

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การสร้างซิลิกอนไดโอดชนิด PIN เพื่อใช้ในการตรวจจับรังสี
อินฟราเรด

Fabrication of a silicon PIN Diode for use in Infrared Detector



นาย สรรพวิช สุวณะศรี
นาย สุกฤษณ์ วุฒิชชาติวานิช

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเดชะ

๒๔๖

๘๓๓๕ ๗

๒๕๕๐

เลขที่.....

เลขทะเบียน.....**82996**

วัน,เดือน,ปี.....**30 ก.ค. 2551**

b. 119๕๗๘1๕
i.

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา

วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างซิลิกอนไดโอดชนิด PIN เพื่อใช้ในการตรวจจับรังสี
อินฟราเรด

Fabrication of a silicon PIN Diode for use in Infrared Detector



ปริญญาานิพนธ์สำหรับวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2550

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

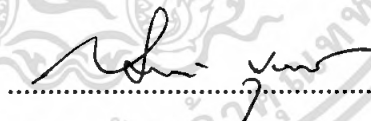
เรื่อง การสร้างซิลิกอนไดโอดชนิด PIN เพื่อใช้ในการตรวจจับรังสีอินฟราเรด

(Fabrication of a silicon PIN Diode for use in Infrared Detector)

ผู้จัดทำ

นาย สรรพวิช สุวัฒน์ศรี รหัส 47010812 4C

นาย สุกฤษฎ์ วุฒิชชาติวานิช รหัส 47010845 4C



(อาจารย์ที่ปรึกษา)

(รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเดช)

วันที่...../...../.....

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณรองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ สุภเดช ที่ช่วยดูแลเอาใจใส่ คอยให้คำแนะนำชี้แจงข้อบกพร่องต่างๆ และเป็นที่ปรึกษาการทำโครงการตลอดจนช่วยเหลือควบคุมกระบวนการในการวัดคุณสมบัติของมอสรานซิสเตอร์ได้อย่างประสบความสำเร็จ ขอขอบคุณพี่ๆ ที่ศูนย์วิจัย ในการช่วยเหลือให้ข้อมูลต่างๆ และขอขอบคุณเพื่อนๆ ที่ช่วยเหลือตลอดมา จึงทำให้สามารถจัดทำรายงานนี้ขึ้นได้อย่างสมบูรณ์



.....
(นาย สรรพวิช สุวัฒน์ศรี)

.....
(นาย สุกฤษฎ์ วุฒิชชาติวานิช)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างซิลิกอนไดโอดชนิด PIN เพื่อใช้ในการตรวจจับสนิ่งอินฟราเรด

นาย สรรพวิช สุวัฒน์ศรี รหัส 47010812
นาย สุกฤษฎ์ วุฒิชชาติวานิช รหัส 47010845
รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

ความต้องการของมนุษย์ที่มีอย่างไม่หยุดยั้ง ไม่ว่าจะเป็นเหตุผลทางด้านการแข่งขันทางการตลาด หรือเหตุผลในการพัฒนาเพื่อการศึกษาและวิจัย จึงได้พัฒนาโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ขึ้นเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการทำงานที่สูงขึ้นและมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลง ข้อได้เปรียบของอุปกรณ์ชนิดนี้คือ มีความเร็วในการทำงานสูง

ในรายงานนี้เราจะนำเสนอกระบวนการสร้างซิลิกอนไดโอดชนิด PIN แบบ Vertical ชนิดต่างๆ เพื่อใช้ในการตรวจจับสนิ่งอินฟราเรด เช่น แบบฟอร์สจะมีคุณสมบัติลดการสะท้อนแสงและยังดูดกลืนโฟตอนได้ดี แบบสตริปนั้นจะให้กระแสที่สูง และแบบธรรมดา รวมทั้งอุปกรณ์ชนิดอื่น เช่น โฟโตไดโอดที่ทำจาก GaAs เป็นต้น ซึ่งจะทำให้ได้อุปกรณ์ตรวจจับสนิ่งอินฟราเรดที่ดีที่สุด และยังใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ทางแสงชนิดต่างๆต่อไป ในการศึกษา, ฝึกทักษะการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับกระบวนการสร้าง และการวัดคุณสมบัติต่างๆ ของตัวอุปกรณ์ ซึ่งจะนำความรู้เหล่านี้ไปใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้

Fabrication of a silicon PIN Diode for use in Infrared Detector

Mr. Sunpawish Suwannasri ID 47010812

Mr. Sukrit Vutthishatvanich ID 47010845

Assoc.Prof.Dr.Somkiat Supadech Advisor

Education 2007

Abstract

Because of an unlimited desire of human in marketable competition or develop to research. Hence p-i-n photodiode is developed for better efficiency but less cost. This device's advantage is high speed in operation.

This report represents fabrication of several vertical p-i-n silicon diode to detect infrared ray for example porous silicon films is able to reduce surface reflectance and absorb photon excellent, guard ring can reduce leakage current on surface between Si and SiO₂, stripe provide high current, ordinary type and the others such as GaAs photodiode, etc .So can gain the best infrared detector and the way to develop other optical devices continuously. In learning, practicable using tools and devices for fabrication and measure properties of devices .This knowledge can be used to develop semiconductor devices.

สารบัญ

	หน้า
บทที่1 บทนำ	
1.1ความเป็นมาของการทำโครงการ	1
1.2วัตถุประสงค์ของโครงการ	1
1.3ขั้นตอนของการศึกษา	2
บทที่2 ทฤษฎีของอินฟราเรด	
2.1 ความรู้เบื้องต้นของอินฟราเรด	3
2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของอินฟราเรด	3
2.1.2คุณสมบัติของอินฟราเรด	3
2.2 การค้นพบรังสีอินฟราเรด	4
2.3หลักการการทำงานของตัวรับ-ตัวส่งโดยใช้อินฟราเรด	6
บทที่3 Photodetector	
3.1 บทนำเกี่ยวกับ Photo detector	8
3.2 หลักการพื้นฐาน	8
3.3 คุณสมบัติสำคัญของโฟโตดีเทกเตอร์	8
3.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม	8
3.3.2 สภาพการตอบสนอง	9
3.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง	10
3.3.4 แบนด์วิดท์	10
3.3.5 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัม	11
3.4 ชนิดของโฟโตดีเทกเตอร์	12
3.4.1 Photo diode	12
3.4.1.1 พี-เอ็นโฟโตไดโอด	19
3.4.1.2 อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด	20

สารบัญ

หน้า

3.4.1.3	ซีดทีย์โฟโตไดโอด	22
3.4.1.4	พินโฟโตไดโอด	23
3.4.2	โฟโตคอนดักเตอร์	24
3.4.4	Photo Transistor	24
3.4.3	Photo resistor หรือ Light Dependent Resistor (LDR)	25
บทที่4 การออกแบบและกระบวนการสร้าง		
4.1	เทคโนโลยีการสร้าง	27
4.1.1	กระบวนการออกซีเดชัน	28
	การออกซีเดชันแบบแห้ง	29
	การออกซีเดชันแบบชื้น	29
4.1.2	กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี	
4.1.3	กระบวนการแพร์อะตอมสารเจือ	33
4.1.4	กระบวนการเมทัลไลเซชัน	36
4.1.5	กระบวนการซินเตอร์ริง	38
4.2	ขั้นตอนกระบวนการสร้าง	38
4.2.1	กระบวนการสร้างซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิดPIN แบบแนวตั้งหลายแถบ	38
4.2.1.1	กระบวนการแพร์สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น	38
4.2.1.2	กระบวนการแพร์สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นพีที่เข้มข้น	44
4.2.1.3	กระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส	48
4.2.1.4	กระบวนการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมและขั้วสัมผัสแบบ โอห์มมิก50	
บทที่5 การทดลองและผลการทดลอง		
5.1	การทดลอง	55
5.1.1	อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	56
5.2	การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
5.2.1 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์ปรับค่า โดยปรับค่าIR	58
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์ ปรับค่าโดยปรับค่าIR	59
5.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์ โดยปรับค่าความสว่าง	60
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์ปรับค่า โดยปรับค่าความสว่าง	61
5.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ของแต่ละสตริป62	
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์	63
5.5 การวัดสภาพตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด	64
ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตอบสนองกับค่าความยาวคลื่น	64
บทที่6 สรุปผลการทดลอง	66
บทที่7 การนำไปใช้งาน	67
7.1 การมองเห็นกลางคืน	67
7.2 เทอร์โมกราฟี	67
7.3 ภาพถ่ายแบบอื่นๆ	68
7.4 ความร้อน	68
7.5 การสื่อสาร	69
7.6 การวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัม	69
7.7 อุตุนิยมวิทยา	70
7.8 สภาพภูมิอากาศ	70
7.9 ดาราศาสตร์	71
7.10 ประวัติศาสตร์ของศิลปะและ โบราณคดี	72
7.11 ระบบชีววิทยา	72
7.12 เกี่ยวกับโลกและอินฟราเรด	73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูปภาพ

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงถึงแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	3
รูปที่ 2.2 แสดงถึงย่านของอินฟราเรด	4
รูปที่ 2.3 การทดลองของ Sir William Herschel	5
รูปที่ 2.4 แบบจำลองของกล้องทดลอง	5
รูปที่ 2.5 ปริซึมคั้งเดิมของ Sir William Herschel	6
รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ	11
รูปที่ 3.2 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอน โฟโตไดโอด	12
รูปที่ 3.3 วงจร โฟโต ไดโอด เบื้องต้น	13
รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลเมื่อทำการจ่าย Forward bias	13
รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลเมื่อทำการจ่าย Reversed bias	14
รูปที่ 3.6 ภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนส์ไปยังชั้นคอนดักชัน	14
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่ากระแส และแรงดันของโฟโตไดโอด	15
รูปที่ 3.8 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลช่วงต้นของการชนกันของสาร P-N	15
รูปที่ 3.9 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพี แล้วทิ้งให้เกิดโฮลเอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N	16
รูปที่ 3.10 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพี ที่มากขึ้น แล้วทิ้งให้เกิดโฮลเอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N	16
รูปที่ 3.11 แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพีข้ามไปยังด้านเอ็น แล้วทิ้งให้เกิดอิเล็กตรอน เอาไว้ที่จุดเดิมที่โฮลเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N	16
รูปที่ 3.12 แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ข้ามฝั่งไปมา จนเกิดบริเวณปลอดพาหะที่สมบูรณ์	17
รูปที่ 3.13 แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นที่รับแสงเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอด พาหะ	17
รูปที่ 3.14 แสดงบริเวณพื้นที่รับแสงเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอดพาหะ	17
รูปที่ 3.15 คิพลีชัน โซน	18
รูปที่ 3.16 โครงสร้างและแถบพลังงานของพี-เอ็น โฟโตไดโอด	19
รูปที่ 3.17 ลักษณะสนามไฟฟ้าของอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (APD)	21
รูปที่ 3.18 ช่วงอะวาแลนซ์(Avalanche region)ของอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (APD)	21

สารบัญรูปภาพ

	หน้า
รูปที่ 3.19 โครงสร้างของซีดคิกซ์ไฟโตไดโอด	22
รูปที่ 3.20 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินไฟโตไดโอด	23
รูปที่ 3.21 โครงสร้างและแถบพลังงานของไฟโตคอนดักเตอร์	24
รูปที่ 3.22 แสดง Light Dependent Resistor (LDR)	25
รูปที่ 3.23 แสดงหลักการทำงานของ Light Dependent Resistor (LDR)	25
รูปที่ 3.24 แสดงการทำงานของ Photo transistor	26
รูปที่ 4.1 แผนภูมิกระบวนการสร้างซิลิกอนไฟโตไดโอดชนิดPINแบบแนวตั้ง	27
รูปที่ 4.2 กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน	28
รูปที่ 4.3 ภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน	28
รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชัน ในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆด้วยกระบวนการแบบแห้ง	29
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชัน ในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆด้วยกระบวนการแบบชื้น	30
รูปที่ 4.6 ขั้นตอนขบวนการโฟโตลิโธกราฟี	31
รูปที่ 4.7 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิกอน	34
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ	34
รูปที่ 4.9 ความหนาของชั้น SiO ₂ ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส	35
รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator	37
รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายซิลิกอนไฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่ สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ก) บนแผ่นผลึก (ข) ผิวหน้าอุปกรณ์ขยาย 50 เท่า	54
รูปที่ 5.1 วงจรภาคส่ง	55
รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณจากวงจรภาคส่ง	56
รูปที่ 5.3 วงจรภาครับ	56
รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแสมีด กับค่า stripe-spacing ของแต่ละสตริป	57
รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับ	

สารบัญ

	หน้า
รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับค่า stripe-spacing ของแต่ละสตริปโดยใช้ IR เปรียบเทียบ	59
รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับค่าความต่างศักย์ ของทุกสตริป ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง	61
รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับค่า stripe-spacing ของแต่ละสตริปที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง	61
รูปที่ 5.9 เครื่อง R-L-C meter	62
รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ ของแต่ละสตริป	63
รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับค่า Stripe-spacing ของแต่ละสตริปที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง	63
รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความตอบสนองกับค่าความยาวคลื่น	64
รูปที่ 7.1 ภาพเทอร์โมกราฟิของหมา	67
รูปที่ 7.2 แสงอินฟราเรดจาก LED ของ XBox 360 remote control	68
รูปที่ 7.3 แสดงการใช้รีโมทอินฟราเรดควบคุมโทรทัศน์	69
รูปที่ 7.4 ภาพถ่ายอินฟราเรดจากดาวเทียมเกิดขึ้นในวันที่ 15 ตุลาคม 2006 โดยด้านหน้าของรูปจะเห็นคาบสมุทรเม็กซิโกเต็มไปด้วยเมฆ	70
รูปที่ 7.5 ตัวอย่างของไฟโรมิเตอร์	71
รูปที่ 7.6 กล้อง Spitzer Space นี้เป็นอุปกรณ์ดูดาวและดวงอาทิตย์	71
รูปที่ 7.7 รูปวาดที่แสดงการระบายสีเพื่อปิดบังชั้นระดับ	72
รูปที่ 7.8 ภาพอุณหภูมิของงูที่กินหนู	72
รูปที่ 7.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ของโลกกับอินฟราเรด	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาของการทำโครงการ

ในปัจจุบันนี้ได้มีการนำเอาอินฟราเรดมาใช้งานกันอย่างแพร่หลาย โดยทั่วไปนั้นก็จะเป็นหนักไปที่การสื่อสารแบบไร้สาย เช่น โทรศัพท์มือถือ, คอมพิวเตอร์ และ PDA ซึ่งคนทั่วไปนั้นก็อาจจะไม่คิดว่าประโยชน์ของอินฟราเรดนั้นยังมีอีกมากมาย เช่น ในด้านการทหาร, ดาราศาสตร์, ระบบชีววิทยา, ประวัติศาสตร์และโบราณคดี และพยากรณ์อากาศ

ส่วนของแสงอินฟราเรดซึ่งเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความถี่สูงมาก และมีความเร็วของการคลื่นที่อยู่ในอากาศประมาณ 299,792,458 เมตรต่อวินาที เนื่องจากแสงอินฟราเรดเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่สูงมากจนวงจรอิเล็กทรอนิกส์ไม่สามารถจะทำงานได้ในย่านความถี่นี้ เพราะอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์จะทำงานได้ในย่านความถี่สูงสุดเพียงไม่กี่ 10GHz เท่านั้น ดังนั้นในการรับส่งสัญญาณแสงด้วยวงจรอิเล็กทรอนิกส์จึงไม่สามารถกระทำได้โดยตรง ฉะนั้นจึงได้มีการนำเอาวิธีการบางอย่างเข้ามาเพื่อเปลี่ยนแปลงปริมาณและคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสัญญาณที่ได้จากแสงอินฟราเรดให้เป็นสัญญาณด้านไฟฟ้า

โดยที่โครงการนี้จะเน้นการศึกษาไปที่ตัวตรวจจรับรังสีอินฟราเรดซึ่งก็คือโฟโตไดโอดแบบต่างๆกัน เช่น แบบมีพอร์ส, การ์ดริง และสตริบ โดยจะทำการทดลองเปรียบเทียบการตรวจจรับรังสีอินฟราเรด ซึ่งจะใช้พารามิเตอร์ เช่น โวลต์, ความถี่ และระยะทาง เพื่อพิสูจน์ว่าโฟโตไดโอดแบบใดจะให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยสิ่งนี้จะเป็แนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์ตรวจจรับรังสีอินฟราเรด ซึ่งก็จะสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆได้

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

ในโครงการชิ้นนี้ต้องการศึกษาถึงประโยชน์ของ IR โดยทำการเปลี่ยนตัว Receiver ชนิดต่างๆ เพื่อวัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆกันออกไป เช่น ระยะทาง ความต่างศักย์ เพื่อศึกษาว่าตัว receiver ชนิดใดนั้นให้ผลตอบแทนได้ดีที่สุด นั่นคือรวมไปถึงการพิจารณาว่าคุ้มหรือไม่ถึงประโยชน์ในการสร้าง ราคา คุณภาพที่ได้รับและควรมีการพัฒนาต่อไปหรือไม่ และเป็นการนำไปสู่ การนำตัว Receiver ที่มีคุณสมบัติที่ดีที่สุดไปสู่การนำไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆที่เราต้องการ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อไปในอนาคต

1.3 ขั้นตอนของการศึกษา

ปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น บทด้วยกันคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่1 ความเป็นมาของการทำโครงการ วัตถุประสงค์ของโครงการ และขั้นตอนการศึกษา

บทที่2 ทฤษฎีของอินฟราเรด

บทที่3 ทฤษฎีของโฟโตรีโตรีเตอร์

บทที่4 กล่าวถึงการออกแบบและสร้างโฟโตรีโตรีเตอร์แบบต่างๆ

บทที่5 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง

บทที่6 การนำไปใช้งาน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 ทฤษฎีของอินฟราเรด

2.1 ความรู้เบื้องต้นของอินฟราเรด

Infrared คือคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความถี่อยู่ในช่วง $3 \times 10^{11} \text{ Hz} - 4 \times 10^{14} \text{ Hz}$ หรือความยาวคลื่น $10^{-3} \text{ m} - 7.6 \times 10^{-7} \text{ m}$ เรียกว่า รังสีอินฟราเรด หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า คลื่นความถี่สั้น (Millimeter waves) ซึ่งจะมีย่านความถี่คาบเกี่ยวกับย่านความถี่ของคลื่นไมโครเวฟอยู่บ้าง วัตถุร้อนจะแผ่รังสีอินฟราเรดที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 10^{-3} m ออกมา ประชาชนสัมผัสทางผิวหนังของมนุษย์สามารถรับรังสีอินฟราเรด

