู่ โดยที่อิเล็กตรอนจะวิ่งไปที่ชั้น n-type และโฮลจะวิ่งไปที่ชั้น p-type ดังรูปที่ 2.24 หลังจากนั้นอิเล็กตรอนจะวิ่งไปรวมกันที่ Front electrode และโฮลจะวิ่งไปรวมกันที่ Back electrode เมื่อมีการต่อวงจรไฟฟ้าภายนอกเข้า Front electrode และ Back electrode จึงทำให้ครบวงจร กระแสไฟฟ้าก็จะเกิดขึ้น เนื่องจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮลจะวิ่งเพื่อจับคู่กัน ดังรูปที่ 2.25

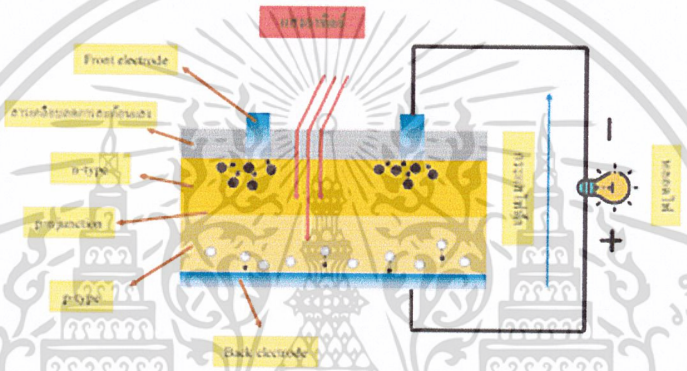


รูปที่ 2.23 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อยังไม่มีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.24 เซลล์แสงอาทิตย์เมื่อมีแสงอาทิตย์มาตกกระทบ



รูปที่ 2.25 แสงอาทิตย์ที่มาตกกระทบลงบนเซลล์แสงอาทิตย์และทำให้อิเล็กตรอนและโฮลมีการจับคู่กัน

2.6 กระแสไฟฟ้าทางแสง

2.6.1 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าทางแสง

ในหลักการทำงานของเซลล์แสงอาทิตย์จะมีการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่อพลังงานโฟตอนของเซลล์แสงอาทิตย์มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของวัตถุสารกึ่งตัวนำ แต่ยังไม่ได้มีการพิจารณาอย่างละเอียดว่าการดูดกลืนแสงหรือการผลิตพาหะนั้นเกิดขึ้นที่ส่วนใดของของเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งจากรูปที่ 2.26 แสดงสภาพที่กำลังมีแสงส่องเข้าทางด้านชั้น n และกำลังมีการไบอัสแบบกลับที่รอยต่อพี-เอ็น โดยที่หมายเลขในรูปแสดงถึงกลไกการดูดกลืนแสงในลักษณะต่างๆ แต่ละหมายเลขมีความหมายต่อไปนี้

หมายเลข 1 เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์ด้วยสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่เข้าไปด้านหลังและห่างไกลจากชั้นปลอดพาหะ (ในรูปนี้ชั้น n อยู่ด้านหลัง แต่อาจจะสลับกับชั้น p) ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานจะทำให้เกิดการดูดกลืนแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ แต่เนื่องจากไม่มี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าในชั้นนี้ ดังนั้นพาหะที่เกิดขึ้นในจุดที่ 1 จะเกิดการเคลื่อนที่ได้ด้วยวิธีการแพร่ซึมเท่านั้นซึ่งพาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนใหญ่จะรวมตัวกันมากกว่าจึงไม่มีผลต่อเอาต์พุต

หมายเลข 2 เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์ในชั้น p ระหว่างแถบวาเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์แต่ในที่สุดพาหะอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ก็จะตกลงมารวมตัวกับโฮลจึงไม่มีผลต่อเอาต์พุตเช่นกัน

หมายเลข 3 เป็นเหมือนกรณีที่ 2 แต่เป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับโดเนอร์และแถบคอนดักชันและไม่มีผลต่อเอาต์พุต

หมายเลข 4 เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์โดยโฮลอิสระ (free hole absorption) ในแถบวาเลนซ์ของชั้น p และเพียงแต่ระดับพลังงานของโฮลลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

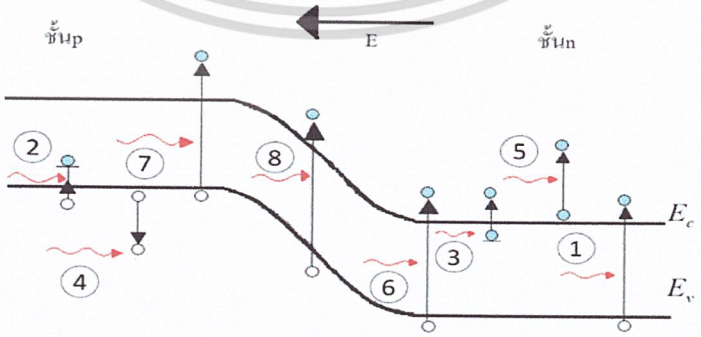
หมายเลข 5 เป็นเหมือนกรณีที่ 4 แต่เป็นการดูดกลืนแสงอาทิตย์ด้วยอิเล็กตรอนอิสระในแถบคอนดักชันและไม่มีผลต่อเอาต์พุต

หมายเลข 6 เป็นการดูดกลืนแสงชั้น n ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างมากจะแพร่ซึมไปสู่ชั้น n ทางด้านหลัง และพาหะโฮลข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นได้สูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้นปลอดพาหะและโฮลจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปสู่ชั้น p และโฮลเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

หมายเลข 7 เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น p ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างน้อยจะมีความเป็นไปได้สูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้นปลอดพาหะและอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลผ่านไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

หมายเลข 8 เป็นการดูดกลืนแสงและผลิตคู่อิเล็กตรอน-โฮลในชั้นปลอดพาหะ พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดและแยกออกจากกันให้ไหลไปสู่ n และ p ตามลำดับซึ่งจะมีผลต่อเอาต์พุตมากที่สุด

ดังนั้นจากกลไกหมายเลข 5-8 โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมายเลข 8 จะมีผลต่อการผลิตกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากที่สุด



รูป 2.26 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆในรอยต่อ p-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.2 ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : QE)

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : QE) หรือ อัตราส่วนที่ปริมาณอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ได้ต่อจำนวนโฟตอน (IPCE) คือปริมาณที่บ่งบอกถึงความไวต่อการรับแสงของอุปกรณ์ เช่น ฟิล์มสำหรับถ่ายภาพหรืออุปกรณ์สำหรับชาร์จประจุไฟฟ้าคู่ควบ (CCD) โดยที่เปอร์เซ็นต์ของโฟตอนของแสงที่พุ่งเข้าชนพื้นผิวที่ไวต่อปฏิกิริยาซึ่งจะทำให้เกิดขั้วคู่ โฮล-อิเล็กตรอนขึ้น มันคือการตรวจวัดความแม่นยำเที่ยงตรงของอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่มีความไวต่อแสง เนื่องจากพลังงานของโฟตอนขึ้นอยู่กับ ความยาวคลื่นของตัวมันเอง ซึ่ง QE จะถูกใช้บ่อย ๆ ในการวัดเกินกว่าในย่านของความแตกต่างของความยาวคลื่นเพื่อแสดงคุณลักษณะพิเศษของค่าประสิทธิภาพของอุปกรณ์ที่มีต่อแต่ละค่าระดับพลังงานของโฟตอน QE สำหรับโฟตอนที่มีพลังงานต่ำกว่าช่องว่างพลังงานนั้นจะมีค่าเป็นศูนย์ ฟิล์มถ่ายภาพโดยทั่วไปแล้วจะมีค่า QE น้อยกว่า 10%, ในขณะที่ CCDs สามารถมี QE ดีกว่า 90% ในบางช่วงของความยาวคลื่น

ค่าประสิทธิภาพควอนตัมของเซลล์แสงอาทิตย์แสดงถึงปริมาณของกระแสไฟฟ้าที่เซลล์จะผลิตได้เมื่อมีการฉายรังสีโฟตอนโดยเฉพาะของความยาวคลื่น ถ้าประสิทธิภาพควอนตัมของเซลล์ถูกนำมารวมโดยทั่วตลอดทั้งสเปกตรัมคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าของพลังงานแสงอาทิตย์แล้ว สามารถประเมินปริมาณของกระแสซึ่งเซลล์จะผลิตได้เมื่อสัมผัสกับแสงแดดซึ่งประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของเซลล์แสงอาทิตย์ขึ้นกับความยาวคลื่นแสง โดยประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า (Incident Photon to Current Conversion Efficiency, IPCE) หรือเรียกว่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก สามารถคำนวณได้จาก

$$IPCE = \frac{1240 \times J_{sc}(\mathrm{A/mm^2})}{\lambda(nm) \times I_{inc}(W/mm^2)} \qquad (2.21)$$