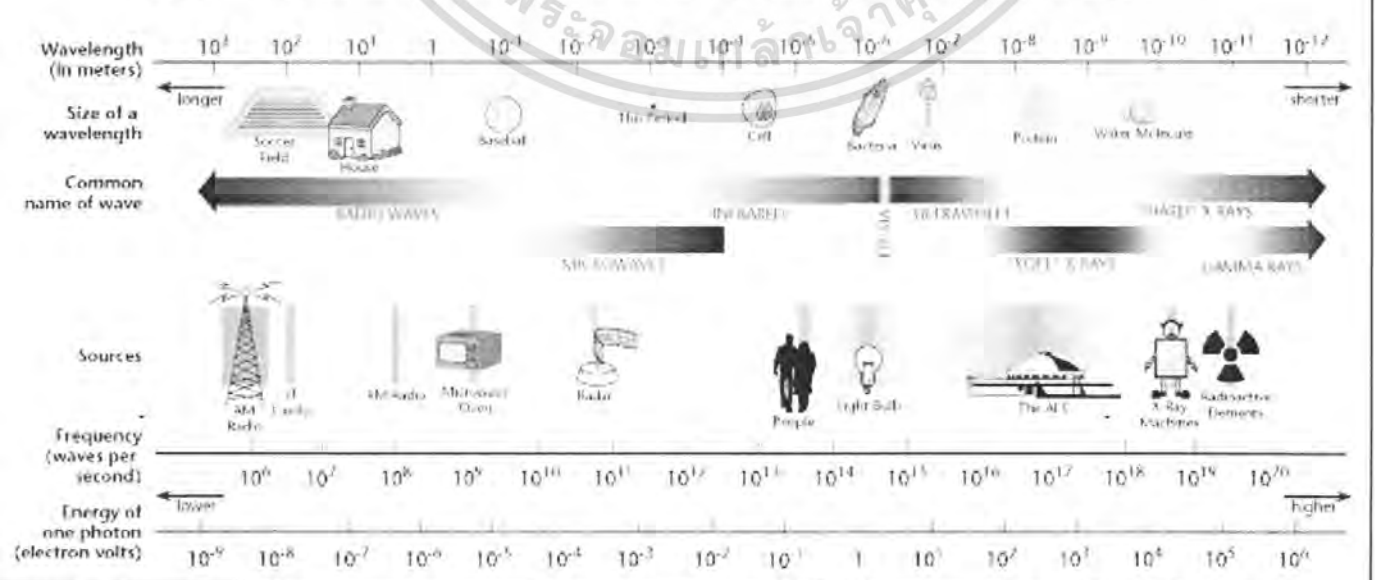
2.1.1 ข้อดีและข้อเสียของอินฟราเรด

- คลื่นสั้น ทางเดินของแสงเป็นแนวตรง
- ราคาถูก
- ง่ายต่อการผลิต
- ปลอดภัยต่อการดักสัญญาณ
- ไม่สามารถทะลุผ่านวัตถุ ทำให้สามารถติดตั้ง Infrared ในห้องทำงานติดกันได้

2.1.2 คุณสมบัติของอินฟราเรด

คลื่นอินฟราเรดเป็นคลื่นที่ตาของคนเรามองไม่เห็น เป็นคลื่นแม่เหล็กที่มีความยาวคลื่นตั้งแต่ 10^{-3} m ถึง $7.6 \times 10^{-7} \text{ m}$ ความถี่ตั้งแต่ $3 \times 10^{11} \text{ Hz}$ ถึง $4 \times 10^{14} \text{ Hz}$

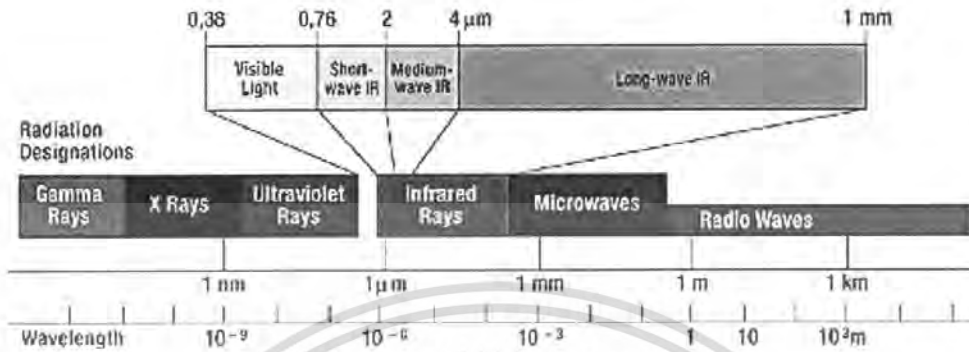
THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ภายในงานวิชาการที่สงวนไว้เฉพาะเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางสถาบันฯ
รูปที่ 2.1 แสดงถึงแถบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่คลื่นของอินฟราเรดนี้สามารถแบ่งได้ออกเป็น 3 ช่วงย่อยๆ คือ



รูปที่ 2.2 แสดงถึงย่านของอินฟราเรด

- อินฟราเรดไกล (Far Infrared) มีความยาวคลื่น $4 \times 10^{-6} \text{ m} - 10^{-3} \text{ m}$
- อินฟราเรดกลาง (Middle Infrared) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ $2 \times 10^{-6} \text{ m} - 4 \times 10^{-6} \text{ m}$
- อินฟราเรดใกล้ (Near Infrared) มีความยาวคลื่นตั้งแต่ $7.6 \times 10^{-7} \text{ m} - 2 \times 10^{-6} \text{ m}$

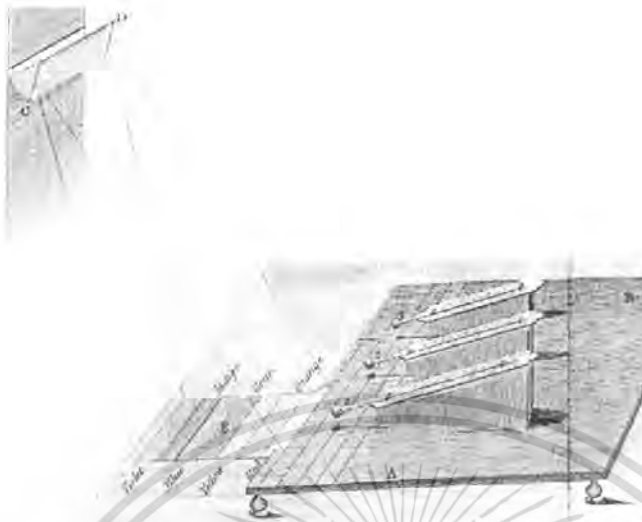
อะไรก็ตามที่มีอุณหภูมิอยู่เหนือศูนย์องศาสัมบูรณ์ (absolute zero) หรือ -273.15 องศาเซลเซียส จะปลดปล่อยคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในรูปแบบของคลื่น Infrared ออกมา ไม่ว่าจะเย็นจัดขนาดไหน ในโตรเจนเหลวที่อุณหภูมิ -196 องศาเซลเซียสก็ยังสามารถแผ่คลื่นอินฟราเรดออกมาได้ ถ้าตามทฤษฎีแม็กระทั่งฮีเลียมเหลวที่อุณหภูมิ 2.17 kelvin หรือประมาณ -271 องศาเซลเซียสก็ยังมีคลื่นอินฟราเรดแผ่จะน้อยนิดเต็มที

เพราะฉะนั้น ในอุณหภูมิที่เราอาศัยกันอยู่ทุกวันนี้ เราเหมือนถูกท่วมด้วยทะเลอินฟราเรดหรือคลื่นความร้อน (heat waves หรือ heat radiation) ซึ่งถูกค้นพบโดย Sir William Herschel เมื่อช่วงต้นศตวรรษที่ 19 เป็นคลื่นที่ตามองไม่เห็น แต่ออกจากวัตถุทุกชนิดที่มีความร้อนตั้งแต่กาน้ำเตาไฟคอนกรีต ถนนลาดยาง กระฉก ตัวถังรถยนต์ หลังคาสังกะสี หลังคามุงกระเบื้องที่ตากแดด แม็กระทั่งตัวเราก็อแผ่คลื่นอินฟราเรดออกมา

2.2 การค้นพบรังสีอินฟราเรด

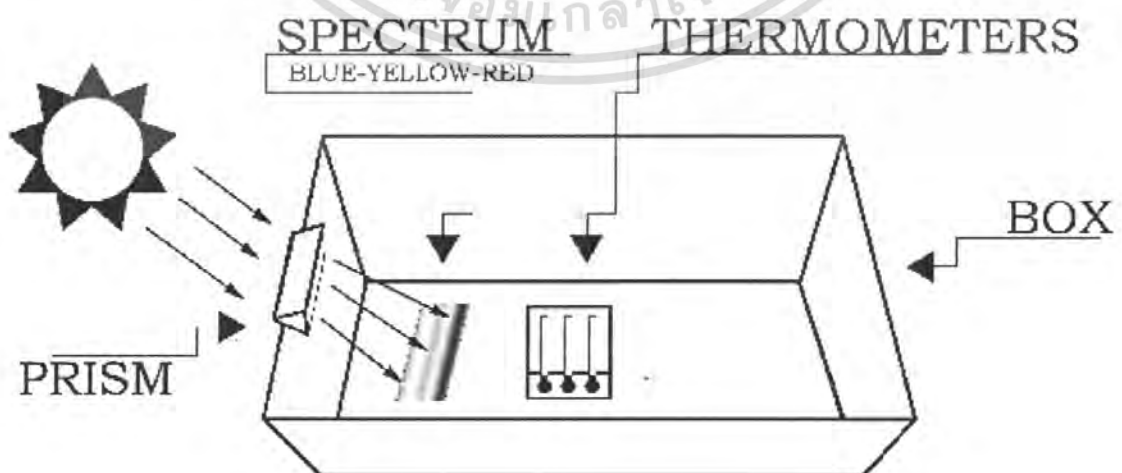
ในปี ค.ศ. ๑๗๖๐ ขณะที่ Sir William Herschel กำลังติดตามศึกษาดวงอาทิตย์อยู่ในกล้องดูดาวต้องมีการใช้เลนส์กรองแสง ซึ่งทำเป็นสีต่างๆ Sir William Herschel ต้องการทราบว่า ในเลนส์แต่ละสี จะเปลี่ยนค่าแสดงความร้อนของดวงอาทิตย์หรือไม่ ท่านจึงประดิษฐ์อุปกรณ์การทดลองอย่างง่าย ๆ เพื่อหาคำตอบ ซึ่งนับเป็นวิธีทดลองที่หลักแหลมเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 การทดลองของ Sir William Herschel

ท่านใช้ปริซึมแยกแสง แล้วให้แสงต่างๆ มาตกที่เทอร์โมมิเตอร์ซึ่งทำสีดำที่กะเปาะ เพื่อให้ดูความร้อนยิ่งขึ้น ความเป็นนักวิทยาศาสตร์ที่ละเอียดถี่ถ้วนเป็นนิสัยประจำตัว ท่านก็ตั้งเทอร์โมมิเตอร์ตัวหนึ่งนอกเหนือจากแสงสีต่างๆ นั้น เพื่อเป็นตัวควบคุมการทดลอง ปรากฏว่าแสงสีต่างมีอุณหภูมิสูงกว่าแสงสีขาวและอุณหภูมิสูงขึ้นจากสีม่วงไปหาสีแดง Sir William Herschel จึงเกิดความอยากรู้อยากเห็นแล้ววัดแถบเหนือแสงสีแดงขึ้นไปที่ไม่ปรากฏมีสีอะไร ดูเหมือนแสงอาทิตย์ธรรมดาเท่านั้นเอง แต่ Sir William Herschel ก็ประหลาดใจเป็นอย่างยิ่ง เมื่อปรากฏว่าเทอร์โมมิเตอร์ตัวที่อยู่นอกเหนือจากแสงสีแดงนั้นกลับวัดได้อุณหภูมิสูงกว่าทุกตัว



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับรูปที่ 2.4 แบบจำลองของกล่องทดลอง อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Sir William Herschel จึงทำการทดลองต่อไป ก็พบว่า ส่วนของแสงที่มองไม่เห็นแต่ร้อนกว่าสีแดงนี้ มีคุณสมบัติทางกายภาพเช่นเดียวกับคลื่นแสงที่มองเห็นได้ทุกประการ เช่น การหักเห การดูดซับ ส่องผ่านหรือไม่ผ่านตัวกลาง ฯลฯ ในตอนแรก Sir William Herschel เรียกแสงนี้ว่า Calorific rays ซึ่งก็เช่นเดิมที่การตั้งชื่อของท่าน ไม่น่าจะเป็นที่ถูกใจใครเท่าไรนัก รังสีที่ถูกค้นพบใหม่นี้ ก็ถูกเปลี่ยนชื่อไปเป็น รังสีอินฟราเรด ที่เรารู้จักกันมาทุกวันนี้



ปริซึมดั้งเดิมที่ Sir William Herschel ใช้ในการทดลองของท่าน ซึ่งปัจจุบันเก็บรักษาอยู่ที่ National Museum of Science and Industry ในกรุงลอนดอน ประเทศอังกฤษ

2.3 หลักการทำงานของตัวรับ-ตัวส่งโดยใช้อินฟราเรด

หลักการทั่วไปที่นำอินฟราเรดมาใช้งานก็ต้องมีตัวส่งและตัวรับ

- หลักการของตัวส่ง

การเพิ่มระยะทางการทำงานของแสงอินฟราเรดนั้นจะต้องเพิ่ม LED แล้วยังทำได้ด้วยวิธีอื่น ถ้าใช้ LED ตัวเดียวให้เพิ่มกระแสที่ขับ LED ให้สูงขึ้น โดยจำกัดช่วงการทำงานของ LED ให้สั้นลงโดยการใช้พัลส์เป็นตัวขับกระแสให้ LED

- หลักการของตัวรับ

ใช้โฟโตไดโอดทำหน้าที่แปลงสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้า ในการติดตั้งโฟโตไดโอดรับแสงควรมีแผ่นกรองแสงหรือฟิลเตอร์ชนิดที่ให้แสงอินฟราเรดผ่านได้(แผ่นพลาสติกสีแดงเข้ม) วางไว้

ด้านหน้า ป้องกันการรบกวนของคลื่นแสงตัวอื่นที่อาจกระทบเข้ามา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประยุกต์ใช้คลื่นอินฟราเรดจะเป็นการประยุกต์ใช้ในการสื่อสารแบบไร้สาย (Wireless communication) ในการควบคุมเครื่องมือ เครื่องใช้ไฟฟ้า โดยการส่งสัญญาณไปทาง LED (Light emitting diode) โดยตัวส่ง (transmitter) หรือ laser diode และจะมีตัวรับ (receiver) และทำการเปลี่ยนข้อมูลให้กลับไปเป็นเหมือนข้อมูลเริ่มแรก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

Photodetector

3.1 บทนำเกี่ยวกับ Photo detector

อุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มแสง หรือ Photo detector เป็นอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้าได้โดยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้สารหรือวัสดุมีการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น Photo detector มีด้วยกันหลายชนิดและการนำไปใช้งานที่แตกต่างกัน ในบทความนี้ผู้เขียนจะแนะนำ Photo detector ชนิดหลักๆ หลักการ และการนำไปใช้งานของ Photo detector แต่ละชนิด

3.2 หลักการพื้นฐาน

Photoelectron เป็นอุปกรณ์ที่เปลี่ยนสัญญาณแสงที่ตกกระทบตัวเครื่องให้กลายเป็นสัญญาณไฟฟ้า เช่น ศึก์หรือกระแส Photo detector หลายๆ ชนิดจะทำการแปลงสัญญาณนี้โดยการสร้างคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ (electron-hole pairs) ขึ้นจากการดูดกลืนโฟตอน อิเล็กตรอนอิสระนี้จะเกิดขึ้นในแถบการนำและโฮลอิสระเกิดในแถบวาเลนซ์ พาหะอิสระเหล่านี้จะเกิดการเคลื่อนในอุปกรณ์วัดจนสร้างสนามไฟฟ้าและทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า (photocurrent, I_{ph}) ประจุไฟฟ้า (e) ที่เกิดขึ้นทั้งหมดจะถูกเก็บสะสมรวบรวมไว้ที่วงจรมานอกหรือประจุไว้ในแบตเตอรี่

3.3 คุณสมบัติสำคัญของโฟโตดีเทกเตอร์

โฟโตดีเทกเตอร์แต่ละชนิดมีขีดจำกัดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ทำให้โฟโตดีเทกเตอร์แต่ละชนิดเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน ในการเลือกใช้งานจึงต้องพิจารณาจากคุณสมบัติของโฟโตดีเทกเตอร์ ได้แก่ ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) สภาพการตอบสนอง (responsivity) ความเร็วในการตอบสนอง (bandwidth) และช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนอง (spectral response)

3.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency : η) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่วงจรมานอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (Internal quantum efficiency : η_{int}) คือจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ส่วน

ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency : η_{ext}) คือจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ออกจากรั้วการนำไฟฟ้าต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ส่วน

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อนและค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ (α) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งหาได้จากสมการ 2.2

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / hv} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{hv}{P_{inc}} \quad (2.3)$$

โดยที่	P_{inc}	คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)
	I_p	คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทกเตอร์
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์
	v	คือ ความถี่ของคลื่น

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 90 % แต่ถ้าไม่มีการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนบนผิวของโฟโตไดโอด แสงที่ตกกระทบชั้นสารกึ่งตัวนำจะสะท้อนออกไปประมาณ 30 % เนื่องจากดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 70 %

3.3.2 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (Responsivity:R) หมายถึงกระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.2

$$R = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{hv} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (2.4)$$

โดยที่	P_{inc}	คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)
	I_p	คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทกเตอร์
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์
	v	คือ ความถี่ของคลื่น
	λ	คือ ความยาวคลื่น
	η	คือ ค่าประสิทธิภาพควอนตัม

จากสมการที่ (2.4) พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาขาลง (t_f)

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ของ

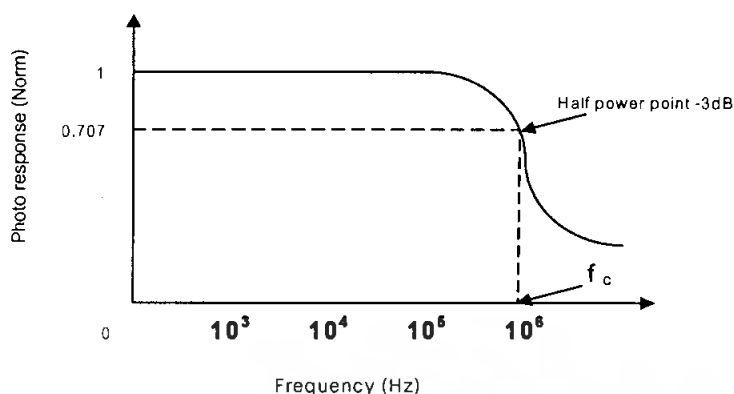
1. เวลาการแพร่ (Diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณหลอดพาหะ
2. เวลาส่งผ่าน (Transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณหลอดพาหะ
3. ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับ

ค่าโหลดความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆจะต้องพิจารณาถึงแฟกเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย

3.3.4 แบนด์วิดท์

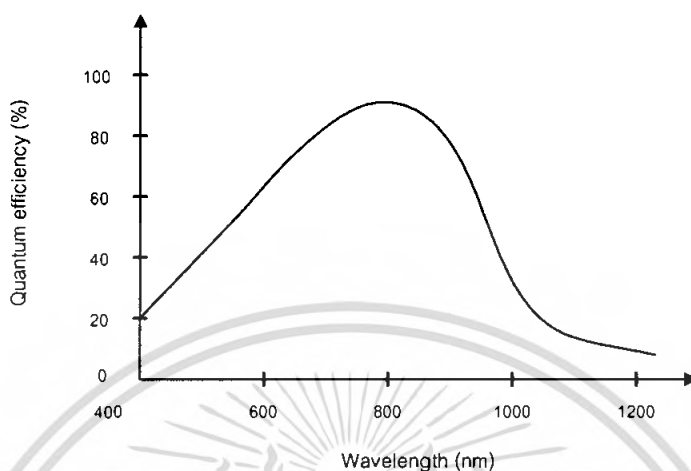
แบนด์วิดท์ (bandwidth) คือ อัตราเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณค่าความถี่ต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางประการของโฟโตดีเทกเตอร์ ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น ดังรูป 3.1 ในทางปฏิบัติ การตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency : f_c) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุด half power point มีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่โฟโตดีเทกเตอร์สามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานของโฟโตดีเทกเตอร์มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ



รูปที่ 3.1 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

3.3.5 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัม

ผลตอบสนองของสเปกตรัมทางแสงหมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลง ค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงจะเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการดูดกลืนโฟตอนเฉพาะบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์รวมตัวที่ผิวทำให้ผลการตอบสนองดีเทกเตอร์ลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับโฟโตดีเทกเตอร์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของ ซิลิคอนโฟโตไดโอด

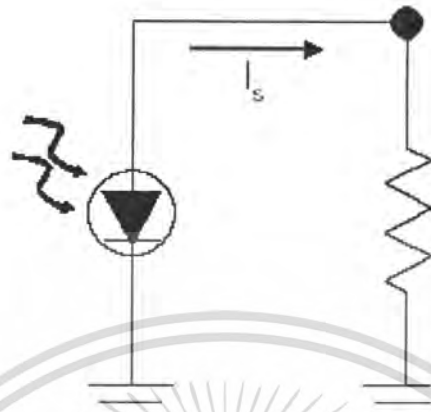
จากรูปที่ 3.2 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น โดยมีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด และการตอบสนองจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคลื่นสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถตอบสนองได้คือ 1110 nm

3.4 ชนิดของโฟโตดีเทกเตอร์

โฟโตดีเทกเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ปัจจุบันโฟโตดีเทกเตอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ โฟโตคอนดักเตอร์ และโฟโตไดโอด โดยในกลุ่มของโฟโตไดโอดยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายชนิดตามลักษณะโครงสร้าง เช่น พีเอ็นโฟโตไดโอด อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด ซ็อดกีย์โฟโตไดโอด และ พินโฟโตไดโอด

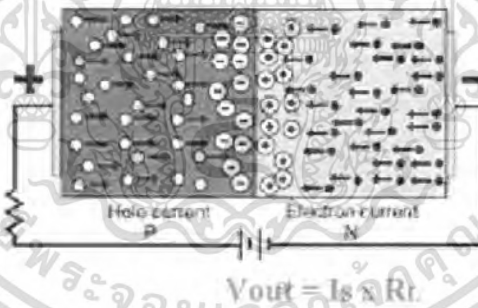
3.4.1 Photo diode โฟโตไดโอดเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ที่มีความไวต่อแสงมาก โฟตอนจากแสงอินฟราเรดที่ส่งมามีผลทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระหลุดออกมาจากบอนด์ สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง (สาร P) แล้ววิ่งทะลุผ่านรอยเชื่อม (Junction) ไปยังสารกึ่งตัวนำอีกชนิดหนึ่ง (สาร N) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮล โดยปกติแล้วรอยเชื่อมหรือรอยต่อของโฟโตไดโอด นี้จะมีขนาดใหญ่มากกว่ารอยต่อของสาร P-N ทั่วไปและเมื่อให้แรงดันไฟฟ้าจะเกิดสนามไฟฟ้าในแท่งสารนั้นเป็นผลทำให้ประจุอิเล็กตรอนและโฮล เคลื่อนที่ โฟโตไดโอดจึงมีหลักการทำงานโดยอาศัยแสงในการเพิ่มพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในเนื้อสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



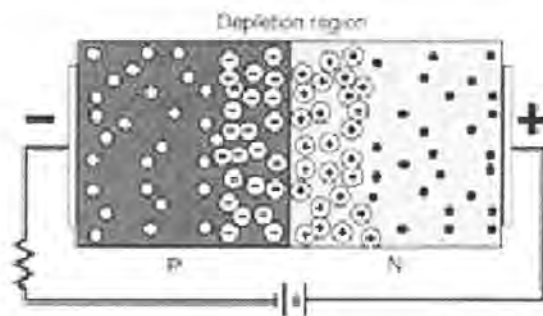
$$V_{out} = I_s \times R_L$$

รูปที่ 3.3 วงจรโฟโตไดโอดแบบเบี่ยงต้น



รูปที่ 3.4 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลเมื่อทำการจ่าย Forward bias

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ภาพแสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลเมื่อทำการจ่าย Reversed bias

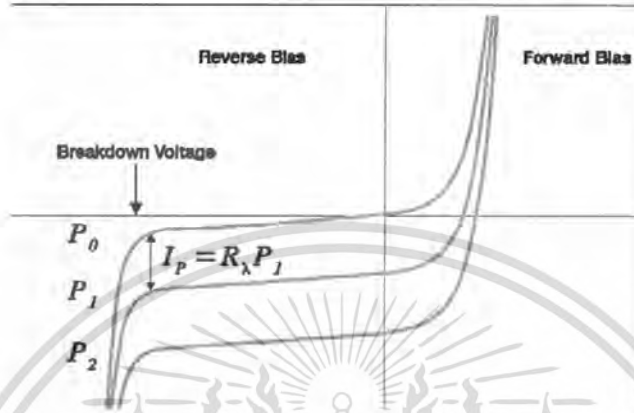
วงจรโฟโตไดโอดเบื้องต้นต่อไปนี้เป็นวงจรความต้านทานโหลดและแหล่งจ่ายไฟดังรูป 2.3 โดยปกติไดโอดจะถูกไบแอสตรงแต่ในขณะที่ไบแอสตรงนี้ จำนวนอิเล็กตรอนและโฮลที่ในเนื้อสารมีจำนวนไม่มากนัก ดังนั้นกระแสที่ไหลในวงจรจึงเป็นส่วนน้อย ครั้นเมื่อส่วนของสารกึ่งตัวนำมีแสงส่องถูก จะทำให้เนื้อสารเกิดอิเล็กตรอนอิสระและโฮลเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก จำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะแปรตรงกับความเข้มของแสงแต่เมื่อเพิ่มความเข้มของแสงจนถึงค่าหนึ่งจะไม่มีเพิ่มของอิเล็กตรอนอิสระอีกแล้วในช่วงนี้เราจะเรียกว่า ช่วงอิ่มตัว (saturation region) ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบจำนวนกระแสที่ไหลผ่านตัวไดโอดนี้เรียกว่า กระแสมืด (dark current)



รูปที่ 3.6 ภาพการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากชั้นวาเลนส์ไปยังชั้นคอนดักชัน

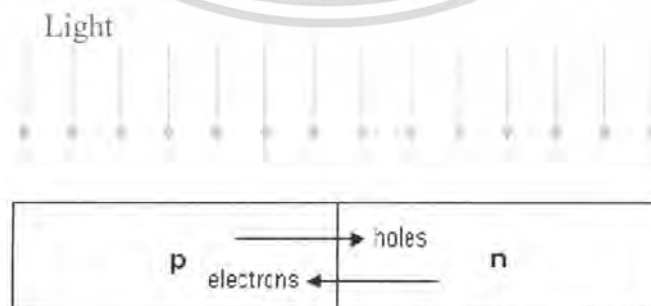
โฟโตไดโอด เป็นไดโอดที่อาศัยแสงจากภายนอกผ่านเลนส์ ซึ่งฝังตัวอยู่ระหว่างรอยต่อ p-n เพื่อกระตุ้นให้ไดโอดทำงาน การต่อโฟโตไดโอดเพื่อใช้งานจะเป็นแบบไบอัสกลับ ทั้งนี้เพราะไม่
 เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่หรือใช้
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต้องการให้โฟโตไดโอดทำงานในทันทีทันใด แต่ต้องการให้ไดโอดทำงานเฉพาะเมื่อมีปริมาณแสงสว่างมากพอตามที่กำหนดเสียก่อน กล่าวคือ เมื่อเลนซ์ของโฟโตไดโอดได้รับแสงสว่างจะเกิดกระแสรั่วไหล ปริมาณกระแสรั่วไหลนี้เพิ่มขึ้นตามความเข้มของแสง



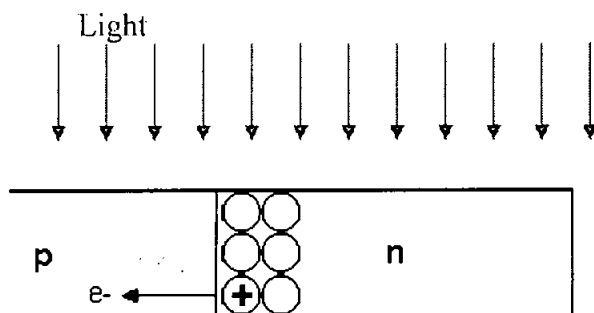
รูปที่ 3.7 กราฟแสดงค่ากระแส และแรงดันของโฟโตไดโอด

การทำงานของโฟโตไดโอด โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ทางด้านเซมิคอนดักเตอร์ ที่มีหน้าที่หลักๆ ในการเปลี่ยนสัญญาณแสง เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า จากโครงสร้างพื้นฐานจะเห็นได้ว่า ตรงบริเวณรอยต่อ P-N จะเป็นบริเวณที่มีการเคลื่อนที่ของประจุอิเล็กตรอน และโฮลตามปกติ เหมือนไดโอดธรรมดาตัวหนึ่ง จึงเป็นบริเวณปลอดพาหะ แต่ตรงบริเวณนี้จะเป็นจุดที่ใช้สำหรับรับแสง เพื่อที่จะแปลงแสงอาทิตย์ มาเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสารกึ่งตัวนำชนิด P จะเป็นตัวรับแสงเข้ามาทำให้เกิดกระบวนการที่เรียกว่าโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic effect) คือกระบวนการที่มีหน้าที่ในการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้านั่นเอง

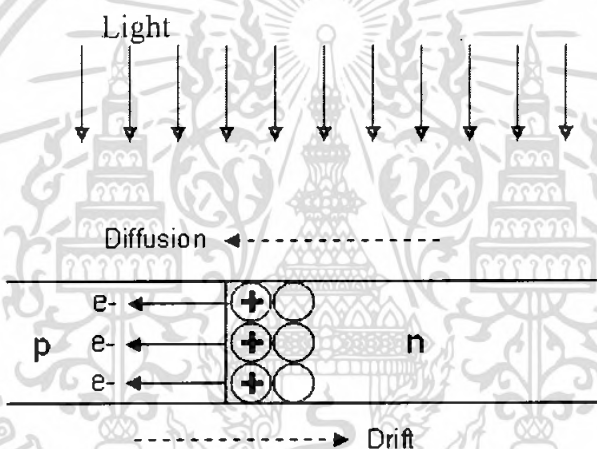


รูปที่ 3.8 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน-โฮลช่วงต้นของการชนกันของสาร P-N

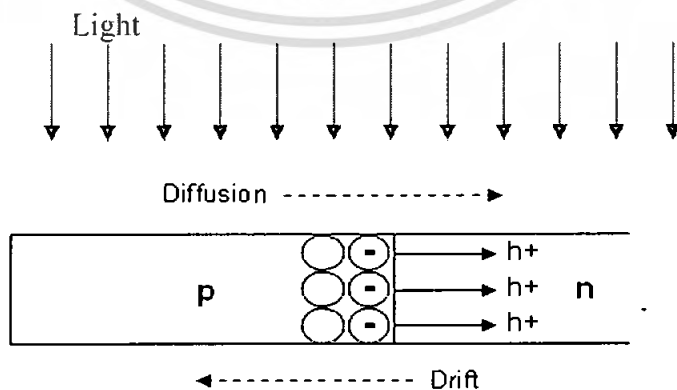
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพีแล้วทิ้งให้เกิดโฮลเอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N

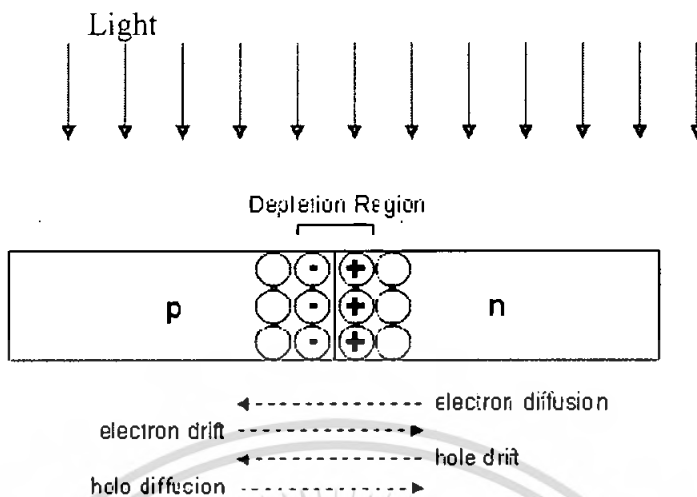


รูปที่ 3.10 แสดงการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นข้ามไปด้านพี ที่มากขึ้น แล้วทิ้งให้เกิดโฮลเอาไว้ที่จุดเดิมที่อิเล็กตรอนเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N

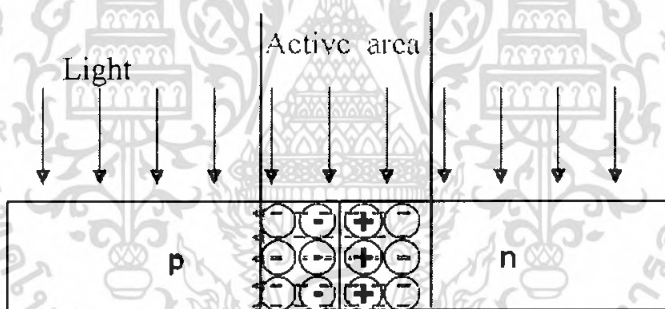


รูปที่ 3.11 แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลจากด้านพีข้ามไปยังด้านเอ็น แล้วทิ้งให้เกิดอิเล็กตรอนเอาไว้ที่จุดเดิมที่โฮลเคยอยู่ก่อนการชนกันของสาร P-N

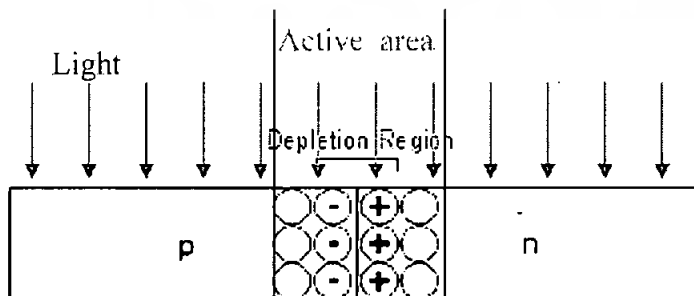
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 แสดงการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่
เข้ามาจนเกิดบริเวณปลอดพาหะที่สมบูรณ์

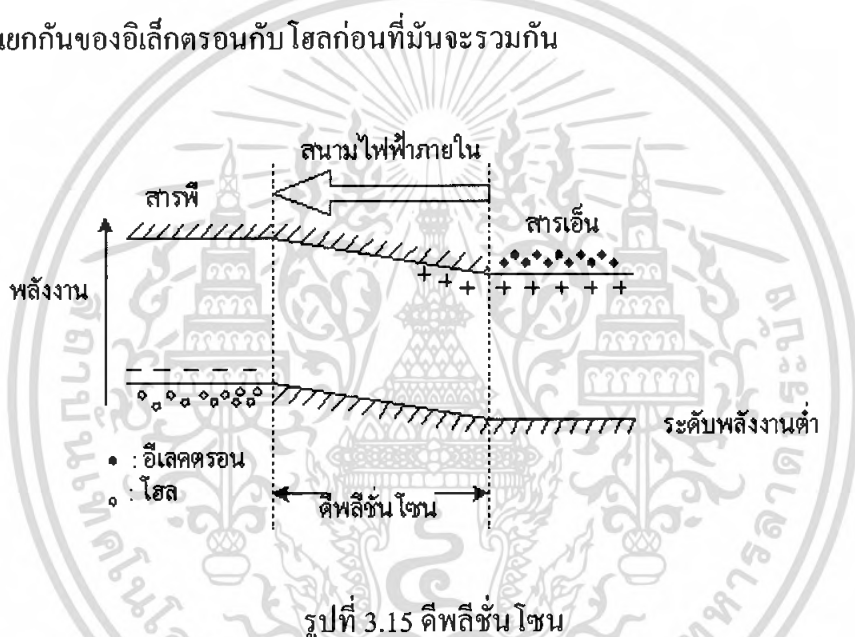


รูปที่ 3.13 แสดงการเกิดสนามไฟฟ้าบริเวณพื้นที่รับแสงเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอดพาหะ



รูปที่ 3.14 แสดงบริเวณพื้นที่รับแสงเป็นบริเวณเดียวกับบริเวณปลอดพาหะ

การรับแสงหมายถึงการเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้า ในการทำงานนี้แบ่งออกเป็น 2 วิธี คือ วิธีที่หนึ่งเป็นการเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นไฟฟ้าโดยตรง วิธีที่สองทำได้โดยการเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานความร้อนแล้วจึงเปลี่ยนเป็นไฟฟ้า วิธีที่หนึ่งนั้นเรียกว่า "โฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟค (Photo Electric Effect)" ส่วนวิธีที่สองเรียกว่า "เซนซิทีฟฮีทเอฟเฟค (Sensitive Heat Effect)" หลักการของโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคใช้ขบวนการดูดพลังงาน นั่นคือ เมื่อมีแสงมาตกกระทบสารกึ่งตัวนำอิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานต่ำจะเลื่อนขึ้นไปอยู่ที่ระดับพลังงานสูงแต่การเลื่อนขึ้นไปนี้เป็นแต่เพียงอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปเท่านั้น และในที่สุดมันจะไปรวมกันใหม่กับโฮลในระดับพลังงานต่ำอีกทำให้ไม่ได้รับโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคเพื่อที่จะเปลี่ยนแสงให้เป็นไฟฟ้าจะต้องใช้สภาพการแยกกันของอิเล็กตรอนกับโฮลก่อนที่มันจะรวมกัน