เมื่อ J_{sc} (short circuit current density) คือความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าลัดวงจรต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด

λ คือความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบ

I_{inc} คือความเข้มแสงที่ตกกระทบต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่โฟโตอิเล็กโทรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่3

วิธีดำเนินงานวิจัย

ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะศึกษาการวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงโดยใช้โฟโตไดโอดทำการทดสอบในแต่ละความยาวคลื่นเพื่อดูการตอบสนองเมื่อความยาวคลื่นของแสงที่ตกกระทบทำให้มีค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงเปลี่ยนไปและศึกษาถึงสาเหตุของการเพิ่มขึ้นและลดลงของกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น

3.1 ขั้นตอนวิธีการดำเนินงาน

1) ศึกษาหลักการทำงานและการตอบสนองของโฟโตไดโอดเมื่อมีแสงมาตกกระทบ
2) ออกแบบขั้นตอนและสร้างระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงเพื่อทำการทดสอบความยาวคลื่นของโฟโตไดโอดสามารถนำมาใช้งานได้
3) ทำการทดสอบระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงเพื่อวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในช่วงความยาวคลื่น400-700นาโนเมตร

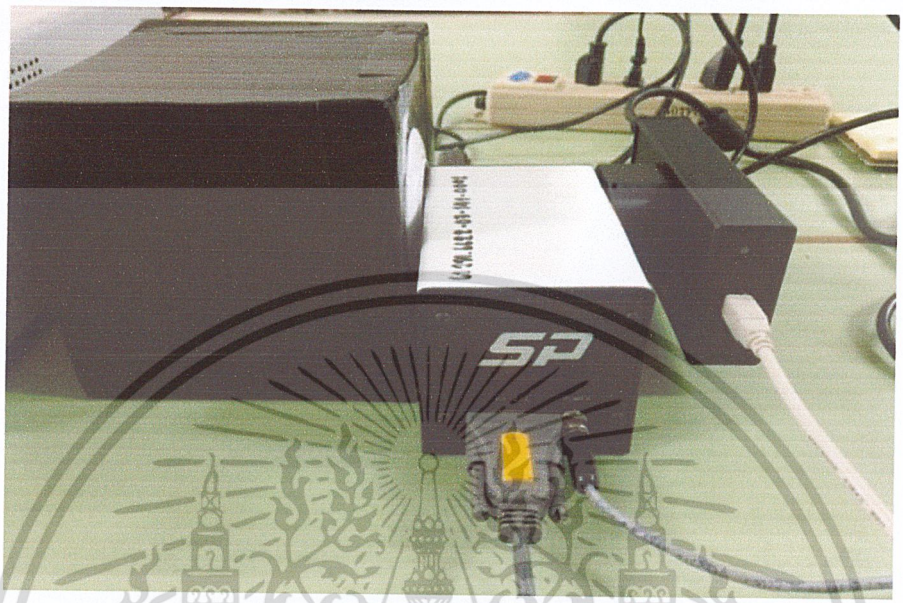
3.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1) Day light LED 6W 220V 650 Lumen (Lm) 100Lm/W
2) Monochromator
3) HP HEWLETT PACKARD 34401A Multimeter
4) Photodiode เบอร์ S1223 และ BPX 65 BX
5) Thorlabs optical power monitor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 วิธีการทดลอง

1) ต่ออุปกรณ์ดังรูปโดยใช้ detector เพื่อตรวจสอบการทำงานของ Monochromator



รูปที่ 3.1 การเชื่อมต่อระบบวัดPhotocurrent โดยใช้Detector

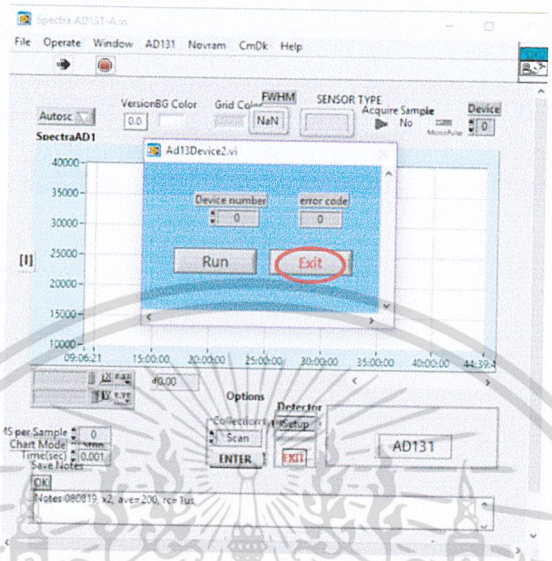


รูปที่ 3.2 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อของอุปกรณ์ในระบบวัดโดยใช้Detector

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

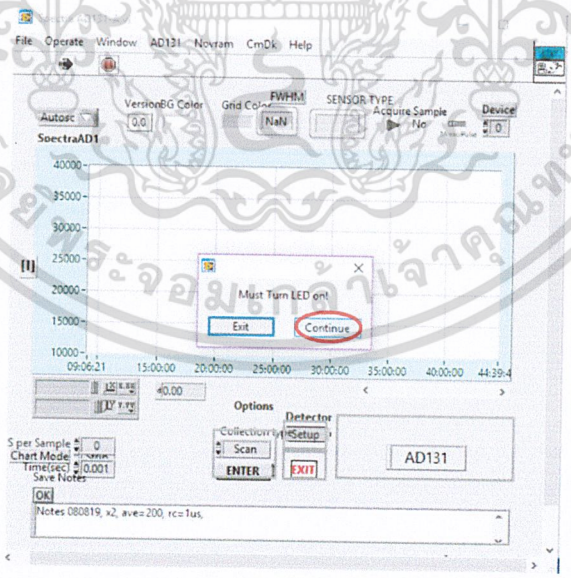
2) ทำการเปิดโปรแกรม AD131a เพื่อใช้ Detector ตรวจสอบการทำงานของ monochromator

2.1 เปิดโปรแกรม AD131 จากนั้นกด Exit



รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่1

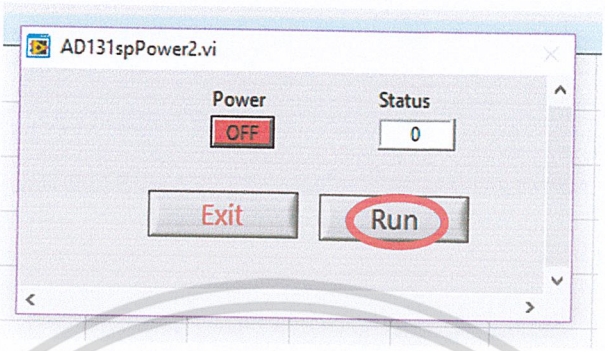
2.2 เลือก Continue



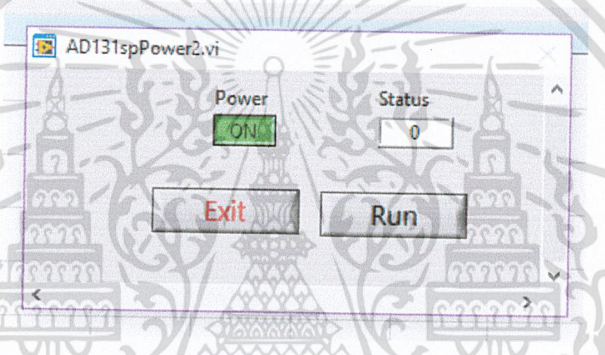
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ทำการเปลี่ยน LED ที่ OFF อยู่ให้เป็น ON จากนั้นกด Run และตรวจสอบว่า LED บน Detectorเป็นดังภาพหรือไม่



(ก)



(ข)

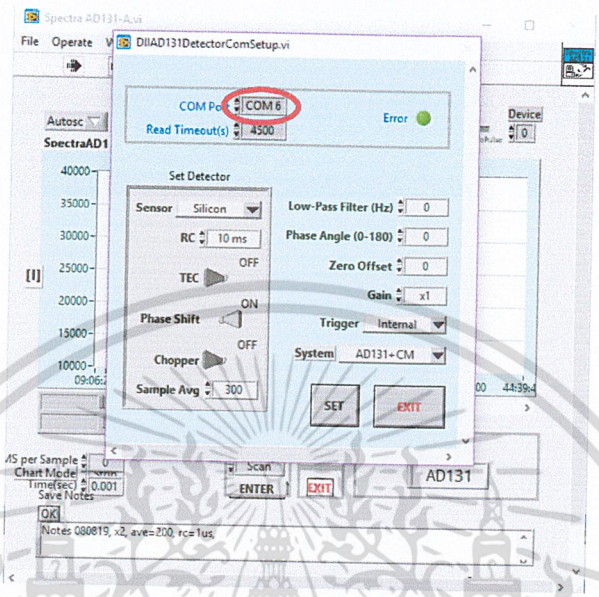


(ค)

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่3

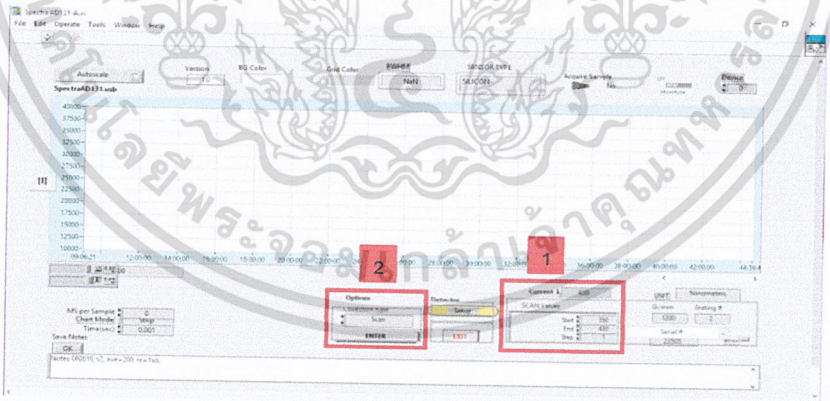
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ทำการเลือก COM Port ให้ตรงกับ COM Port ที่ Detector เชื่อมต่ออยู่ จากนั้นกด SET และ EXIT



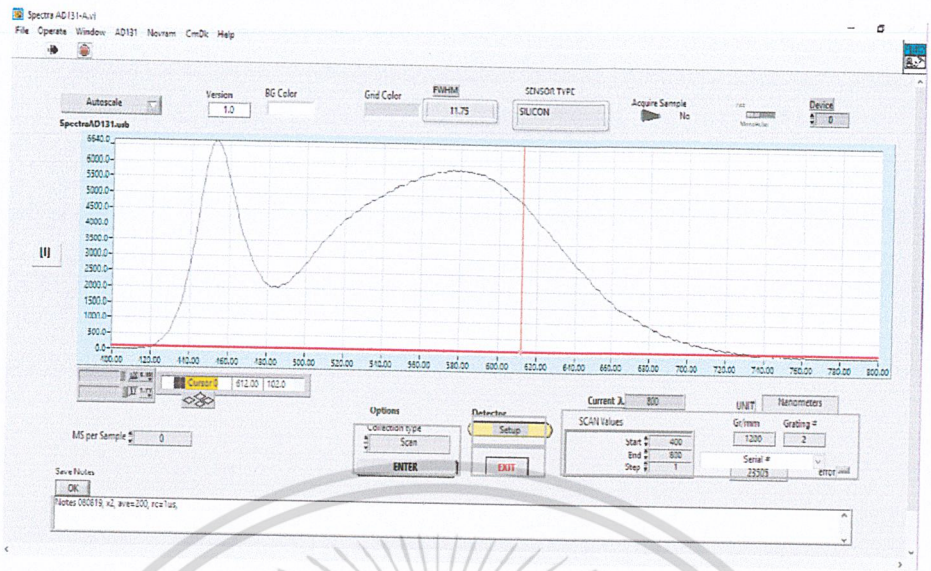
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่4

2.5 เลือกความยาวคลื่นที่ต้องการตรวจสอบเช่น400nmถึง800nm จากนั้นเลือก Scan และ Enter จะทำให้ Monochromator เริ่มทำการ Scan แสงตามความยาวคลื่นที่ได้กำหนดไว้



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการเปิดโปรแกรม AD131a ขั้นที่5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 กราฟแสดงการทำงานของ monochromator ทดสอบด้วยหลอดไฟ LED day light

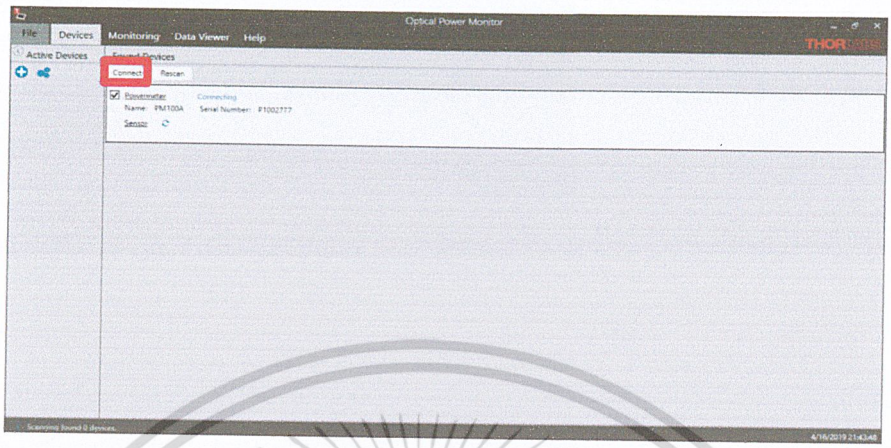
3) เมื่อทดสอบการทำงานของ monochromator เรียบร้อยแล้ว เปลี่ยน detector เป็น Power meter เพื่อทำการวัดค่าความเข้มแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-800 nm



รูปที่ 3.9 การวัดความเข้มของแสงโดยใช้ Power meter ในย่านความยาวคลื่น 400-800 nm

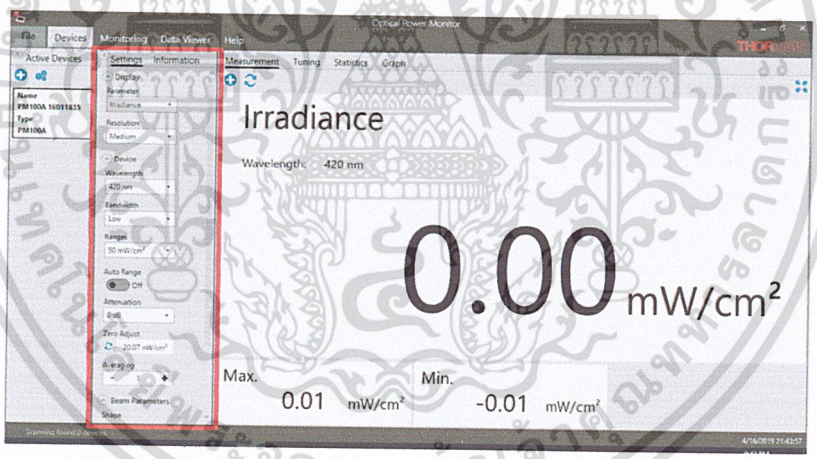
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.1 เปิดโปรแกรม Thorlabs optical power monitor และกด Connect



รูปที่ 3.10 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 1

3.2 เลือก Devices และเลือก Measurement จากนั้นตั้งค่าต่างๆในกรอบดังนี้

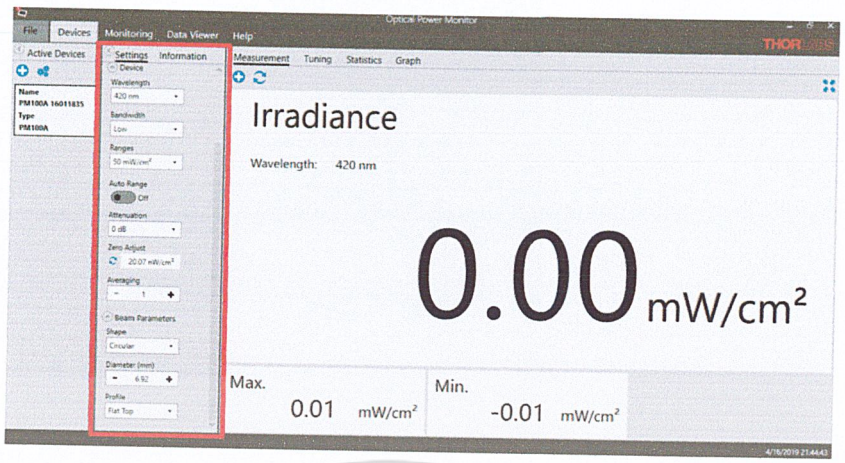


รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 2

Device

- Parameter เลือก Irradiance
- Resolution เลือก Medium’
- Bandwidth เลือก Low
- Range เลือกให้เหมาะสมตามเอาต์พุตที่ได้
- Auto Range เลือก off
- Attenuation เลือก 0 dB