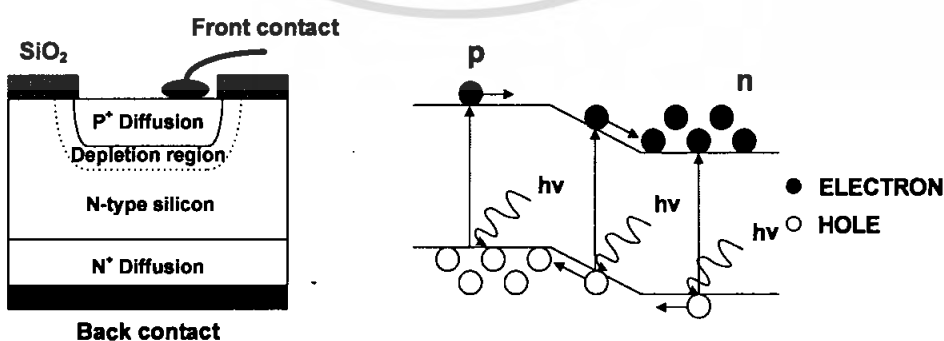


สำหรับอุปกรณ์รับแสงสารกึ่งตัวนำก็เช่นเดียวกันกับอุปกรณ์กำเนิดแสง นั่นคือเพื่อที่จะแยกอิเล็กตรอนกับโฮลนั้นโดยทั่วไปใช้รอยต่อพีเอ็น ที่รอยต่อของพีกับเอ็นนั้นจะเกิดสนามไฟฟ้าในที่ว่างขึ้น แต่มันจะถูกดึงด้วยอิเล็กตรอนของสารเอ็นและโฮลของสารพี ซึ่งมีประจุไฟฟ้าเป็นลบและบวกเป็นผลให้เกิดบริเวณที่ไม่มีอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นตรงรอยต่อบริเวณนี้เรียกว่าดีพลีชันโซน (Depletion Zone) ดังแสดงในรูปที่ 3.15 ในสภาพอย่างนี้เมื่อมีแสงมากระทบจากทางด้านบริเวณสารพีแสงนั้นจะถูกดูด พร้อมทั้งเคลื่อนที่ไปทางบริเวณสารเอ็นแต่ที่ดีพลีชันโซนอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากการดูดพลังงานจากแสงจะถูกสเปคอิเล็กทริกฟิลด์ (Space Electric Field) แยกไปในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือ อิเล็กตรอนไปทางด้านเอ็นและโฮลไปทางด้านพี ที่บริเวณซึ่งอยู่ห่างจากดีพลีชันโซนนั้น เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดจากโฟโตอิเล็กทริกเอฟเฟคจะรวมตัวกันใหม่ ในระหว่างเคลื่อนที่ แต่สำหรับอิเล็กตรอนและโฮลที่เคลื่อนที่เข้าไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในสเปกอิเล็กทริกฟิล์มแล้วนั้นจะสามารถเข้าไปยังบริเวณตรงกันข้ามได้ ผลที่ได้ก็คือ จะเกิดแรงดันไฟฟ้าที่เป็นสัดส่วนกับบริเวณของอิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกแยกขึ้นระหว่างปลายทั้งสองของสารพีและ สารเอ็นถ้าหากนำวงจรกิจภายนอกมาต่อกับปลายทั้งสองนี้จะทำให้อิเล็กตรอน และ โฮลสามารถรวมตัวกันได้โดยผ่าน วงจรภายนอก นั่นคือมีกระแสไหลนั่นเองกระแสที่เกิดที่ฟิล์มชั้นโฮลเรียกว่า "Drift Current" ส่วนกระแสที่เกิดตรงบริเวณที่อยู่ห่างจากฟิล์มชั้นโฮลเรียกว่า "Diffusion Current" และกระแสนี้เป็นหลักของการเปลี่ยนแสงเป็น ไฟฟ้า

3.4.1.1 พี-เอ็นโฟโตไดโอด พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) หรือโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นทั่วไป แต่ได้ถูกออกแบบให้แสงสามารถตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็นได้ โครงสร้างทั่วไปของโฟโตไดโอดและแถบพลังงานของพี-เอ็นโฟโตไดโอดแสดงในรูป 3.16 ในขณะที่ใช้งานจะป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับรอยต่อพี-เอ็นทำให้สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงขึ้นและบริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนพี-เอ็นโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p , บริเวณปลอดพาหะ , และชั้น n ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าในชั้น p จะแพร่ไปสู่ในชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่วงจรกิจภายนอก จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแปร โดยตรงกับความเข้มแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน



รูปที่ 3.16 โครงสร้างและแถบพลังงานของพี-เอ็น โฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

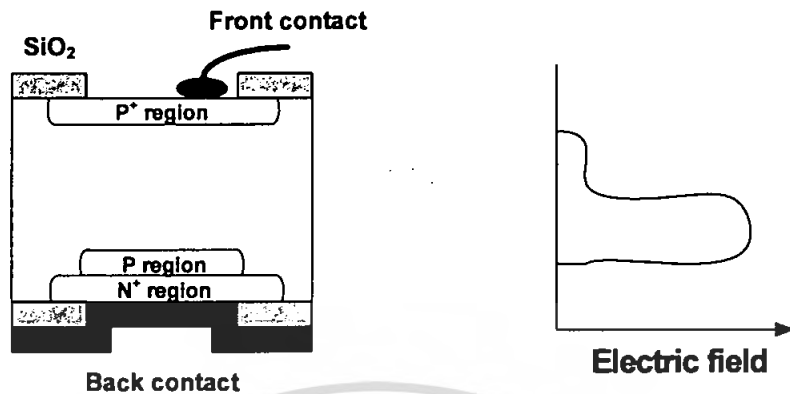
คุณสมบัติเด่นของพี-เอ็นโพโตไดโอด พบว่าจะทำงานได้เร็วกว่าโพโตคอนดักเตอร์ และมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่า แต่มีข้อด้อยคือ ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภทซึ่งต้องทำงานด้วยความเร็วสูงมากๆ พี-เอ็นโพโตไดโอดไม่สามารถตอบสนองได้

3.4.1.2 ภาวะถล่มโพโตไดโอด ภาวะถล่มโพโตไดโอด (Avalanche Photodiode: APD) มีโครงสร้างคล้ายพินโพโตไดโอด ดังแสดงในรูป 3.17 แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้โพโตไดโอดทำงานใกล้ๆกับจุดพังทลาย (breakdown point) ด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 300-500 โวลต์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ภาวะถล่มขึ้น

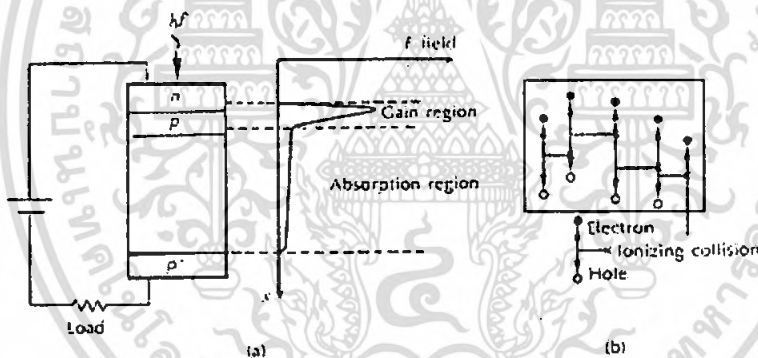
ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามาชั้น p^+ แสงจะถูกดูดกลืนในบริเวณชั้นปลอดพาหะ และเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่อุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น n^+ และ โฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น p^+ ในการสร้างโพโตไดโอดชั้น π (สารกึ่งตัวนำชนิด p ที่ถูกโดปอย่างเจือจาง) จะมีความต้านทานสูงกว่าชั้น p และชั้น p^+ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมที่ชั้น p มากที่สุด เป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาสู่ชั้น p จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้และวิ่งไปชนกับโครงร่างผลึกและทำให้ผลึกแตกตัวเกิดเป็นไอออน ซึ่งจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นสู่แถบนำไฟฟ้า และเกิดโฮลขึ้นใหม่ในแถบวาเลนซ์ และจะเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำๆ ตลอดเวลาที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้เกิดพาหะอิสระเป็นจำนวนมากมาย จึงทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น

โครงสร้างของไดโอดรับแสงแบบ APD

ไดโอดรับแสงแบบ APD จะมีโครงสร้างและลักษณะของสนามไฟฟ้างambarkanที่ 3.6 โดยในรูป (a) ซึ่งเป็นโครงสร้างจะเห็นว่ามีการ P^+ มาต่อที่ปลายอีกด้านหนึ่งของสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ โดยสาร P^+ นี้จะหมายถึง สารพีที่มีความหนาแน่นของโฮลสูง เพื่อให้สนามไฟฟ้าบริเวณสารพี-เอ็น มีค่ามากคือ เกิดช่วงที่เรียกว่า "**ช่วงอัตรขยาย (Gain region)**" หรือ "**ช่วงภาวะถล่ม (Avalanche region)**" ดังแสดงในรูปที่ 3.18



รูปที่ 3.17 ลักษณะสนามไฟฟ้าของอะวอลานซ์โฟโตไดโอด (APD)



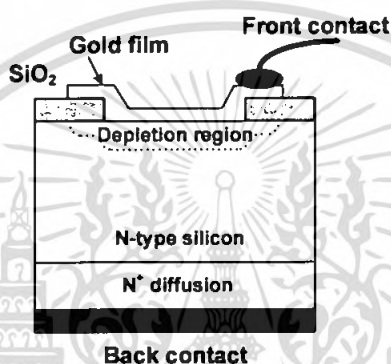
รูปที่ 3.18 ช่วงอวอลานซ์(Avalanche region)ของอะวอลานซ์โฟโตไดโอด (APD)

เมื่อมีแสงมาตกกระทบจะทำให้ให้มีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารเอ็นไปยังสารพี อิเล็กตรอนจะได้รับพลังงานจำนวนมากกว่าผลต่างของระดับพลังงานระหว่างแถบความนำและ แถบวาเลนซ์ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานมากระดับจะส่งผลให้อิเล็กตรอนมีพลังงานสูงพอที่จะ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลที่รวมตัวกันอยู่ในช่องว่างบริเวณรอยต่อแตกตัวออก ทำให้ช่องว่าง บริเวณรอยต่อยิ่งแคบลงส่งผลให้อิเล็กตรอนสามารถข้าม ไปรวมตัวกับโฮลได้มากขึ้นและเร็ว ขึ้น โดย APD มีความไวสูงกว่า PIN ประมาณ 10 - 20 dB

ข้อได้เปรียบของอะวอลานซ์โฟโตไดโอดคือ เป็นโฟโตไดโอดที่มีการตอบสนองสูง (High sensitive photodiode) และมีอัตราขยายสัญญาณ (gain) ซึ่งมากกว่าพินโฟโตไดโอด 50-300 เท่า แต่มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่สูงมาก และสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุทและสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจากมีอัตราขยายในโฟโตไดโอด

3.4.1.3 ซ็อดทึบ์โฟโตไดโอด ซ็อดทึบ์โฟโตไดโอดสร้างขึ้นจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้น p จะถูกแทนด้วยฟิล์มโลหะที่บางมาก เช่น ทองคำหนาประมาณ 15 nm โครงสร้างของซ็อดทึบ์โฟโตไดโอด แสดงได้ดังรูปที่ 3.19

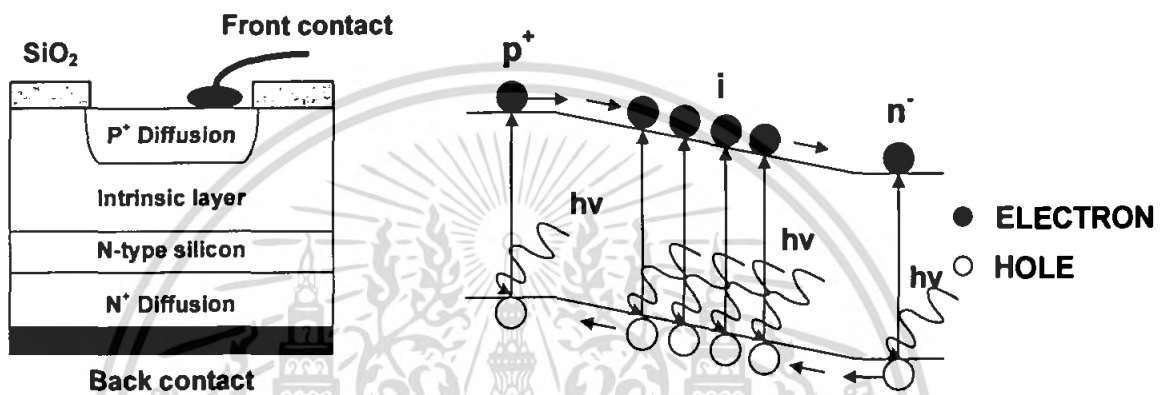


รูปที่ 3.19 โครงสร้างของซ็อดทึบ์โฟโตไดโอด

ชั้นฟิล์มโลหะบางๆนี้ จะทำให้แสงสามารถผ่านทะลุชั้นโลหะลงไปได้ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นใต้ชั้นฟิล์มโลหะ โฟตอนที่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะบางๆจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ถ้าเปรียบเทียบกับพินโฟโตไดโอดแล้ว ซ็อดทึบ์โฟโตไดโอดจะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้โครงสร้างซ็อดทึบ์โฟโตไดโอดยังมีค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูงกว่า สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ได้ดี

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพควอนตัมต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอนและระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

3.4.1.4 พินโฟโตไดโอด พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) หรือโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n มีการพัฒนาขึ้นจาก p-n โฟโตไดโอด โดยภายในโครงสร้างมีการสร้างชั้น i ขึ้นตรงกลางระหว่างชั้น p และชั้น n ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการเจือด้วยสารเจือปริมาณน้อยมาก โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอดแสดงรูปที่ 3.20



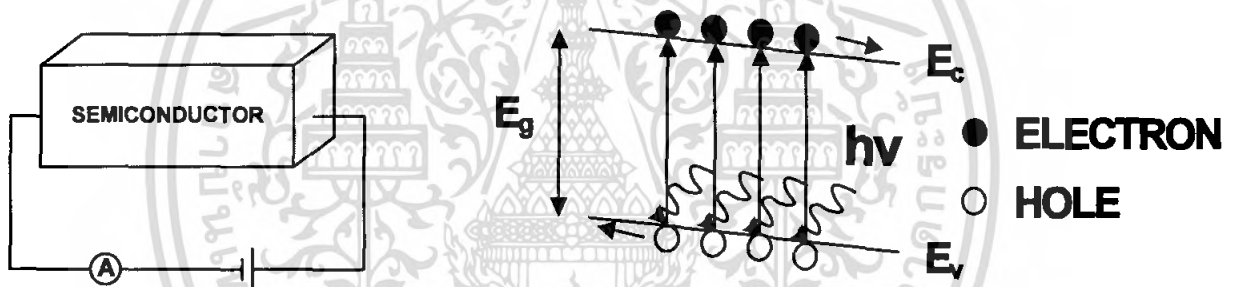
รูปที่ 3.20 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอด

ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนจะถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดที่บางมากๆ เพื่อให้โฟตอนในแสงทะลุผ่านไปถึงชั้น i และที่ชั้น i นี้มีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ เนื่องจากชั้น i มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน p⁺ และด้าน n⁺ เป็นผลให้เมื่อพินโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัส จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้น i และเนื่องจากแรงดันที่คดคร่อมที่ส่วน i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i

พินโฟโตไดโอดมีความเร็วในการทำงานสูงกว่า p-n โฟโตไดโอด เนื่องจากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการการทำงานที่รวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสง เป็นต้น นอกจากนี้จะมีผลการตอบสนองด้านเวลารวดเร็วแล้ว พินโฟโตไดโอดยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่า p-n โฟโตไดโอด เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสง (i) ที่กว้างกว่าบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากรอยต่อ p-n แต่ข้อด้อยของพินโฟโตไดโอดก็คือ ถ้าสร้างให้มีพื้นที่ใหญ่จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง และกระบวนการสร้างของพินโฟโตไดโอดมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องสร้างชั้น i ให้มีความบริสุทธิ์ และต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย

3.4.2 โฟโตคอนดักเตอร์ โฟโตคอนดักเตอร์เป็นโฟโตดีเทกเตอร์ที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด สร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียวโดยไม่ต้องมีการแพร่อะตอมสารเจือเพื่อให้เกิดเป็นรอยต่อ มีการสร้างขั้วไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคขึ้นที่ส่วนปลายของสารกึ่งตัวนำเพื่อจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.21 เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนโฟโตคอนดักเตอร์จะทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้าและทำให้เกิด

โฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนในแถบความนำสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของโฮลในแถบวาเลนซ์ เมื่อให้แรงดันไบอัสจากภายนอกแก่ขั้วทั้งสองจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตกคร่อมภายในชั้นสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่กลับทิศกับสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วบวก ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ในทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วลบทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โดยกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงตกกระทบบนและความสามารถในการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.21 โครงสร้างและแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์

คุณสมบัติเด่นของโฟโตคอนดักเตอร์คือ มีโครงสร้างง่าย และมีราคาถูก แต่ข้อด้อยที่สำคัญของโฟโตคอนดักเตอร์คือ ความเร็วในการตอบสนองช้า ซึ่งใช้เวลาอยู่ในระดับมิลลิวินาที โฟโตคอนดักเตอร์ที่มีขนาดใหญ่จะมีสภาพการตอบสนองที่ดีแต่จะใช้เวลาในการตอบสนองที่นานขึ้นด้วย