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



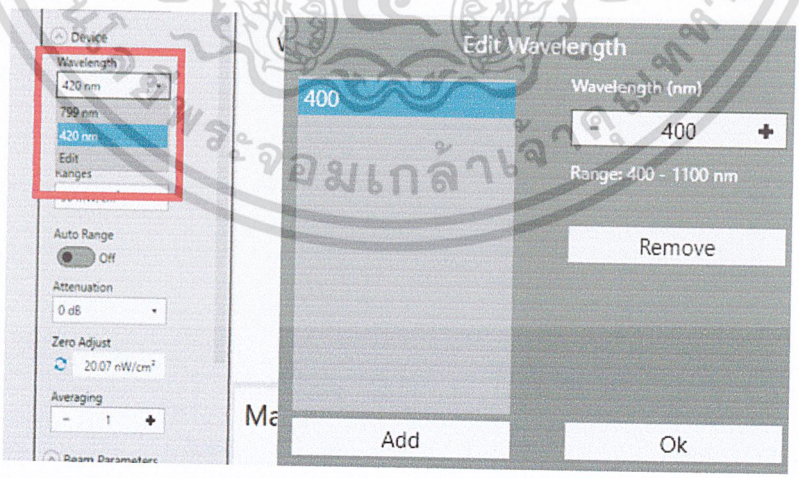
รูปที่ 3.12 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 3

- Averaging เลือก 1

Beam Parameters

- Shape เลือก Circular
- Diameter เลือก 6.92
- Profile เลือก Flat top

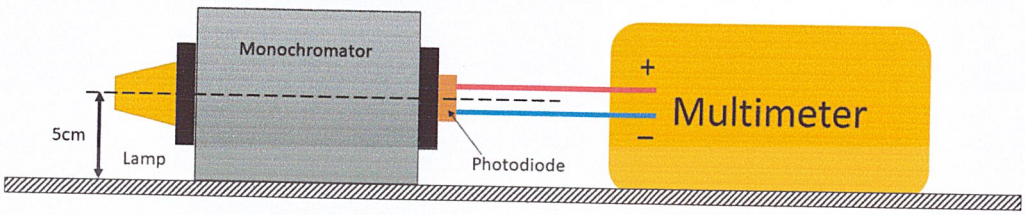
3.3 ทำการเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการวัด กด Edit ใส่ค่าความยาวคลื่นที่ต้องการและกด OK โดยในการวัดความยาวคลื่น จะต้องทำการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นให้ตรงกับความยาวคลื่นที่วัดทุกครั้ง



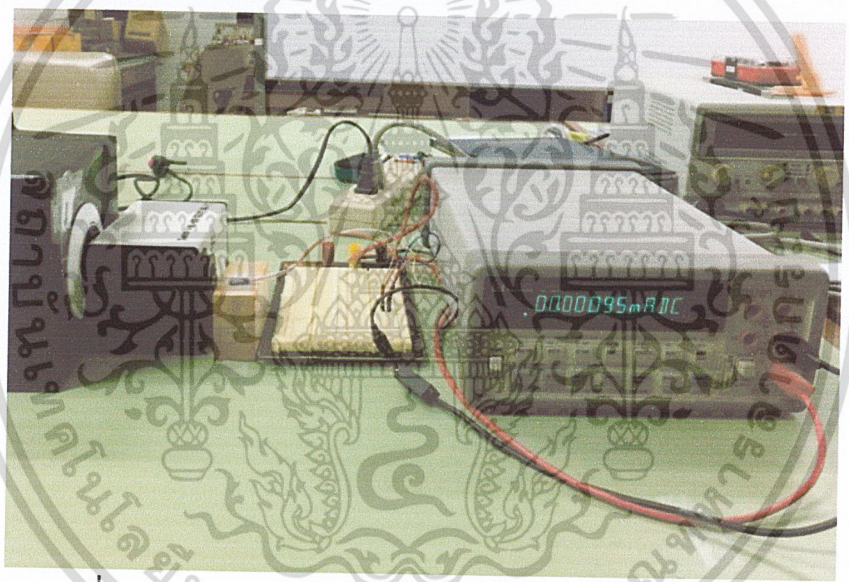
รูปที่ 3.13 ขั้นตอนการใช้โปรแกรม Thorlabs optical power monitor ขั้นที่ 4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) เมื่อทำการวัดความเข้มแสงในแต่ละย่านความยาวคลื่นโดยใช้ Power meter เรียบร้อยแล้ว ทำการเปลี่ยน Power meter เป็นโฟโตไดโอดและทำการเชื่อมต่อโฟโตไดโอดกับมัลติมิเตอร์ดังรูป เพื่อทำการวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงที่ได้รับจากโฟโตไดโอด



รูปที่ 3.14 แผนผังแสดงการเชื่อมต่อในระบบวัด Photocurrent โดยใช้ Photodiode

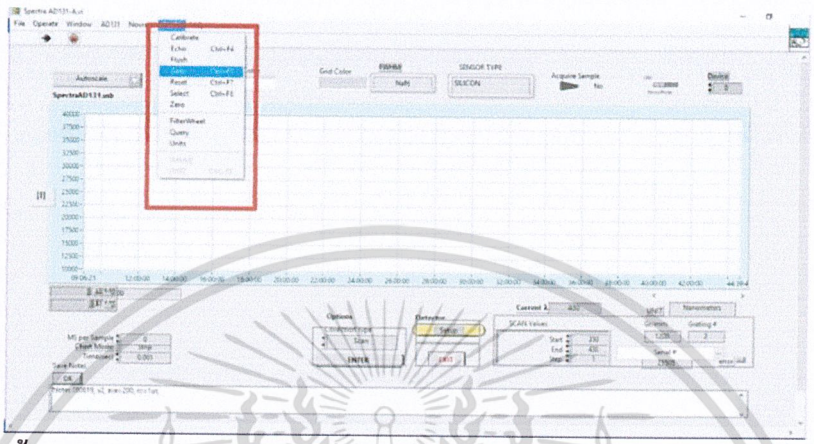


รูปที่ 3.15 การทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงโดยใช้มัลติมิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

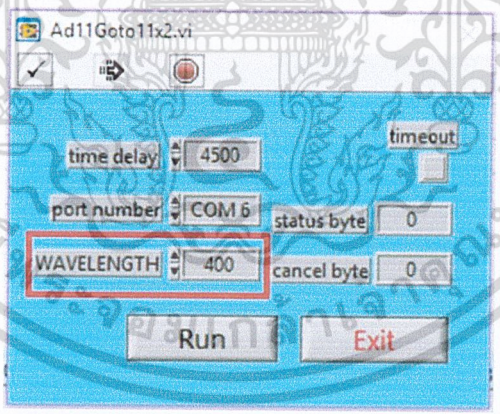
5) ทำการวัดกระแสไฟฟ้าที่ได้จากโฟโตไดโอดเมื่อทำการปรับค่าความยาวคลื่นแสงจาก400nmถึง 800nm โดยใช้โปรแกรมAD131aในการเลือกความยาวคลื่นที่ต้องการ

5.1 เลือกCmDk และ Goto



รูปที่ 3.16 ขั้นตอนการเลือกความยาวคลื่นตามที่ต้องการโดยใช้โปรแกรม AD131a ขั้นตอนที่1

5.2 เลือกความยาวคลื่นที่ต้องการและกด Run Monochromator จะทำการเปลี่ยนความยาวคลื่นไปยังความยาวคลื่นที่ต้องการ



รูปที่ 3.17 ขั้นตอนการเลือกความยาวคลื่นตามที่ต้องการโดยใช้โปรแกรม AD131a ขั้นตอนที่2

6) ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้จากมัลติมิเตอร์ในแต่ละความยาวคลื่น และทำการเปลี่ยนค่าความยาวคลื่นและบันทึกกระแสไฟฟ้าไปเรื่อยๆจนถึงความยาวคลื่นที่ต้องการคือ 400nm-800nm

7) จากนั้นสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าทางแสงกับความยาวคลื่น

8) ทำซ้ำข้อ3ถึง 5และทำการเปลี่ยนเป็นโฟโตไดโอดเป็นเบอร์ s1223 และ BPX65BX

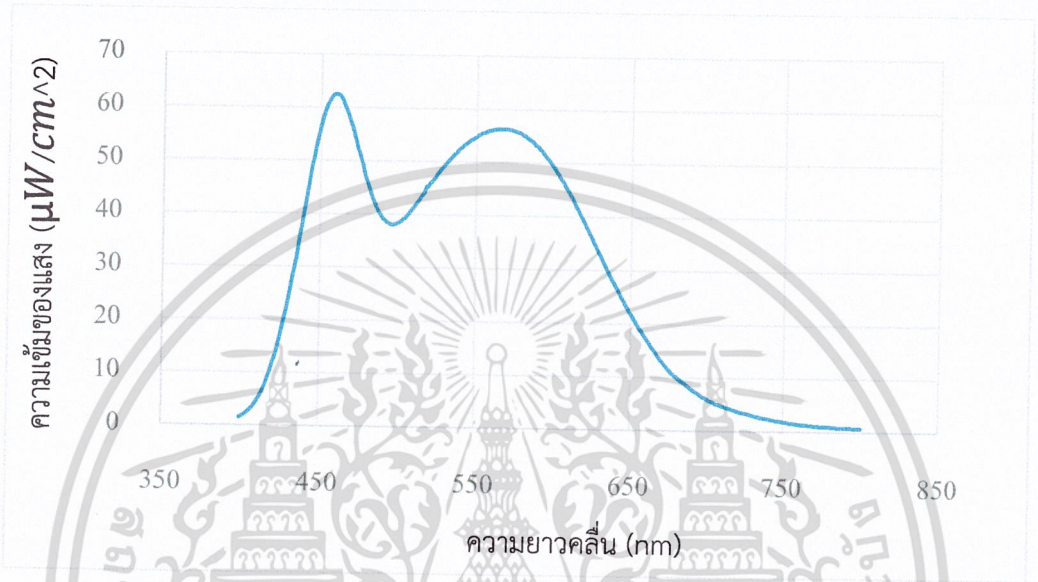
9) ทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพควอนตัม(IPCE) และวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่4

ผลการทดลอง

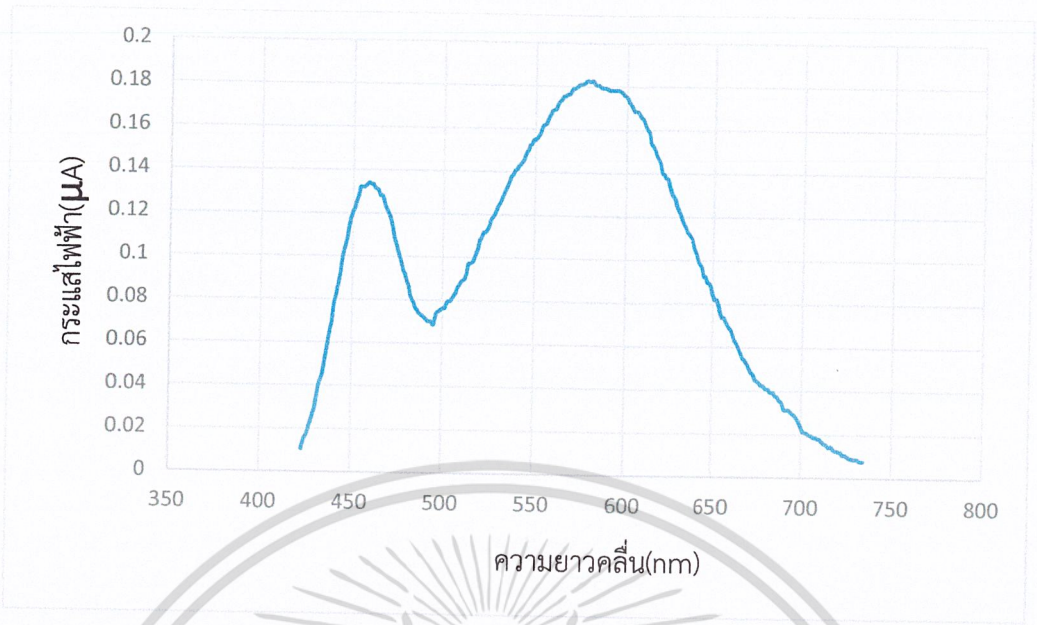
4.1 กราฟแสดงผลการทดลอง



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและความเข้มแสงที่ได้จาก Power Meter

จากรูปที่ 4.1 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความเข้มของแสง ($\mu W / \mathrm{cm}^2$) และความยาวคลื่น (nm) ที่ได้จากPower meterมีความเข้มแสงเป็นไปตามกราฟสเปกตรัมของหลอดไฟLED กับความยาวคลื่น

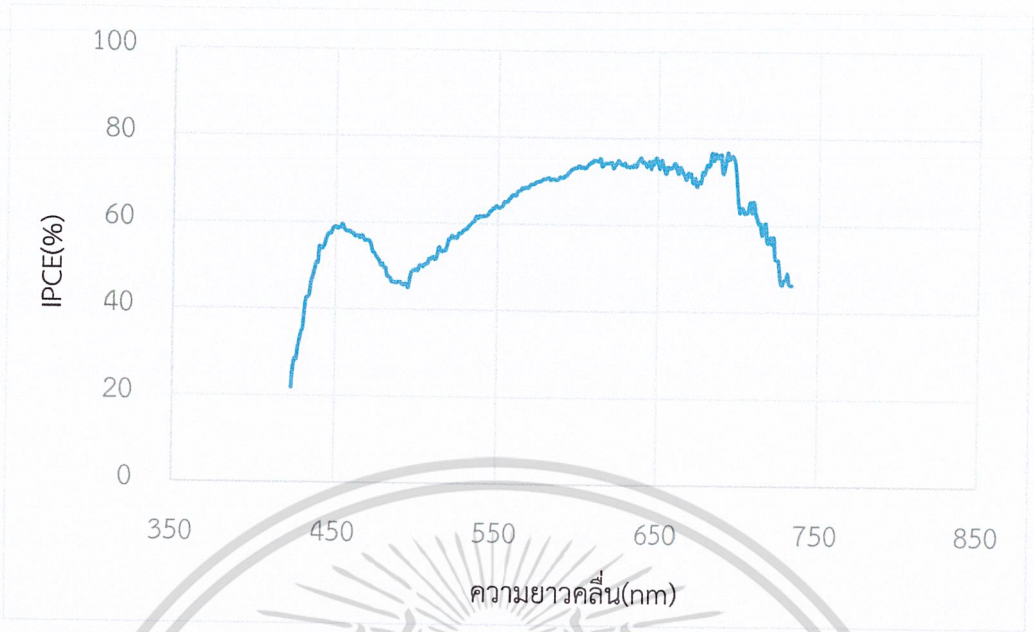
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอด BPX 65 BX

จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm) และกระแสไฟฟ้าทางแสง(μA) เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่ผิวหน้าของโฟโตไดโอดชนิดซิลิกอน เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิดซิลิกอนที่นำมาทำการทดลองมีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ PN แสงที่มาตกกระทบที่รอยต่อ PN จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าทางแสงขึ้น ค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงที่วัดได้จากมัลติมิเตอร์ในแต่ละช่วงความยาวคลื่นซึ่งพิจารณาได้ว่า โฟโตไดโอดสามารถตอบสนองได้ดีในช่วงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นในช่วง 570 – 590 nm คือสเปกตรัมในช่วงแสงสีเหลืองสามารถให้ค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงเท่ากับ 0.1808 μA เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากPower meterในช่วงที่มีความเข้มแสงมาก คือช่วงความยาวคลื่น 450 – 500 nm โฟโตไดโอดสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าทางแสงได้ 0.1026 μA ในทางทฤษฎีที่ความเข้มแสงมากควรผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูง แต่ในการทดลองผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่ำที่ความเข้มแสงมากเนื่องจากการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 450 - 500 nm ของโฟโตไดโอดชนิดนี้มีค่าน้อยจึงทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงที่น้อย

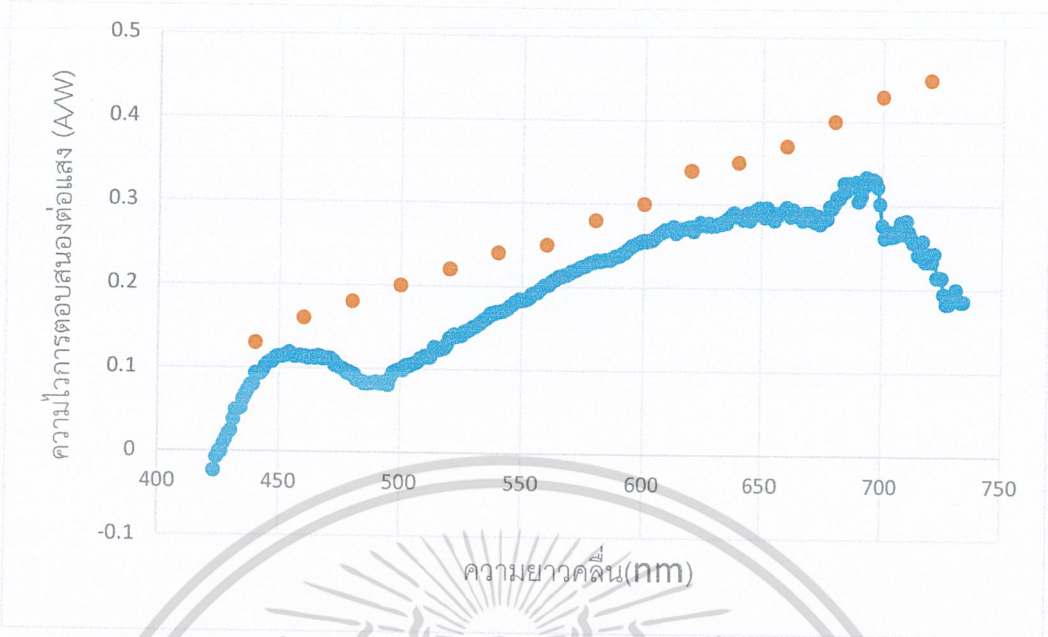
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (IPCE) ของโฟโตไดโอด BPX 65 BX

จากรูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก(IPCE) ของโฟโตไดโอด BPX 65 BX โดยทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกได้จากสมการ $IPCE = \frac{1240 \times J_{sc}(\mathrm{A/mm^2})}{\lambda(nm) \times I_{inc}(W/mm^2)}$ สามารถบอกประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับความไวต่อการตอบสนองของแสงของโฟโตไดโอด BPX 65 BX

จากการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4 ว่าการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอดเบอร์ BPX 65 BX สามารถตอบสนองได้ใกล้เคียงกับกราฟข้อมูลที่ได้จาก datasheet ในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร และ 500-650 นาโนเมตร ในช่วงที่กราฟมีแนวโน้มลดลงเพราะความเข้มแสงมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จาก data sheet พบว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดผ่านระบบโฟโตไดโอดยังไม่เป็นผลดีเท่าที่ควร

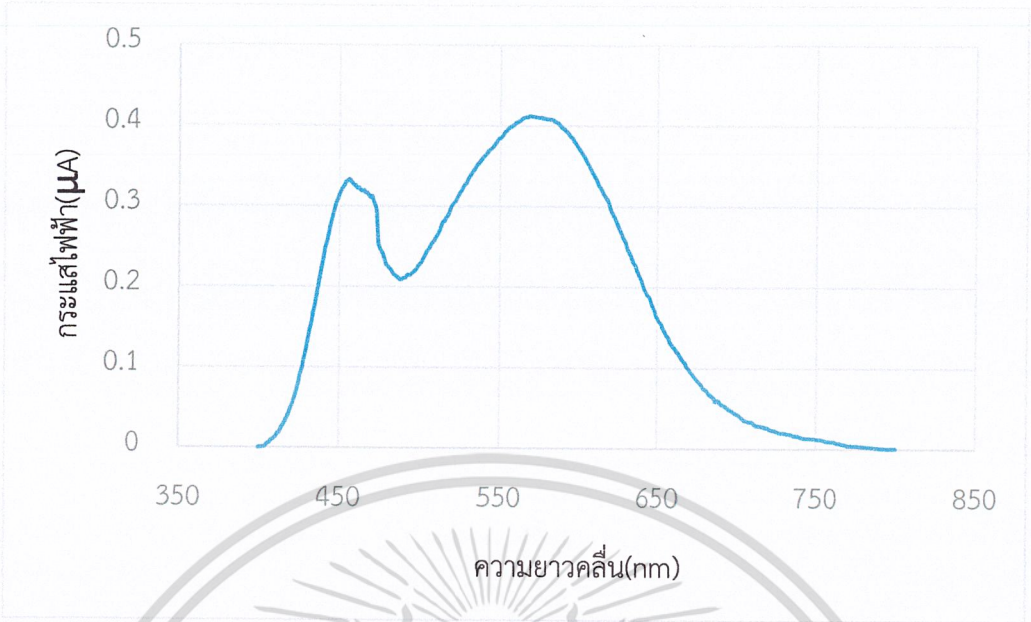
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่4.5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโตไดโอดBPX 65 BX

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโตไดโอด BPX65BX พบว่าพลังงานโฟตอนที่เกิดจากแสงตกกระทบลงบนผิวหน้าของโฟโตไดโอดทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลขึ้น จึงทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้นจากการดูดกลืนแสงผ่านสารกึ่งตัวนำของโฟโตไดโอด พลังงานโฟตอน 1.8-2.92 eV ที่ตกกระทบผิวหน้าของโฟโตไดโอดจะทำให้มีประสิทธิภาพควอนตัมที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า

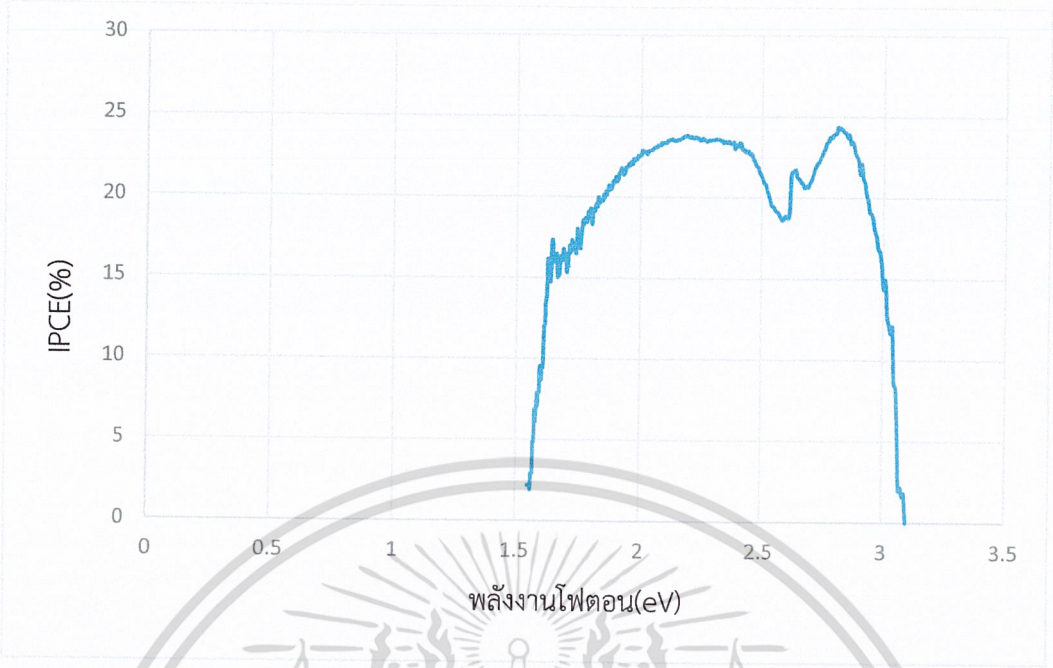
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและกระแสไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเบอร์ S1223

จากรูปที่ 4.6 เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่น(nm) และกระแสไฟฟ้าทางแสง(μA) เมื่อมีแสงมาตกกระทบที่รอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น ซึ่งสามารถพิจารณาได้ว่าโฟโตไดโอดสามารถตอบสนองได้ดีในช่วงสเปกตรัมที่มีความยาวคลื่นประมาณ 570-590 nm คือสเปกตรัมในช่วงแสงสีเขียวและได้กระแสไฟฟ้าทางแสง 0.4070 μA เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากPower meterในช่วงที่มีความเข้มแสงมากที่สุดคือ ในช่วงความยาวคลื่น 450-470 nm โฟโตไดโอดสามารถผลิตกระแสไฟฟ้าทางแสงได้ 0.3218 μA ในทางทฤษฎีที่ความเข้มแสงมากควรผลิตกระแสไฟฟ้าได้สูงแต่ที่โฟโตไดโอดนี้ผลิตกระแสไฟฟ้าได้ต่ำที่ความเข้มแสงมากเนื่องจากการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 450-470 nm ของโฟโตไดโอดชนิดนี้มีค่าน้อยจึงทำให้ได้ค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงที่น้อย

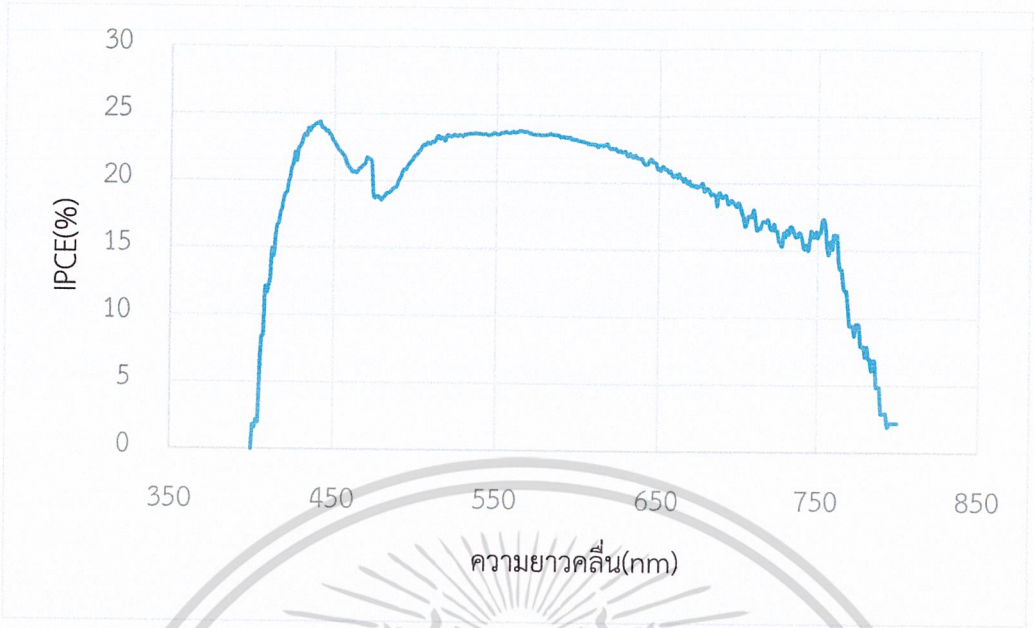
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโตไดโอดเบอร์ S1223