3.4.3 Photo resistor หรือ Light Dependent Resistor (LDR) Photo resistor เป็นอุปกรณ์ที่ค่าความต้านทานมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อปริมาณความเข้มแสงที่ตกกระทบบนมีการเปลี่ยนแปลง โดยจะมีค่าลดลงเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น Photoresistor ทำมาจากสารกึ่งตัวนำที่มีค่าความต้านทานสูง ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะผลิตจาก Cadmium Sulfide (CdS) ซึ่งมีความไวในช่วงแสงขาว หรือมีส่วนประกอบของ Lead Sulfide (PbS), Lead Selenide (PbSe) และ Lead Telluride (PbTe) ที่มีความไวในช่วงอินฟราเรด Photo detector ชนิดนี้จะทำงานก็ต่อเมื่อแสงที่ตกกระทบบนมีความถี่เพียงพอที่จะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบเขียวประโยชน์ด้านนี้การดำเนินการใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้อิเล็กทรอนิกส์ในแถบวาเลนซ์กระโดดไปยังแถบการนำกลายเป็นอิเล็กตรอนอิสระที่สามารถนำกระแสไฟฟ้า ที่อุณหภูมิห้องจำนวนอิเล็กตรอนอิสระที่เกิดขึ้นจะถูกจำกัด แต่เมื่อเพิ่มความเข้มแสง การนำไฟฟ้าก็จะมีค่าเพิ่มมากขึ้น และเวลาในการตอบสนองจะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ของพาหะ ซึ่งโดยทั่วไปจะอยู่ที่ประมาณ 50 มิลลิวินาที Photoresistor มีราคาไม่แพงมากนัก มีขนาดเล็ก และนำไปใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น มิเตอร์วัดแสงของกล้องถ่ายรูปสัญญาณเตือนความปลอดภัย หรือ ไฟตามท้องถนนที่เปิด-ปิด ได้อย่างอัตโนมัติตามระดับความเข้มของแสงอาทิตย์ เป็นต้น



รูปที่ 3.23 แสดงหลักการทำงานของ Light Dependent Resistor (LDR)

3.4.4 Photo Transistor ทรานซิสเตอร์พลังแสง หรือที่นิยมเรียกว่า"โฟโตทรานซิสเตอร์"

เป็นอุปกรณ์ทรานซิสเตอร์ชนิดสารกึ่งตัวนำแบบเล็องงานอีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย โดยอาศัยหลักการทำงานเช่นเดียวกับโฟโตไดโอด แต่จะดีกว่าตรงกระแสที่ไหลผ่านในตัวเองสูงกว่าโฟโตไดโอด ในรูป แสดงสัญลักษณ์ของโฟโตทรานซิสเตอร์ สำหรับการนำเอาโฟโตทรานซิสเตอร์ไปใช้งานนั้นจะต้องต่อวงจรในลักษณะไบอัสกลับที่รอยต่อระหว่างขา Base กับขา Collector เช่นเดียวกับโฟโตไดโอด เมื่อมีแสงสว่างมาตกกระทบบริเวณนี้ จะเกิดกระแสเบส (I_b) ที่เกิดขึ้นจากอิเล็กตรอนไหลเข้าสู่ทรานซิสเตอร์และกระแสเบสนี้จะถูกขยายด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่ออยู่ในที่เห็นเป็นเชิงพาณิชย์ท่านสามารถนำไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการขยายกระแส(h_{fe})ของทรานซิสเตอร์ ดังนั้นโฟโตทรานซิสเตอร์จึงสามารถนำกระแสได้สูงกว่าโฟโตไดโอด

โฟโตทรานซิสเตอร์ใช้ประโยชน์ในงาน

- เครื่องควบคุมแสง
- ตรวจสอบแผ่นการ์ดหรือเทปเจาะรู
- ตัวเชื่อมแสงกับวงจรรีเลย์ทรอนิกส์



รูปที่ 3.24 แสดงการทำงานของ Photo transistor

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง

ในบทนี้เป็นการแสดงถึงเทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้างซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PINแบบแนวตั้ง เพื่อศึกษาคุณสมบัติการทำงาน และพารามิเตอร์ต่างๆที่เป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของ โฟโตไดโอด ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังแผนภูมิ รูปที่ 4.1

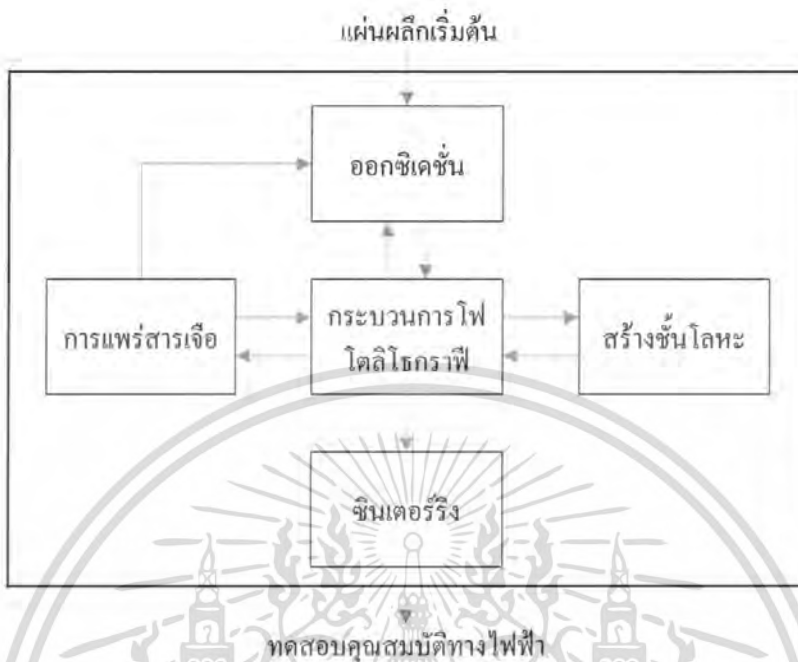


รูปที่ 4.1 แผนภูมิกระบวนการสร้างซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิดPINแบบแนวตั้ง

4.1 เทคโนโลยีการสร้าง

กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ ออกซิเดชัน, กระบวนการ โฟโตลิโกราฟี, การแพร่สารเจือ, การสร้างชั้นโลหะ และซินเตอร์ริง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งรายละเอียดแต่ละกระบวนการจะกล่าวต่อไป

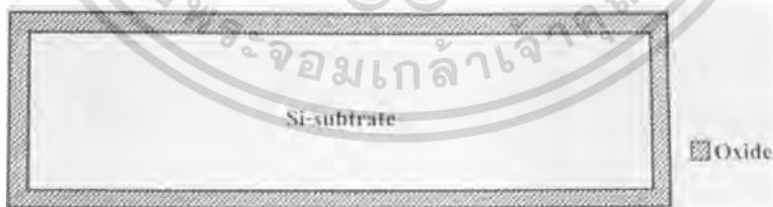
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใ้ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน

4.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน

ภายหลังจากขั้นตอนการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ ขึ้นปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่น ดังรูปที่ 4.3

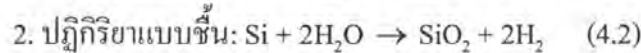
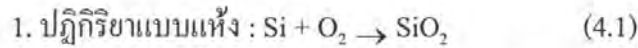


รูปที่ 4.3 ภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน

ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะ โปร่งแสง ใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่าง คือ เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ (diffusion mask) ใช้ขั้นตอนการแพร่ชั้นสารเจือ และเพื่อป้องกันผิวหน้าแผ่นซิลิกอนเพื่อป้องกันอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น

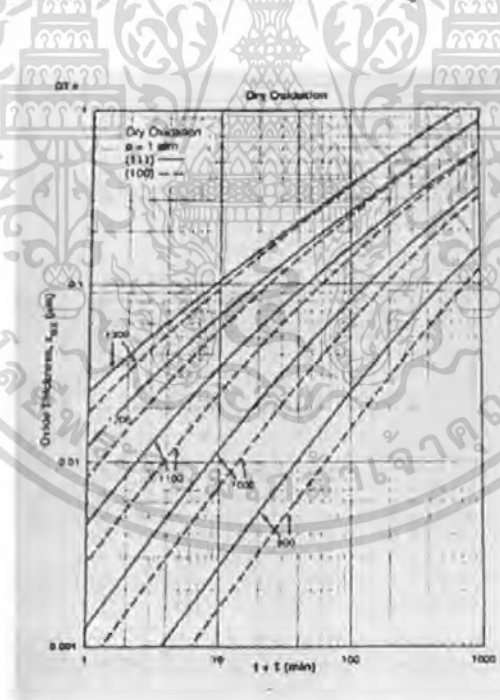
ซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยทั่วไปจะมีความหนาอยู่ในช่วง 5000 – 10000 Å° กระบวนการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์หน้านี้จะเรียกว่า กระบวนการออกซิเดชันด้วยไมวากรณ์ใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเทคนิคเปลี่ยนเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความร้อน (thermal oxidation process) โดยการให้แผ่นซิลิกอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) หรือบรรยากาศที่มีไอน้ำ ($O_2 + H_2O$) ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 900 ถึง 1150 °C ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าซิลิกอน เป็นดังนี้



กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง(Dry Oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิกอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารเจือปน ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 900 – 1150 °C จะทำให้อุณหภูมิของซิลิกอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิกอน ไดออกไซด์ดังในสมการที่ (4.1) ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ที่ได้จากวิธีดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความหนายอกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชัน ในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆด้วยกระบวนการแบบแห้ง -

2. การออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของผลึกซิลิกอน และอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงในสมการที่ (4.2) อัตราการเกิดออกไซด์เร็วขึ้นเป็นเอกสารถ่วงมวลเร็วสำหรับการแข็งตัวเพื่อการกัดออกซิเดชัน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและประจุของการกัดไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบขึ้นจะเร็วกว่าอัตราการเกิดที่ได้จากกระบวนการแบบแห้งถึง 4 เท่า เนื่องจากขนาดของ โมเลกุลน้ำเล็กกว่า โมเลกุลของออกซิเจนครึ่งหนึ่ง ดังนั้นอัตราการแพร่ของ โมเลกุลน้ำไปยังชั้นซิงก์อนไดออกไซด์จึงมากกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจน แม้ว่าอัตราการเกิด ออกไซด์ด้วย โมเลกุลของน้ำจะมากกว่าออกซิเจน แต่ออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของ โครงสร้างออกไซด์สูงกว่าแบบขึ้น กระบวนการออกซิเดชันต่างๆ ไปจะใช้ “แห้ง - ขึ้น -แห้ง” โดย เริ่มต้นการสร้างชั้นออกไซด์แบบแห้ง จากนั้นจึงสร้างชั้นออกไซด์แบบขึ้นเพื่อให้ชั้นออกไซด์หนา ขึ้น เนื่องจากการสร้างชั้นออกไซด์แบบขึ้นจะสร้างได้เร็วกว่า และสร้างชั้นออกไซด์แบบแห้งเป็น ชั้นตอนสุดท้าย สำหรับความหนาของชั้นซิงก์อน ไดออกไซด์แบบขึ้น สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความหนานอกไซด์กับเวลาในการออกซิเดชัน ในการสร้างออกไซด์ที่ อุณหภูมิต่างๆด้วยกระบวนการแบบขึ้น

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างการออกซิเดชันด้วยความร้อน มีดังต่อไปนี้

1. การลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติก่อนการสร้างออกไซด์
2. ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าให้แห้งด้วย N_2
3. ปรับอุณหภูมิเตาแพร่ให้คงที่ (อุณหภูมิตามต้องการ)
4. นำแผ่นผลึกซิงก์อนวางบน Boat แล้วนำไปวางที่ปากท่อควอทซ์ 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับบริการงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นาเป็ใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ดัน Boat เข้าไปในส่วนกลางท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที
6. ทำการออกซิเดชันตามวิธีที่ต้องการ
7. ดึง Boat ออกจากท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที
8. ทิ้งแผ่นผลึกไว้ปากท่อควอทซ์ 5 นาที

หลังจากกระบวนการออกซิเดชันแล้ว จะได้ชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ปกคลุมทั้งด้านหน้า และด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิกอน ต่อจากนั้นทำการเปิดช่องซิลิกอน ไดออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ ในบริเวณที่ต้องการ

4.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



รูปที่ 4.6 ขั้นตอนกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี

ภายหลังการออกซิเดชันแผ่นผลึกซิลิกอนแล้ว ชั้นของ SiO_2 จะเคลือบผิวซิลิกอนทั้งหมด เพื่อป้องกันการแผ่สารเจือเข้าไปในเนื้อซิลิกอน ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ จึงมีการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จำเป็นต้องเปิดช่องออกไซด์ออก ซึ่งเรียกว่ากระบวนการทางแสง (Photolithography) โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการเปิดชั้นออกไซด์หลายครั้ง กระบวนการโฟโตลิโกราฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากมาสก์ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานของขบวนการนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.6

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโกราฟีต้องการห้องสะอาดสำหรับปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิกอน ในขั้นตอนน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับขบวนการโฟโตลิโกราฟี โดยขั้นตอนของโฟโตลิโกราฟีเริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิกอนซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านลวดลายกระจกต้นแบบที่เรียกว่าโฟโตมาสก์ (Photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นกระจกต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจกซึ่งได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์จะสามารถทะลุผ่านได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาแสงที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนยังคงเหลืออยู่บนผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกกัด หลังจากนั้นเมื่อชั้นน้ำยาไวแสงถูกลอกออกก็จะปรากฏภาพหรือลวดลายของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเหมือนลวดลายบนกระจกต้นแบบ การเกิดลวดลายได้ก็เพราะชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บางส่วนถูกกัดออกไปนั่นเอง

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโกราฟี มีดังต่อไปนี้

1. อบแผ่นผลึกในเตาอบความร้อน อุณหภูมิ 100 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง
2. ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่อง Spinner ที่ 3000 rpm สำหรับ AZ1350J ประมาณ 30 นาที
3. Prebake ด้วยการอบแผ่นในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 °C ประมาณ 30 นาที
4. นำแผ่นไปทำการ Mask Alignment และฉายแสง (Expose) ประมาณ 7 วินาที
5. Development ของ AZ1350J ให้จุ่มลงใน Developer I และ II อย่างละ 1 นาทีแล้วล้างด้วยน้ำ DI
6. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
7. Postbake ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 °C นานประมาณ 20 นาที แล้วนำออกมาเคลือบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารไวแสงด้านหลังเพื่อป้องกันการกัดออกไซด์ด้านหลังด้วยAZ1350J จากนั้นอบ
ต่ออีก 10 นาที

8. Etching ด้วย Buffer (HF : NH_4F = 1 : 6) ซึ่งมีอัตราการกัดประมาณ $1000 \text{ }^\circ\text{A}$ ต่อ
นาที จนกระทั่งชั้นออกไซด์ถูกกัดออกจนหมด
9. ล้างด้วยน้ำ DI แล้ว เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10. ล้าง AZ1350J ออกโดยจุ่มลงใน Acetone แล้วล้างด้วยน้ำ DI
11. ล้างน้ำ DI 10 นาที 2-3 ครั้ง
12. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

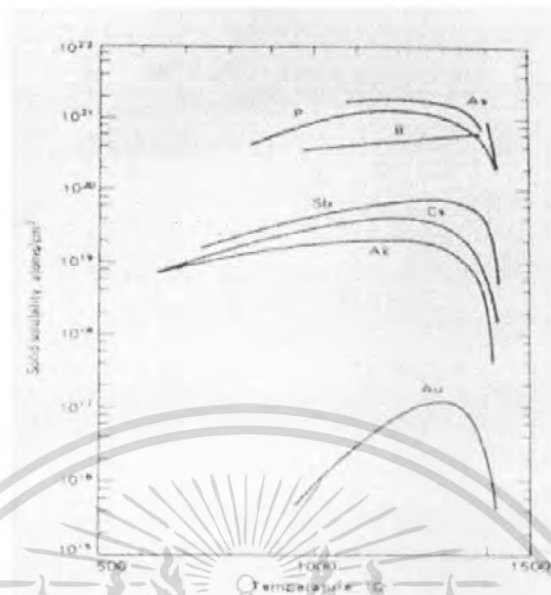
4.1.3 กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นกระบวนการแพร่สารเจือลงในแผ่นฐานรอง ด้วยวิธีการแพร่
ด้วยอุณหภูมิที่สูง ทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ(source) เคลื่อนที่ไปยังแผ่นผลึกฐานรอง และถ้า
ความเข้มข้นอะตอมของสารเจือสูงกว่าของแผ่นฐานรอง ทำให้เกิดรอยต่อพี-เอ็นขึ้น
ขั้นตอนของการแพร่สารเจือ ทำโดยการกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศ
ของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือ โบรอน(Boron source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และใช้
ฟอสฟอรัสในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปยังบรรยากาศของสารเจือ
อะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นฐานรอง และแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรองความเข้มข้นของ
บรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิ ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่มีอิทธิพลต่อความลึกและ
ความเข้มข้นของการแพร่ สำหรับเทคนิคการแพร่สารเจือกระทำสองขั้นตอน ทั้งนี้เพื่อความง่ายต่อ
การควบคุม และแก้ไขให้การกระจายของสารเจือเป็นไปตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยที่

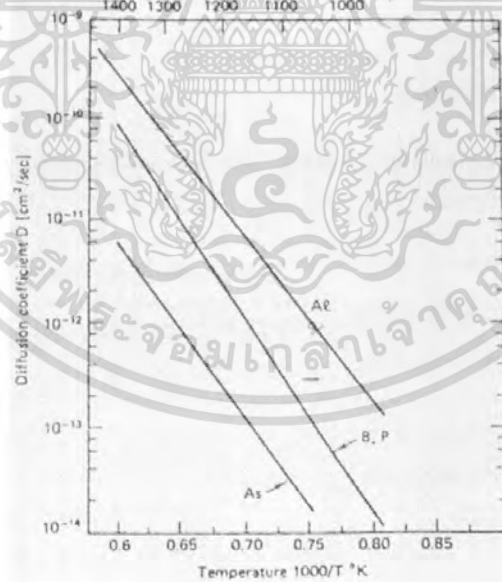
ขั้นที่ 1 การแพร่สารเจือขั้นต้น (Pre – deposition)

กระบวนการ pre-deposition การกระทำโดยการแพร่สารเจือ โดยเงื่อนไขที่ว่าปริมาณ
จำนวนอะตอมของสารเจือที่ผิวมีค่าคงที่ตลอดไปไม่จำกัด การแพร่ขั้นนี้ทำในช่วงสั้นๆและ
อุณหภูมิไม่สูงนักราว $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ การแพร่สารเจือขั้นต้นในอุณหภูมิสูง เป็นการควบคุมปริมาณ
สารเจือ โดยการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพร่สารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณ
สารเจือสูงสุดในการแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการ
การแพร่เข้าไปในของแข็ง (solid solubility) และปริมาณสารเจือที่ผิวผลึกฐานรอง จะเรียกว่า ความ
เข้มข้นผิว (surface concentration: N_s) โดยความสัมพันธ์ของค่า solid solubility กับอุณหภูมิในการ
แพร่ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