จากรูปที่ 4.7 แสดงให้เห็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานโฟตอนกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโตไดโอด S1223 พบว่าในช่วงที่มีพลังงานโฟตอน 1.8-3.1 eV จะมีประสิทธิภาพควอนตัมที่บ่งบอกถึงการเปลี่ยนพลังงานทางแสงเป็นพลังงานทางไฟฟ้า

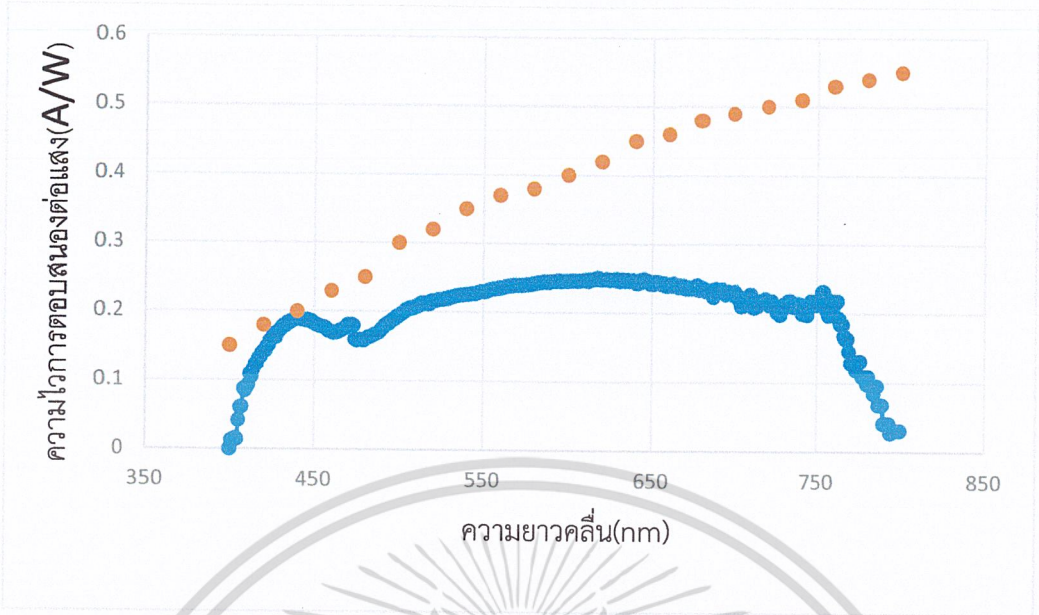
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกของโฟโตไดโอดเบอร์ S1223

จากรูปที่ 4.8 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นและ IPCE ของโฟโตไดโอดจากกราฟแสดงให้เห็นถึงค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกที่เกิดขึ้นในแต่ละช่วงความยาวคลื่น ซึ่งความยาวคลื่นในช่วง 570-590 นาโนเมตร เมื่อทำการคำนวณหาค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกได้จากสมการ $IPCE = \frac{1240 \times J_{sc}\ (\mathrm{A/mm^2})}{\lambda(nm) \times I_{inc}\ (W/mm^2)}$ สามารถบอกได้ว่าโฟโตไดโอดชนิดนี้มีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความยาวคลื่นกับการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอดเบอร์ S1223

จากการทดลองแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.9 ว่าการตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอดเบอร์ S1223 สามารถตอบสนองได้ในช่วงความยาวคลื่น 400-500 นาโนเมตร กับ 500-650 นาโนเมตร ซึ่งในช่วงที่กราฟมีแนวโน้มลดลงเพราะความเข้มแสงมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับกราฟที่ได้จากdata sheet แล้วพบว่าข้อมูลที่ได้จากการวัดผ่านระบบโฟโตไดโอดยังไม่เป็นผลดีเท่าที่ควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

จากการทดลองวัดค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงที่เกิดขึ้นจากพลังงานโฟตอนของแสงตกกระทบลงบนผิวหน้าของโฟโตไดโอดโดยโฟโตไดโอดชนิดซิลิกอนสองเบอร์คือ BPX 65 BX และ S1223 เพื่อดูความสามารถในการตอบสนองต่อแสงและประสิทธิภาพทางควอนตัม ในช่วงความยาวคลื่น 400-800 นาโนเมตร พบว่าสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าทางแสงได้ดีช่วงความยาวคลื่น 570-590 นาโนเมตรและเมื่อเปรียบเทียบการตอบสนองต่อแสงในช่วง 500-650 นาโนเมตร ซึ่งเป็นช่วงที่มีการตอบสนองต่อแสงได้ใกล้เคียงกับข้อมูลที่ได้จาก Datasheet ส่วนในการวัดค่าการตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่น 650-800 นาโนเมตร ของโฟโตไดโอดทั้งสองเบอร์มีค่าสเปกตรัมลดลงทำให้ค่าการตอบสนองต่อแสงที่ได้ไม่ใกล้เคียงกับข้อมูลจาก Datasheet เนื่องจากสเปกตรัมของแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ทดสอบมีค่าต่างกันกับDatasheet ดังนั้นระบบวัดกระแสไฟฟ้าทางแสงที่เราได้ออกแบบยังต้องมีการพัฒนาให้ดีมากยิ่งขึ้นเพื่อให้ได้ค่าการตอบสนองต่อแสงเป็นไปตามทฤษฎี

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ในการทดลองพบว่ามีปัญหาที่เกิดขึ้นคือ ในการวางตำแหน่งของเครื่องมือต่างๆ โมโนโครเมเตอร์นั้น หากมีการคลาดเคลื่อนอาจทำให้มีแสงสีขาวเล็ดลอดผ่านออกมาจากเครื่องมือโมโนโครเมเตอร์ได้ วิธีแก้ปัญหาคือให้ตรวจสอบตำแหน่งของแหล่งกำเนิดแสงและแสงที่ผ่านออกมาจากโมโนโครเมเตอร์ก่อนทุกครั้ง

2. ควรสร้างระบบโต๊ะ Isolate เพื่อป้องกันการสั่นของแสงและเพื่อยึดอุปกรณ์ต่างๆไม่ให้มีการเคลื่อนที่เพราะจะทำให้ค่าที่ได้ผิดพลาด

3. ในอนาคตต้องการพัฒนาระบบให้ตอบสนองได้ดีขึ้นควรเปลี่ยนแหล่งกำเนิดแสงเป็นหลอดทังสเตนที่มีความเสถียรของความเข้มแสงและมีความยาวคลื่นที่ครอบคลุม เพื่อให้แสงที่ออกมาจากโมโนโครเมเตอร์มีความเข้มแสงเพียงพอที่จะสามารถวัดการตอบสนองต่อแสงในช่วงนี้ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

ดุสิต เครืองาม. 2542. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กททรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งาน.** เล่มที่1. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดุสิต เครืองาม. 2542. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยีและการใช้งาน.** เล่มที่2. กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาสกร ดังสมัคร. 2562. **ระบบผลิตไฟฟ้าด้วยเซลล์แสงอาทิตย์.** [Online]. Available : http://www4.egat.co.th/re/solarcell/solarcell_pg5.htm.

Christiana Honsberg., Stuart Bowden. 2019. **Spectral Response.** [Online]. Available : https://www.pveducation.org.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

CENTRONIC

High Speed Detectors (BPX65)



The BPX65 family of detectors feature Centronic's 1mm² high speed, high sensitivity chip already successful in a wide variety of applications. The chip can be packaged in various forms suitable for fibre-optic communication, such as the AX65-RF (precisely centred, isolated, low chip to window spacing) a standard 2 or 3 lead TO18 or even epoxy encapsulated. It has also been used for encoder designs and with MIL SPEC release at the heart of advanced laser warning systems.

Electrical / Optical Specifications

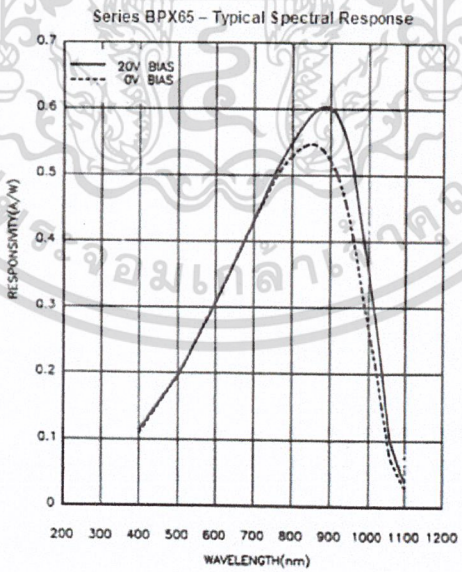
Characteristics measured at 22°C (±2) ambient, and a reverse bias of 12 volts, unless otherwise stated.

Single Elements

Type No.	Active Area		Responsivity A/W λ = 900 nm		Dark Current (nA)		NEP WHz ½ λ = 900 nm	Capacitance pF		Risetime ns λ = 820 nm	Package
	mm²	mm	Min.	Typ.	Max.	Typ.	Typ.	Vr=0 V Max.	Vr=20V Max.	RL = 50 Ω Typ.	
BPX65	1	1 x 1 mm	0.52	0.55	5	1	3.310e-14	20	3.5	3.5	1
BPX65T	1	1 x 1 mm	0.52	0.55	5	1	3.310e-14	20	3.5	13	1
AX65R2F	1	1 x 1 mm	0.52	0.55	5	1	3.310e-14	20	3.5	3.5	2A
BPX65RT	1	1 x 1 mm	0.52	0.55	5	1	3.310e-14	20	3.5	8	2
X65EB	1	1 x 1 mm	0.52	0.52	5	1	3.310e-14	20	3.5	3.5	1B

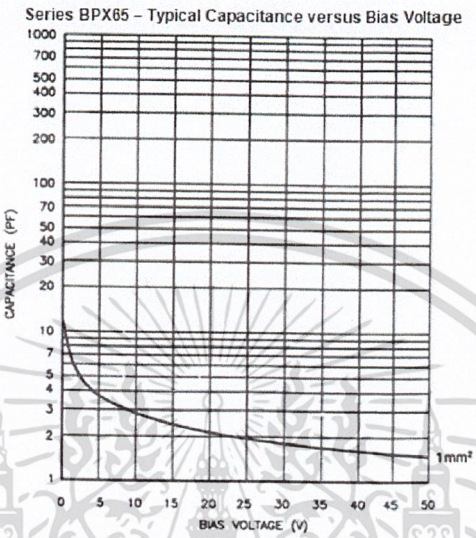
Highlighted items are Centronic standard products generally available from stock

Series BPX Spectral Response Graph



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Capacitance versus Bias Voltage



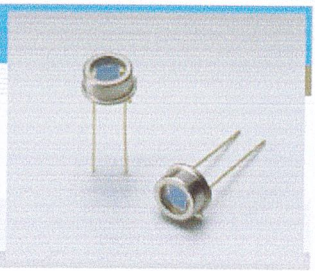
Due to our policy of continued development, specifications are subject to change without notice.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTODIODE

Si PIN photodiode
S1223 series

For visible to IR, precision photometry



Features

- High sensitivity
- High reliability
- High-speed response
  S1223: fc=30 MHz
  S1223-01: fc=20 MHz
- Low capacitance

Applications

- Optical measurement equipment
- Analytical equipment, etc.

■ General ratings

Parameter	Symbol	S1223	S1223-01	Unit
Window material	-	borosilicate glass		-
Package	-	TO-5		-
Active area size	A	2.4 × 2.8	3.6 × 3.6	mm
Effective active area	-	6.6	13	mm^2

■ Absolute maximum ratings

Parameter	Symbol	S1223	S1223-01	Unit
Reverse voltage	V_R Max.	30		V
Power dissipation	P	100		mW
Operating temperature	Topr	-40 to +100		°C
Storage temperature	Tstg	-55 to +125		°C

■ Electrical and optical characteristics (Ta=25 °C)

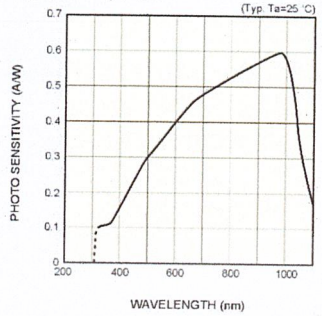
Parameter	Symbol	Condition	S1223 Min.	S1223 Typ.	S1223 Max.	S1223-01 Min.	S1223-01 Typ.	S1223-01 Max.	Unit
Spectral response range	λ		-	320 to 1100	-	-	320 to 1100	-	nm
Peak sensitivity wavelength	λp		-	960	-	-	960	-	nm
Photo sensitivity	S	λ=λp	-	0.6	-	-	0.6	-	A/W
		λ=660 nm	-	0.45	-	-	0.45	-	
		λ=780 nm	-	0.52	-	-	0.52	-	
		λ=830 nm	-	0.54	-	-	0.54	-	
Short circuit current	Isc	100 lx	5	6.3	-	10	13	-	μA
Dark current	ID	V_R=20 V	-	0.1	10	-	0.2	10	nA
Temp. coefficient of ID	TCID		-	1.15	-	-	1.15	-	times/°C
Cut-off frequency	fc	V_R=20 V, -3 dB	-	30	-	-	20	-	MHz
Terminal capacitance	Ct	V_R=20 V, f=1 MHz	-	10	-	-	20	-	pF
Noise equivalent power	NEP	V_R=20 V, λ=λp	-	9.4×10^{-15}	-	-	1.3×10^{-14}	-	$W/Hz^{1/2}$

SOLID STATE DIVISION

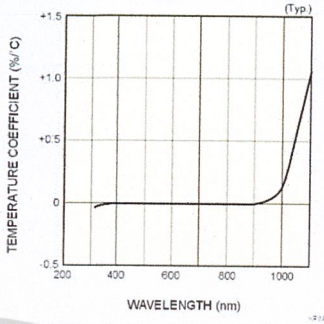
HAMAMATSU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

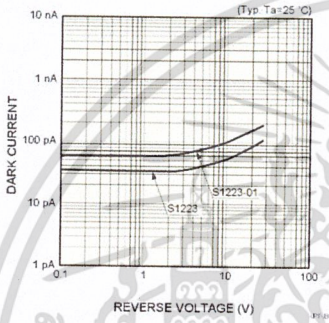
■ Spectral response



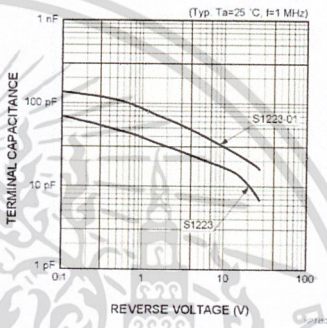
■ Photo sensitivity temperature characteristic



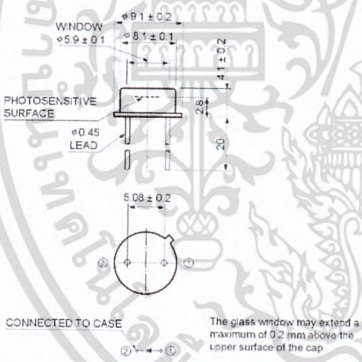
■ Dark current vs. reverse voltage



■ Terminal capacitance vs. reverse voltage



■ Dimensional outline (unit: mm)



HAMAMATSU
Information furnished by HAMAMATSU is believed to be reliable. However, no responsibility is assumed for possible inaccuracies or omissions.
Specifications are subject to change without notice. No patent rights are granted to any of the circuits described herein. ©2006 Hamamatsu Photonics K.K.

HAMAMATSU PHOTONICS K.K., Solid State Division
1126-1 Ichino-cho, Hamamatsu City, 435-8558 Japan, Telephone: (81) 53-434-3311, Fax: (81) 53-434-5184, www.hamamatsu.com
U.S.A.: Hamamatsu Corporation: 360 Foothill Road, P.O.Box 6910, Bridgewater, N.J. 08807-0910, U.S.A., Telephone: (1) 908-231-0960, Fax: (1) 908-231-1218
Germany: Hamamatsu Photonics Deutschland GmbH: Arzbergerstr. 10, D-82211 Herrsching am Ammersee, Germany, Telephone: (49) 08152-3750, Fax: (49) 08152-2658
France: Hamamatsu Photonics France S.A.R.L.: 19, Rue du Saule Trapu, Parc du Moulin de Massy, 91882 Massy Cedex, France, Telephone: 33-(1) 69 53 71 00, Fax: 33-(1) 69 53 71 10
United Kingdom: Hamamatsu Photonics UK Limited: 2 Howard Court, 10 Tewin Road, Welwyn Garden City, Hertfordshire, AL7 1BW, United Kingdom, Telephone: (44) 1707-294888, Fax: (44) 1707-325777
North Europe: Hamamatsu Photonics Norden AB: Smidesvagen 12, SE-171 41 Solna, Sweden, Telephone: (46) 8-509-031-00, Fax: (46) 8-509-031-01
Italy: Hamamatsu Photonics Italia S.R.L.: Strada della Moia, 1/E, 20020 Arese, (Milano), Italy, Telephone: (39) 02-935-81-733, Fax: (39) 02-935-81-741

Cat. No. KPIN1050E01
Aug. 2006 DN

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้