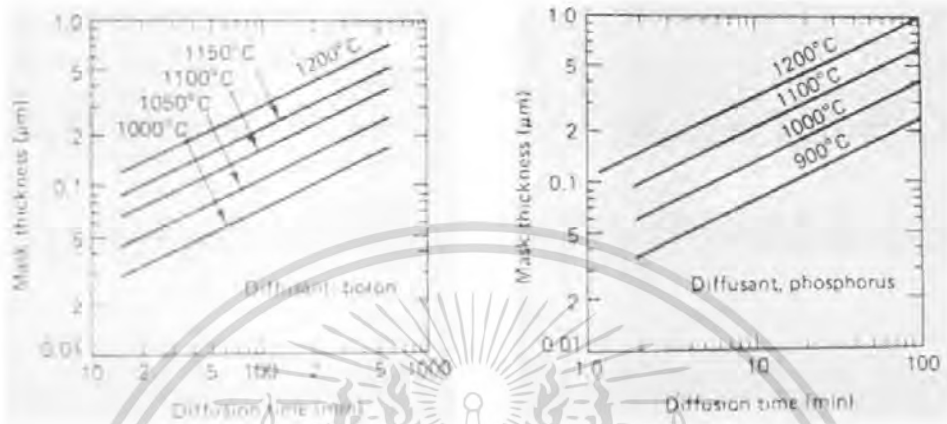
รูปที่ 4.7 ค่า Solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิกอน



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ

สำหรับความสามารถแพร่กับสารเจือ เช่น As, P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิกอน ดังนั้นชั้นซิลิกอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน้ากาก เพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของผลึกฐานรอง โดยความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ใช้พิจารณาจากอุณหภูมิ เวลา และสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความหนาของชั้น SiO_2 ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส

การกระจายอะตอมสารเจือในผลึกฐานรองซิลิกอน แสดงดังสมการ 4.3

$$N(x,t) = N_s \operatorname{erfc}\left(x / \sqrt{4D_p t_p}\right) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (4.3)$$

ซึ่ง N_s คือ ความเข้มข้นที่ผิว (cm^{-3})

x คือ ระยะลึกของการแพร่สารเจือจากผิว (cm)

D_p คือ ความสามารถในการแพร่ที่อุณหภูมิการแพร่ขึ้นต้น (cm^2/sec)

t_p คือ เวลาที่ใช้ในการแพร่ขึ้นต้น (sec)

การหาค่าความเข้มข้น $N(x,t)$ ที่ความลึก x ภายหลังจากการแพร่ขึ้นต้นเป็นเวลา t_p ต้องแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (4.3) สิ่งที่สำคัญ 2 ประการในการแพร่ขึ้นต้น คือ ความลึกรอยต่อพี-เอ็น (X_j) ที่ได้จากการแพร่ขึ้นต้น และจำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด (Q) ภายหลังจากการแพร่ ซึ่ง

$$Q = \left(N_s \sqrt{4D_p t_p}\right) / \pi \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (4.4)$$

ขั้นที่ 2 เรียกว่า กระบวนการ Drive in

ในขั้นนี้จะดอมสารเจือที่ผิวจะถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด(คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิกอน เนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1) การแพร่ขั้นนี้ทำที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรกราว 1200°C และสามารถควบคุมการกระจาย และความลึกในการแพร่ของสาร โดยควบคุมเวลาในการแพร่ นอกจากนี้ขณะที่เอกลทำการแพร่ก็จะทำการออกซิเดชันไปพร้อมๆกัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดชั้นออกไซด์เคลือบที่ผิวนอกสุด การคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของแผ่นผลึก ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือออกมาจากแผ่นผลึก (out diffusion) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิกอน แสดงได้ดังสมการ

$$N(x,t) = \left(Q / \sqrt{\pi D_d t_d} \right) \exp(-x^2 / 4 D_d t_d) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (4.5)$$

ซึ่ง Q คือ จำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด (cm^{-2})

D_d คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในการจับลึก (cm^2/sec)

t_d คือ เวลาที่ใช้ในการจับลึก (sec)

ความลึกรอยต่อ ภายหลังจากทำการจับลึก โดยให้ $N(x,t) = N_B$ จะได้

$$X_j = \sqrt{4 D_d t_d \ln \left[Q / (N_B \sqrt{\pi D_d t_d}) \right]} \quad (\text{cm}) \quad (4.6)$$

การคำนวณ โดยอาศัยสมการการแพร่ จำเป็นต้องพิจารณาและเลือกใช้ให้ถูกต้อง ในกรณีการแพร่ชั้นที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตต่างๆเป็นไปตาม The complementary Error Function distribution การคำนวณหาการกระจายของอะตอมสารเจือ และในกรณีการแพร่ชั้นที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตเป็นไปตามลักษณะของ Gaussian Distribution

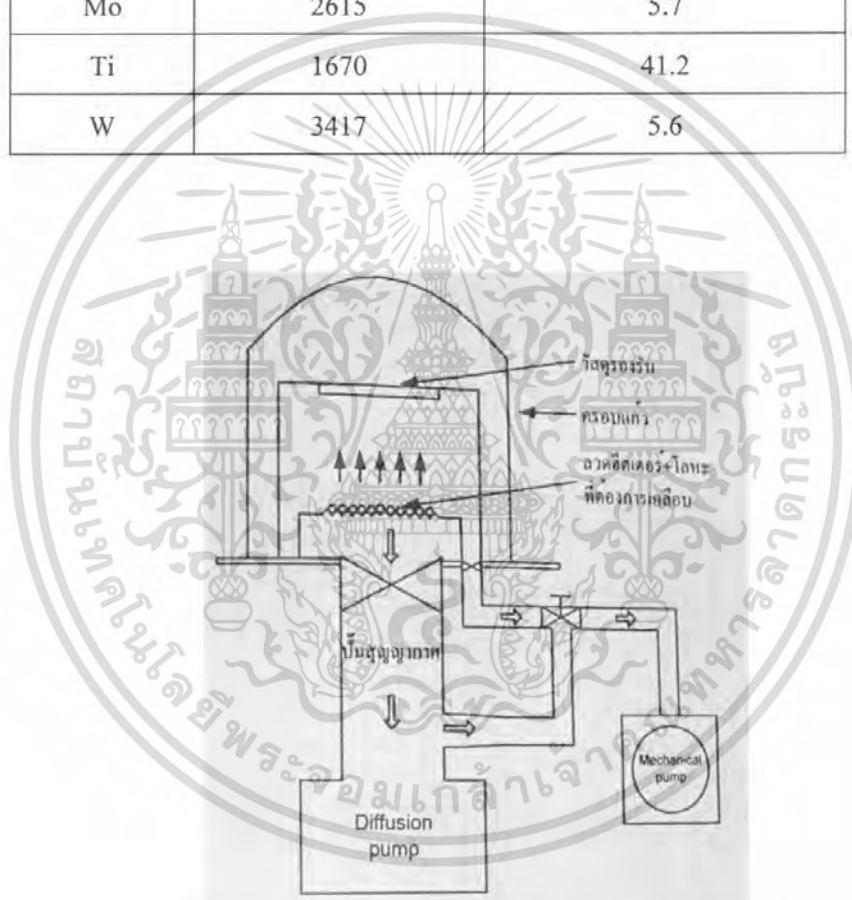
4.1.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน

ภายหลังจากสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนตามลำดับขั้นตอนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้จะคงแยกกันอยู่ในสภาพที่ยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์เข้าด้วยกันตามรูปแบบโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ตามหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนการเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์ด้วยโลหะเรียกว่า กระบวนการเมทัลไลเซชัน ซึ่งกระบวนการนี้สามารถสร้างรอยต่อ โอห์มมิก (Ohmic contact) ซึ่งเป็นแถบโลหะที่ใช้ในการต่อขั้วไฟฟ้า

สำหรับการเลือก โลหะที่ใช้เคลือบบนแผ่นซิลิกอน เพื่อให้เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิกหรือ แถบความนำต่อเชื่อมภายใน (Interconnector) ของวงจรรวม ควรมีคุณสมบัติ เช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิกอนมีค่าความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวซิลิกอนได้ออกไซด์ และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำภายนอกได้ดี ซึ่ง โลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al), ทอง (Au) และเงิน (Ag) เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 จุดหลอมเหลว (Melting Points) และสภาพความต้านทาน (Resistivities)

โลหะ	จุดหลอมเหลว ($^{\circ}\text{C}$)	สภาพความต้านทาน ($\mu\Omega - \text{cm}$)
Al	660	2.7
Cr	1878	12
Mo	2615	5.7
Ti	1670	41.2
W	3417	5.6



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เทคนิคในกระบวนการเมตลไลเซชัน ใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศ ซึ่งมีเทคนิคหลายอย่างด้วยกัน แต่ในงานนี้ใช้เทคนิคการระเหิดด้วยไส้ความร้อน (Filament Evaporation) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออน

กระบวนการเมตลไลเซชันในระบบสุญญากาศ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 Chamber ที่ได้แสดงไว้เป็นกรอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ (Bell Jar) การเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ โดยใช้เอกสตรอนเป็นสื่อเคลือบฟิล์มและฟิล์มเคลือบจะเกาะติดกับพื้นผิวของชิ้นงานการคำนวณว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Filament Evaporation เมื่อใส่ถูกทำให้ร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยขณะทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านไส้เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอพุ่งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิกอนที่วางในChamber

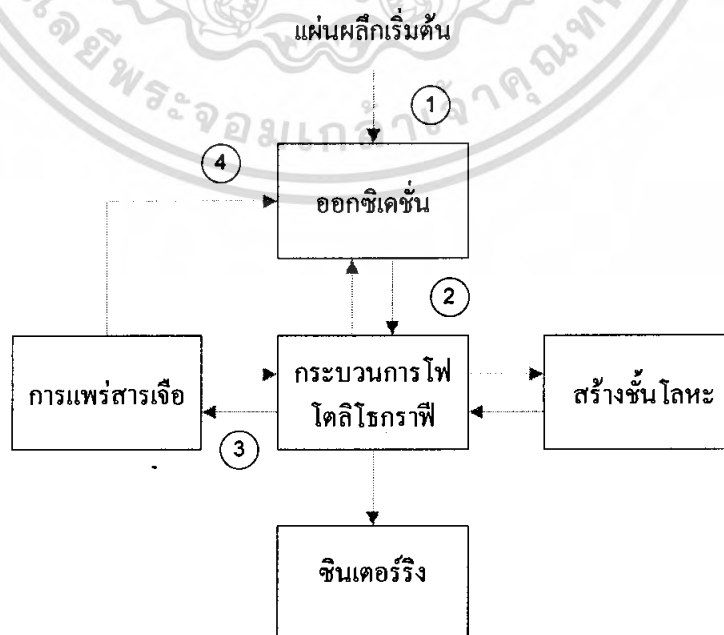
4.1.5 กระบวนการซินเตอร์ริง

หลังจากทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียม และทำการโฟโตลิโธกราฟีแล้วอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำ และก่อให้เกิดรอยสัมผัส โอห์มมิกแคโรยสัมผัสนี้อาจจะไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นกระบวนการอัลลอยจะช่วยให้อายุต่อสัมผัสระหว่างโลหะอะลูมิเนียมและซิลิกอนเป็นรอยต่อที่สมบูรณ์ การอัลลอยจะทำในเตาแพร่สารที่ตั้งอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง $450 - 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาประมาณ 10 - 30 นาที ถ้าในขณะอัลลอยปล่อยก๊าซซึ่งมีไฮโดรเจนรวมอยู่ด้วยเข้าไป เรียกว่า การซินเตอร์ริง เป็นเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดี และไม่เปลี่ยนแปลงต่อสภาพแวดล้อม

4.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

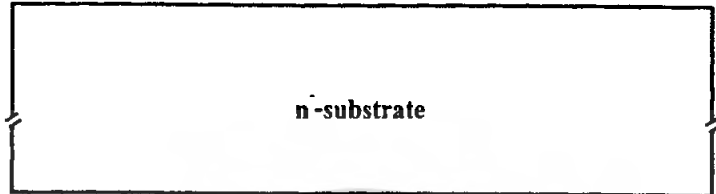
4.2.1 กระบวนการสร้างซิลิกอนโฟโตไดโอดเทคนิคPIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

4.2.1.1 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรองของโฟโตไดโอดได้แก่ แผ่นผลึกฐานรองซิลิกอนชนิดเอ็น-รिनซิก(i-type) ที่มีสภาพความต้านทาน $2000 \Omega \cdot cm$ ระบาย (111) หนาประมาณ 650 ไมโครเมตร



การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิกอนเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละออง เศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็น

การทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนครั้งแรก

- อัลตราโซนิก (Ultrasonic) ในน้ำ DI (de-ionization water : DI) เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- ดั้มในกรดไนตริก (HNO_3) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- ดั้มในน้ำ DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ดั้มในน้ำ DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ดั้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เวลา 10 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลอกออกไซด์(slice etching) ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 10% เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

1. ออกซิเดชัน (Oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิกอนด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์นี้เป็นหน้ากปกป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ ใช้อุณหภูมิเตา $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ อุณหภูมิน้ำ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ได้ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 7000 \AA

Oxidation

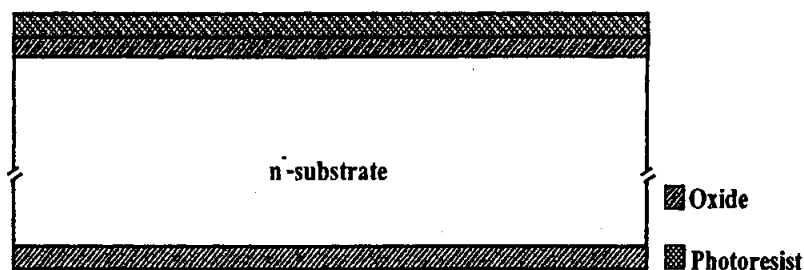
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง



2. การลอกชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ บริเวณด้านหลังแผ่นเพื่อสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+ -layer) ของโฟโตไดโอด

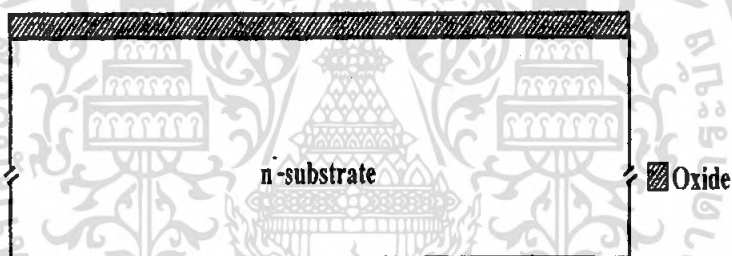
- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 30 นาที
- ทาหน้ายาไวแสงชนิดบวก (AZP 1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (oxide etching)

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation อัตราส่วน 47% : $6\text{NH}_4\text{F}$)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2

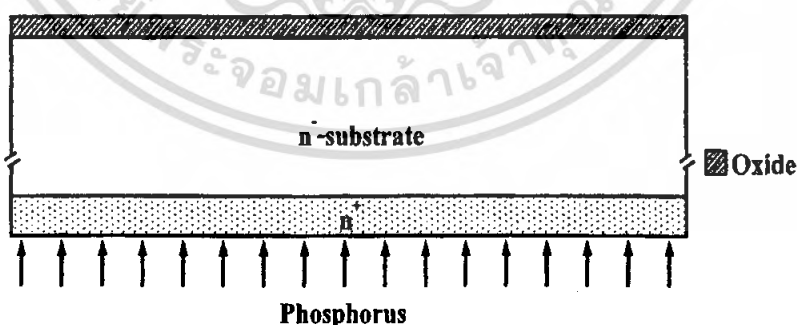
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติก่อนทำการแพร่สารเจือ
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3. การสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+ layer) ของโพลีไดโอดโดยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นสูง

กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่ความเร็ว 3000 rpm เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ $150^\circ C$ เวลา 10 นาที
- Phosphorus pre-deposition ที่ $1000^\circ C$ N_2 10000 cc./min. เวลา 30 นาที
การลอกออกไซด์เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือฟอสฟอรัสที่ผิวหน้า
- จุ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับฟอสฟอรัส (HF for Phosphorus) 10%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์หน้าบริเวณด้านหน้าออกเตรียมการสร้างออกไซด์ชั้นใหม่พร้อมกับการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for phosphorus อัตราส่วน $HF47\% : 6NH_4F$)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1

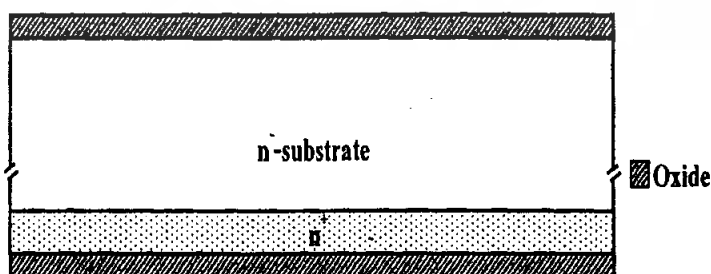
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
 - การทำความสะอาดผิวหน้า
- ดั้มในไตรคลอโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิกในอะซีโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
 - การลอกชั้นออกไซด์เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนการสร้างออกไซด์
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

4. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นหน้ากปกป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือปนในขณะสร้างรอยต่อพี-เอ็นและการขัปลีกอะตอมฟอสฟอรัสด้านหลังไปในตัว ใช้ อุณหภูมิเตา $1000^\circ C$ อุณหภูมิน้ำ $90^\circ C$ ได้ความหนาของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ประมาณ 7000 \AA

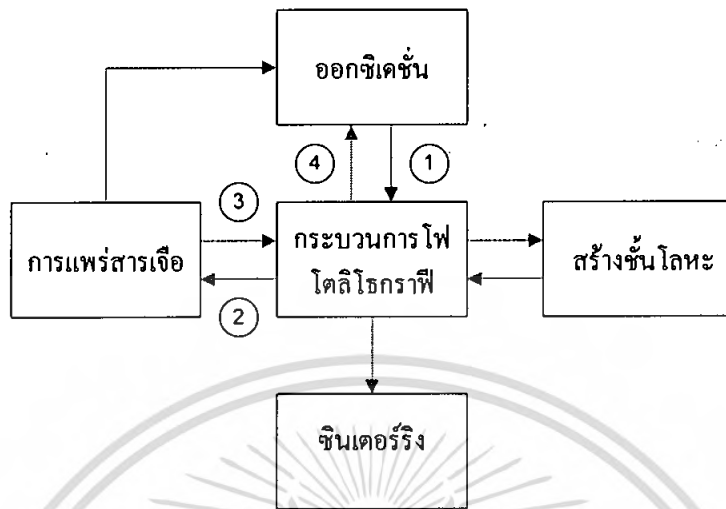
Oxidation

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1000 cc./min. เวลา 3 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1200 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

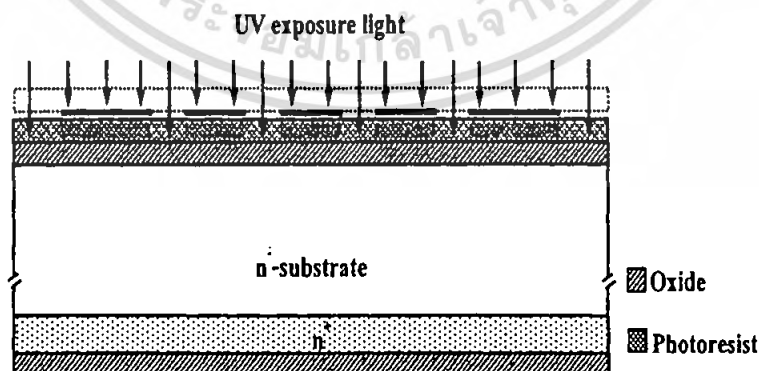
4.2.1.2 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นพีที่เข้มข้น



1. การเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ เป็นการเปิดชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอดด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี(Photolithography) หรือ โฟโตเอทซิงค์ โดยใช้มาสก์ชั้นที่ 1 เรียกว่า p^+ - region Mask

Photolithography Mask # 1 (p^+ - region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZP1350) ที่ความเร็ว 3000rpm เวลา 40 นาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง (Alignment expose)



Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

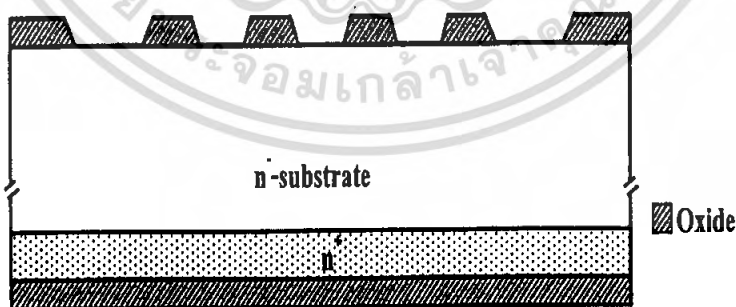
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ เวลา 30 นาที

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับการแพร่สารเจือ

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation อัตราส่วน $HF47\% : 6NH_4F$)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
การลอกชั้นออกไซด์เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนการสร้างรอยต่อพี-เอ็น
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 10% เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

2. การสร้างรอยต่อพี-เอ็น ที่เป็นพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด โดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน เข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดเอ็น ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตร

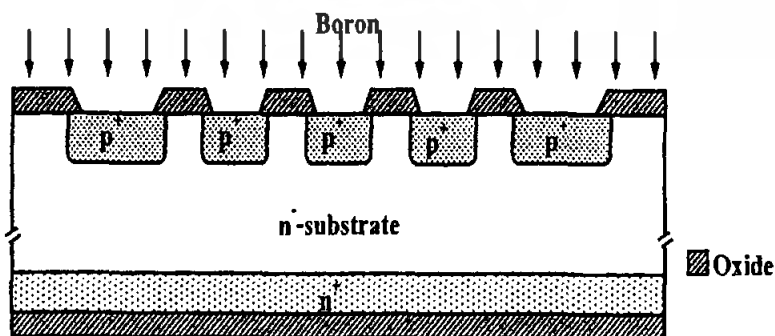
กระบวนการ Pre-deposition

- หยอดสารละลายอะตอมสารเจือโบรอนที่ความเร็ว 3000 รอบต่อนาที เวลา 20 นาที
- อบสารละลายที่ $150^\circ C$ เวลา 10 นาที
- Boron pre-deposition ที่ $1000^\circ C$ N_2 1000 cc./min. เวลา 30 นาที

การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือโบรอนที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับโบรอน 10%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

กระบวนการ Drive-in เพื่อขับให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็น

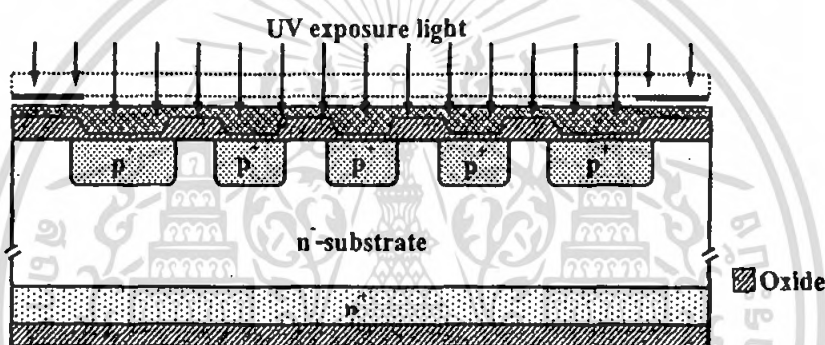


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การเปิดชั้นออกไซด์ เป็นการลอกชั้นของซิลิกอน ไดออกไซด์ของรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์ซิมที่ 2 เรียกว่า Oxide Mask

Photolithography Mask # 2 (Oxide)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZP1350) ที่ความเร็ว 3000rpm เวลา 40 นาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง (Alignment expose)



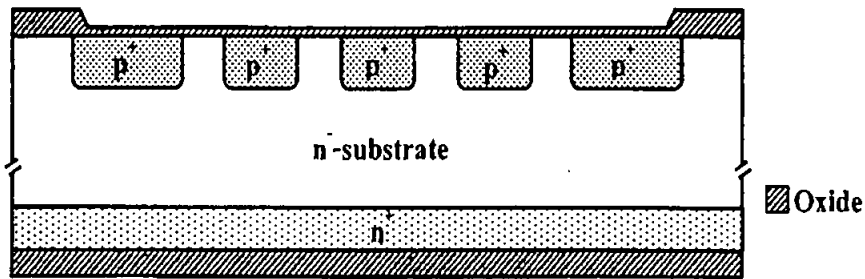
Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที (Post bake)

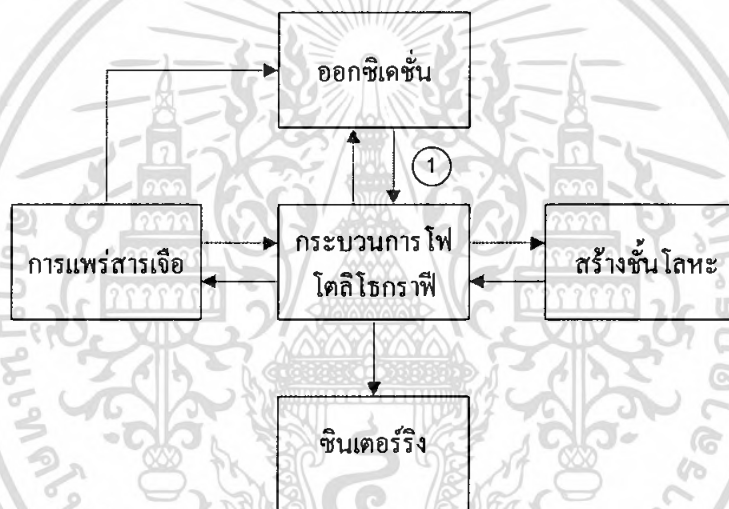
4. การสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เป็นขั้นตอนการสะท้อนแสง ซึ่งชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีความหนาประมาณ 1000 \AA

- Oxidation ที่ 1000°C O_2 1200 cc./min., O_2 1000 cc./min. (Wet)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



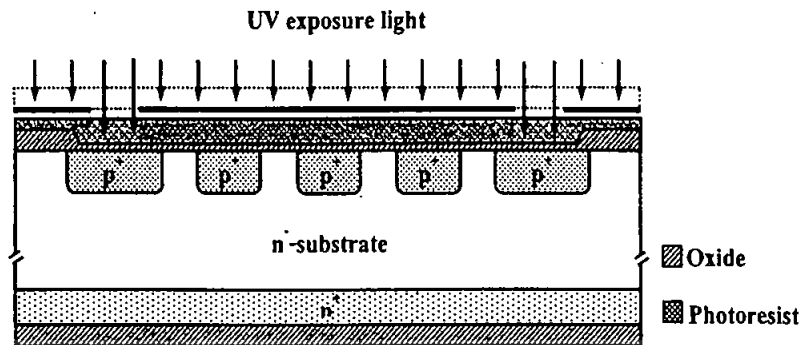
4.2.1.3 กระบวนการเปิดช่องซิลิกอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส



1. การเปิดช่องออกไซด์ เป็นการเปิดชั้นของซิลิกอนไดออกไซด์ที่เป็นส่วนขั้วสัมผัส (Contact) ของรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด ด้วยกระบวนการโฟโตลิโกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์ชิ้นที่ 3 เรียกว่า Contact Mask

Photolithography Mask # 3 (Contact)

- อบแผ่นไว้ที่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZP1350) ที่ความเร็ว 3000rpm เวลา 40 นาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง (Alignment expose)



Develop ฟิล์ม โดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ เวลา 30 นาที (Post bake)

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ บริเวณด้านหน้าที่มีความหนาประมาณ 1000 \AA และเนื่องจากออกไซด์บริเวณด้านหลังต้องลอกออกเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอยู่แล้วจึงไม่ได้ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหลัง

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for boron อัตราส่วน $HF47\% : 6NH_4F$)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

กระบวนการลอกฟิล์ม

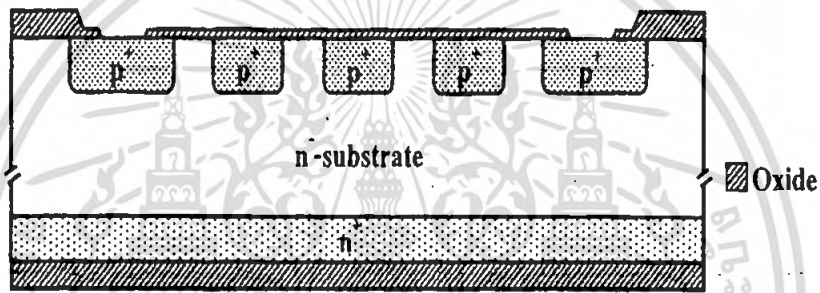
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

การทำความสะอาดผิวหน้า

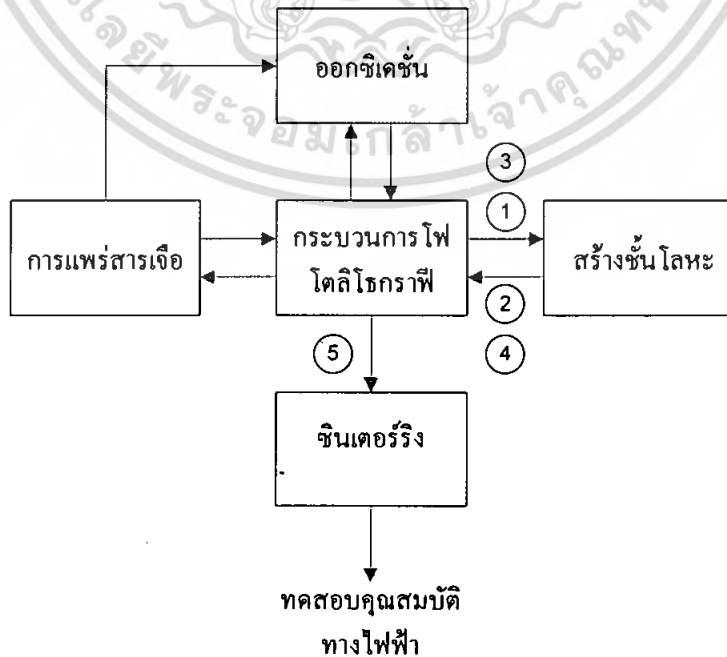
- ดั้มในไตรคลอโรเอทิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)
 - การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติก่อนการเคลือบชั้นโลหะ
- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกสำหรับ โบรอน 10% เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)



4.2.1.4 กระบวนการสร้างฉนวนและขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิก

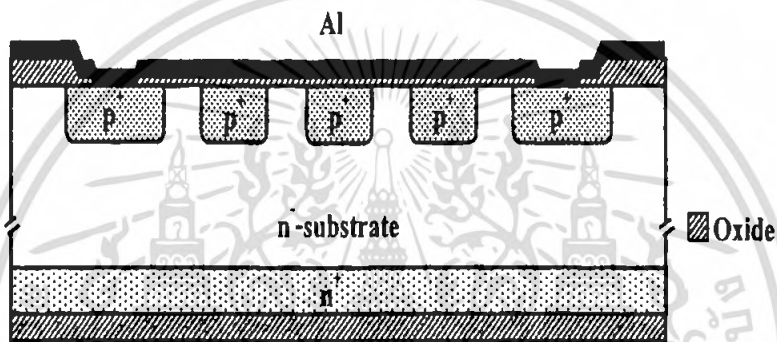


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. การสร้างชั้นโลหะ (Metallization) อะลูมิเนียมชั้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึก ซิลิกอนด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้น ตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นของ โลหะนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ที่มีความหนา ราว 1 ไมโครเมตร เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

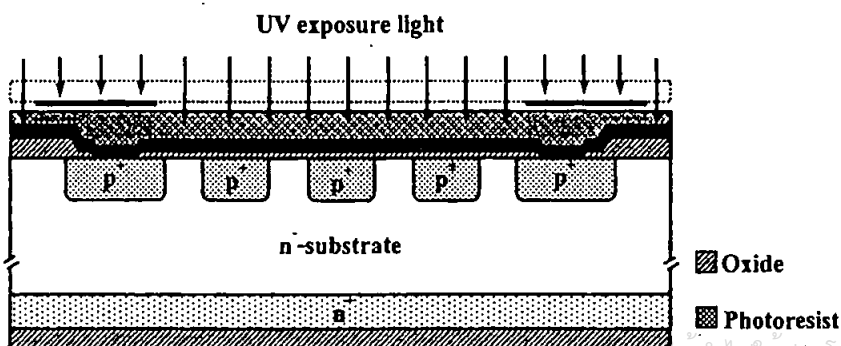
ทำการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



2. การสร้างฉนวนอะลูมิเนียม เป็นการสกัดชั้นอะลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึก ซิลิกอนให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์ สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็น โฟโตมาสก์ชั้นที่ 4 และเรียกว่า Metal Mask

Photolithography Mask # 4 (Metal Mask)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZP1350) ที่ความเร็ว 3000rpm เวลา 40 นาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง (Alignment expose)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ประกอบการเรียนการสอนเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Develop फिल्म โดย

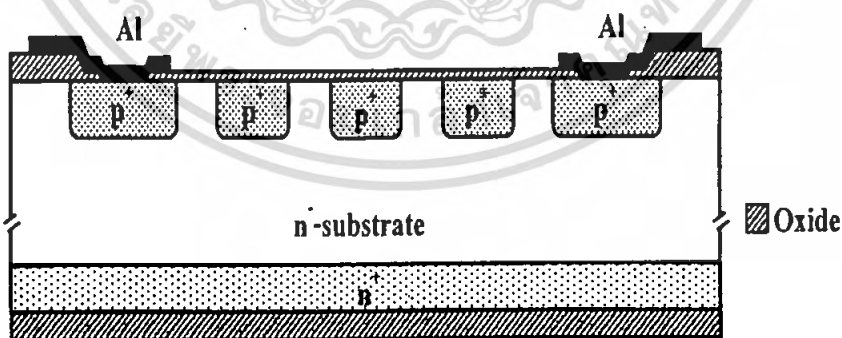
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ เวลา 30 นาที (Post bake)

การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-etching ที่อุณหภูมิประมาณ $40^\circ C$
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)

กระบวนการลอกฟิล์ม

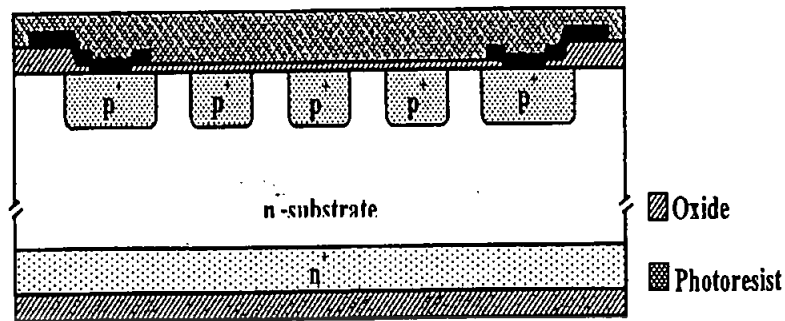
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)



การลอกชั้นออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่นออก เพื่อเตรียมสร้างขั้วสัมผัสด้านหลัง

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ $90^\circ C$ เวลา 30 นาที
- ทาหน้ายาไวแสงชนิดบวก (AZP1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ เวลา 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for boron อัตราส่วน HF47% : 6NH₄F)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

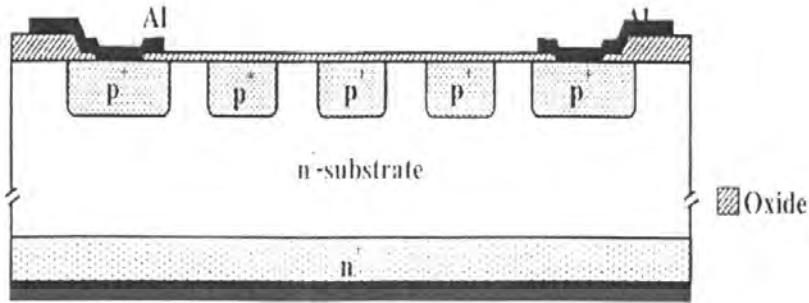
3. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

ทำการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.

4. กระบวนการออกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)

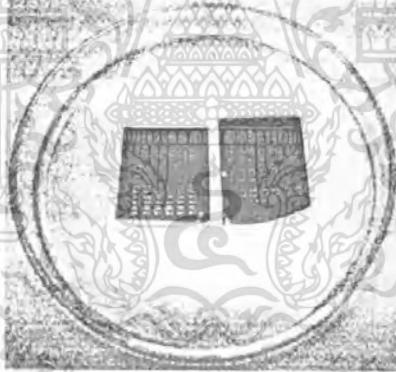
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



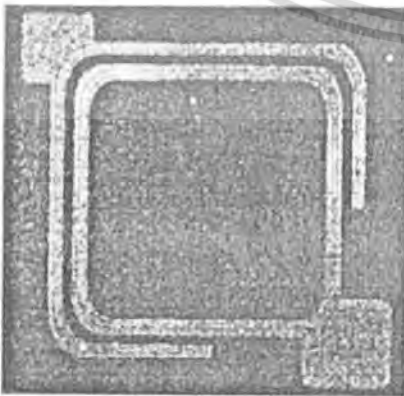
Al

5. กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ เกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic contact) ที่ดี และเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

- Sintering ที่อุณหภูมิ 500 °C N₂ 1000 cc./min. เวลา 12 นาที



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายซีกอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่สร้างเสร็จสมบูรณ์

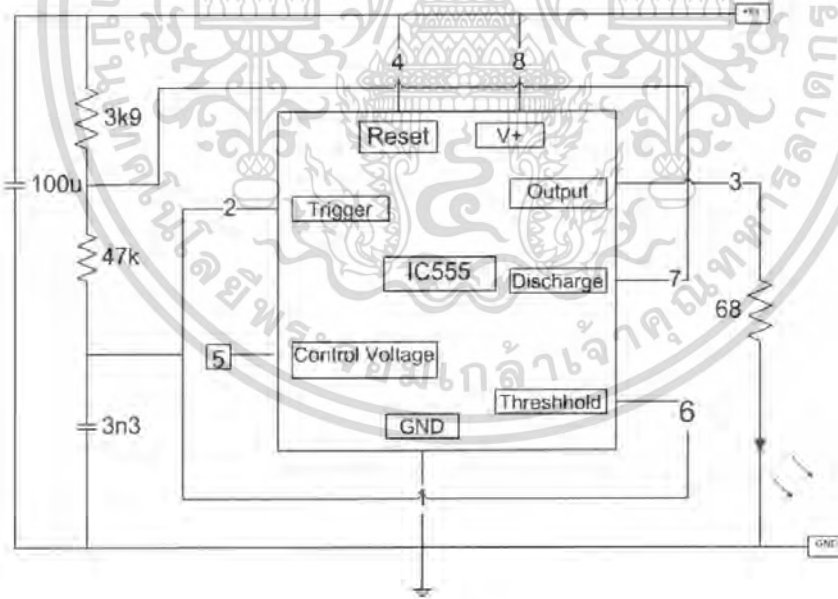
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูตัวอย่างที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาไปจนกว่าจะได้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
(ก) บนแผ่นผลึก (ข) ผิวหน้าอุปกรณ์ขยาย 50 เท่า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

การทดลองและผลการทดลอง

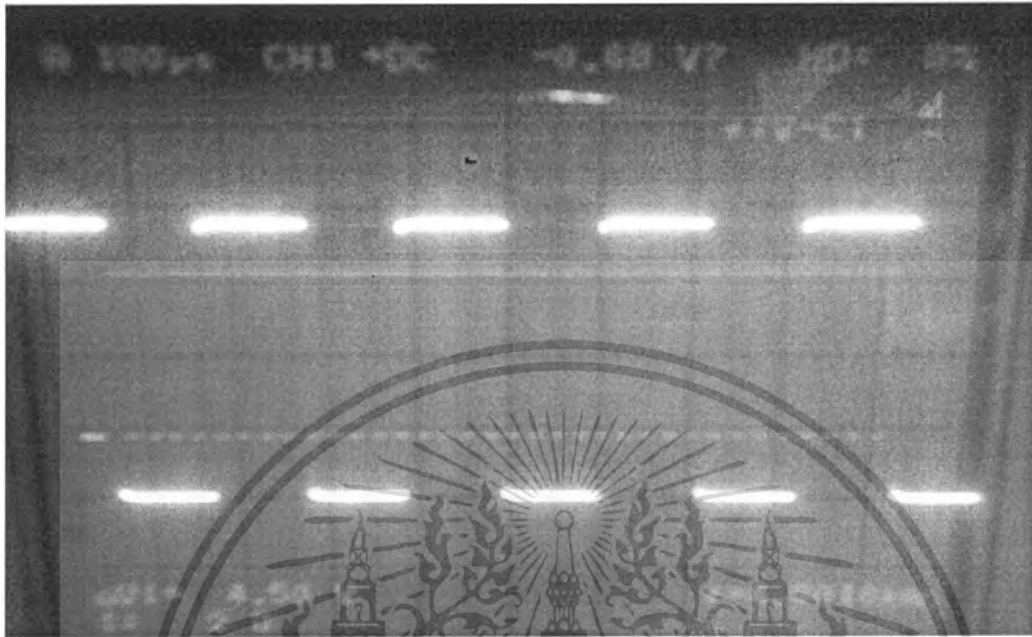
5.1 การทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการอธิบายผลการทดลองของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง กล่าวถึงการศึกษาลักษณะซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีพื้นที่รับแสงเป็นลักษณะแถบ p+ เล็กๆ หลายแถบ (multi stripe-shaped) ผลการทดลองนำเสนอผลการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดทั้งในขณะที่ไม่ได้รับแสง และได้รับแสง ผลของระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (p stripe-shaped) ผลของความกว้างแถบชนิดพี การวัดสภาพตอบสนองทางแสงเชิงสเปกตรัม ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า และการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของ โฟโตไดโอด

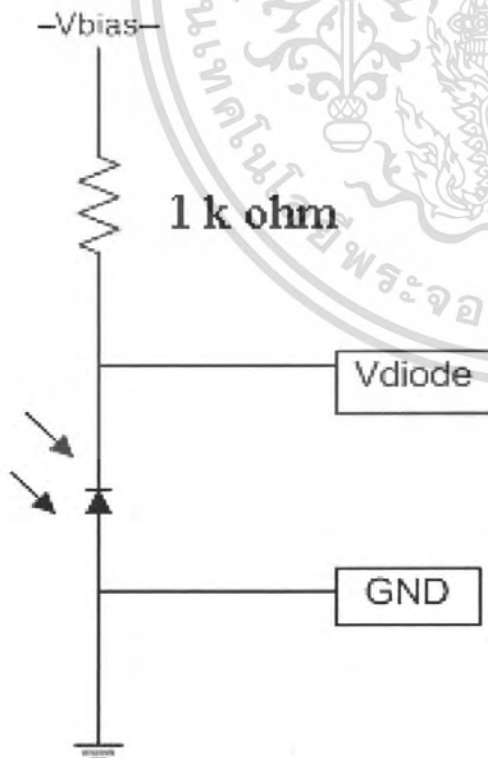


รูป 5.1 วงจรภาคส่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.2 รูปสัญญาณจากวงจรภาคส่ง



รูปที่ 5.3 วงจรภาครับ

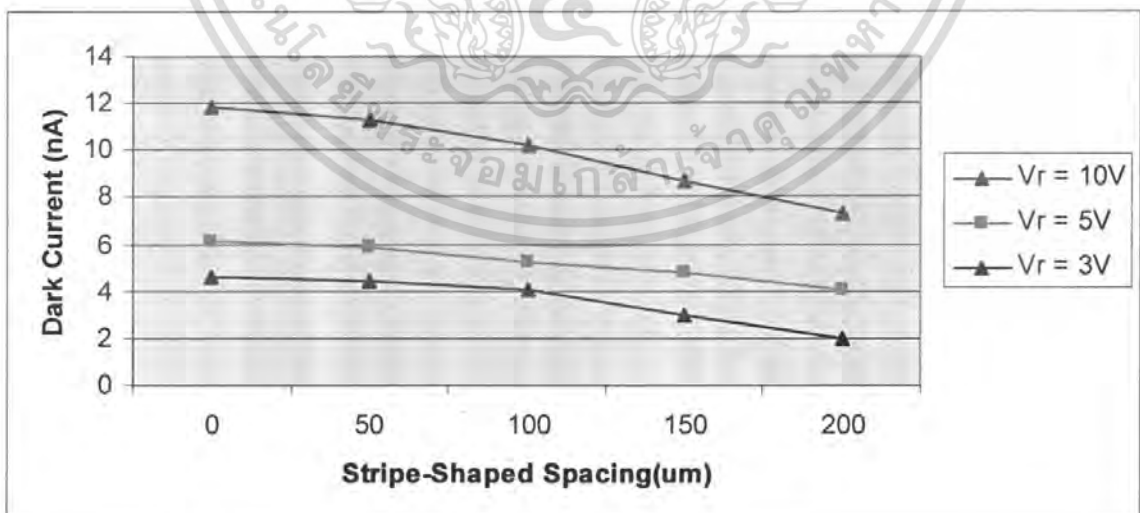
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของความกว้างแถบชนิดพี ต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของโฟโตไดโอด โฟโตไดโอดทุกตัวถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด $1.5 * 1.5 \text{ mm}^2$ เท่ากัน และชั้นรับแสงมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบนั้นมีระยะห่างแถบชนิดพี (s) เท่ากับ

- 1.Stripe1 มีค่า $S = 50 \text{ um}$, $W = 20 \text{ um}$
- 2.Stripe2 มีค่า $S = 100 \text{ um}$, $W = 20 \text{ um}$
- 3.Stripe3 มีค่า $S = 150 \text{ um}$, $W = 20 \text{ um}$
- 4.Stripe4 มีค่า $S = 200 \text{ um}$, $W = 20 \text{ um}$

ระหว่างกระแสมืด กับ ความกว้างแถบชนิดพี ที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 v . กระแสมืดจะลดลงเมื่อความกว้างแถบชนิดพีเพิ่มขึ้น โดยในเงื่อนไขการทดลองกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดแบบแนวตั้งหลายแถบ ต่ำกว่าแบบแนวตั้งธรรมดา โดยที่ระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีคงที่เท่ากับ 50 um ค่ากระแสมืดมากกว่า กรณีที่มีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี 100 um เนื่องจาก ที่ระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีคงที่เท่ากับ 50 um จะทำให้ได้จำนวนแถบชนิดพีมีมากกว่า พื้นที่รอยต่อจึงมากขึ้นส่งผลให้มีค่ากระแสมืดมากกว่ากรณีที่มีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี 100 um

โดยการทดลองได้เปรียบเทียบทั้งกระแสมืด และกระแสแสง กับซิลิคอนโฟโตชนิด PIN แนวตั้งธรรมดาด้วย (ชั้นหน้าตัวรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ)



รูปที่ 5.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่แรงดันไบอัสต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น คือ การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซีลิกอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง และ ย้อนกลับ ทั้งในขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง เพื่อหาค่ากระแสมืด กระแสแสงของโฟโตไดโอด โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ คือ 1. หลอดทังสเตนขนาด 60 W 2. วงจรภาคส่ง infrared

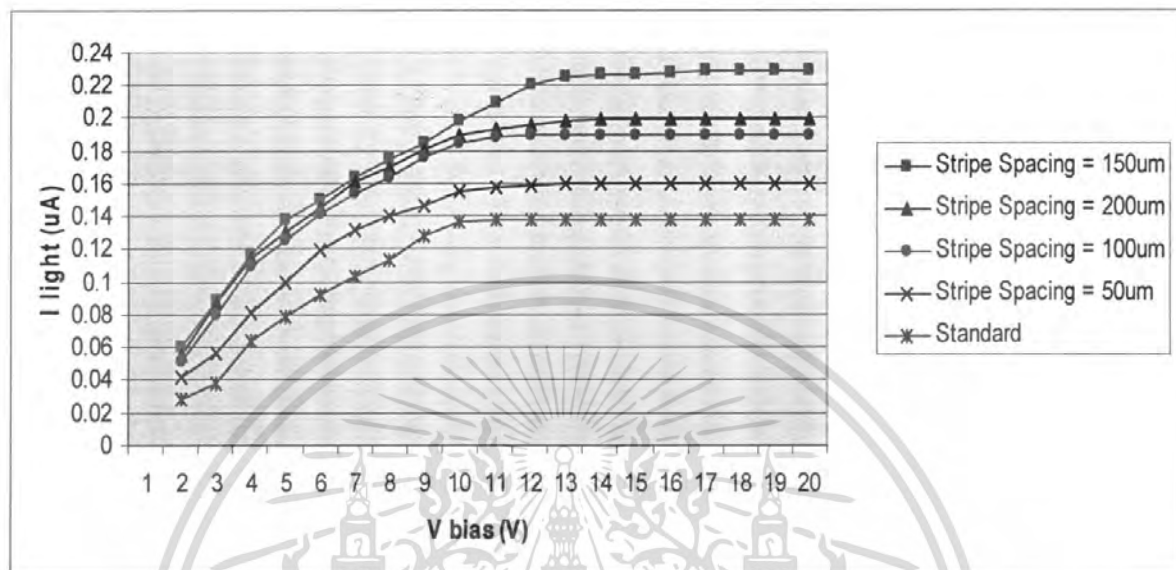
5.2 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์ปรับค่าโดยปรับค่า R

5.2.1 การวัดหาค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความต่างศักย์ไบอัส

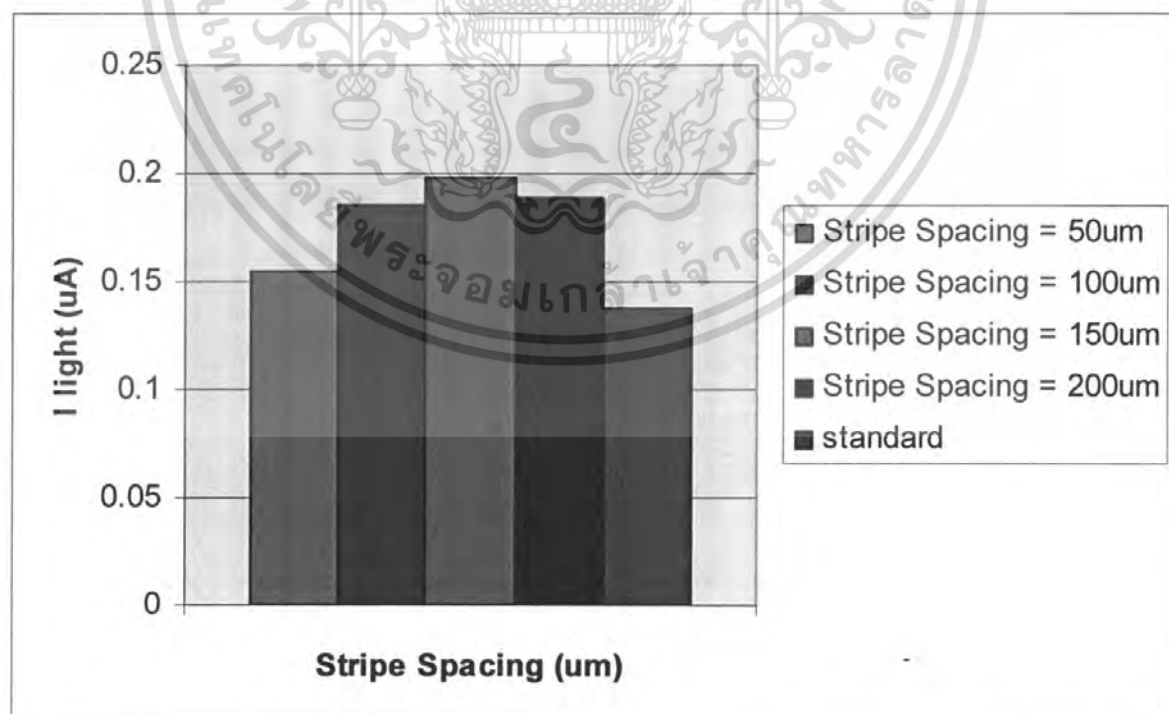
วิธีการทดลองดังนี้

1. เตรียมวงจรภาคส่งดังรูป 6.1 ที่ระยะ 75 cm
2. เตรียมวงจรรับดังรูป 6.2 วัดความต่างศักย์ที่ขาของ Photodiode เทียบกับกราวด์
3. ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ Diode โดยมีการยิงแสงอินฟราเรดที่ระยะ 75 cm. ในห้องมืด เพื่อหาค่า V_{diode}
4. ทำการ bias ค่าความต่างศักย์ที่ DC power supply เป็นค่าคู่ตั้งแต่ 0-20V.
5. นำค่าที่เราทำการ bias มาลบค่า V_{diode} ที่ได้ หาค่า R (1 k) จะได้ I_{diode}
6. ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ Diode โดยไม่มีการยิงแสง อินฟราเรด ในห้องมืด เพื่อหาค่า V_{dark}
7. ทำการ vary ค่าความต่างศักย์ที่ DC power supply เป็นค่าคู่ตั้งแต่ 0-20V.
8. นำค่าที่เราทำการ vary มาลบค่า V_{dark} ที่ได้ หาค่า R (1 k) จะได้ I_{dark}
9. นำค่า $I_{diode} - I_{dark}$ จะได้ค่า I_{light}
10. พล็อตกราฟระหว่างค่า I_{light} กับค่า V_{bias}
11. ทำซ้ำข้อ 1-10 กับ Photodiode ทุกตัว

ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์ปรับค่าโดยปรับค่าIR



รูปที่ 5.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับ ความต่างศักย์ที่ปรับค่าของแต่ละสตริป



รูปที่ 5.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับค่า stripe-spacing ของแต่ละสตริปโดยใช้ IR เปรียบเทียบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

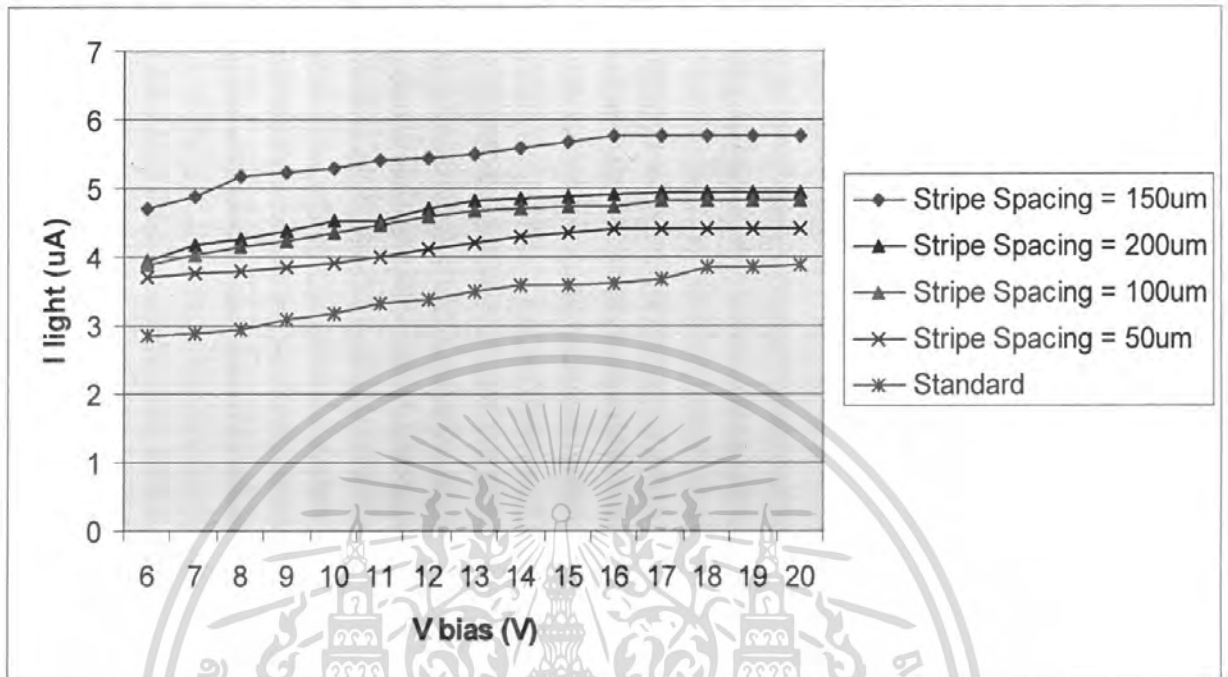
5.3 การหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์โดยปรับค่าความสว่าง

5.3.1 การวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์
วิธีการทดลองดังนี้

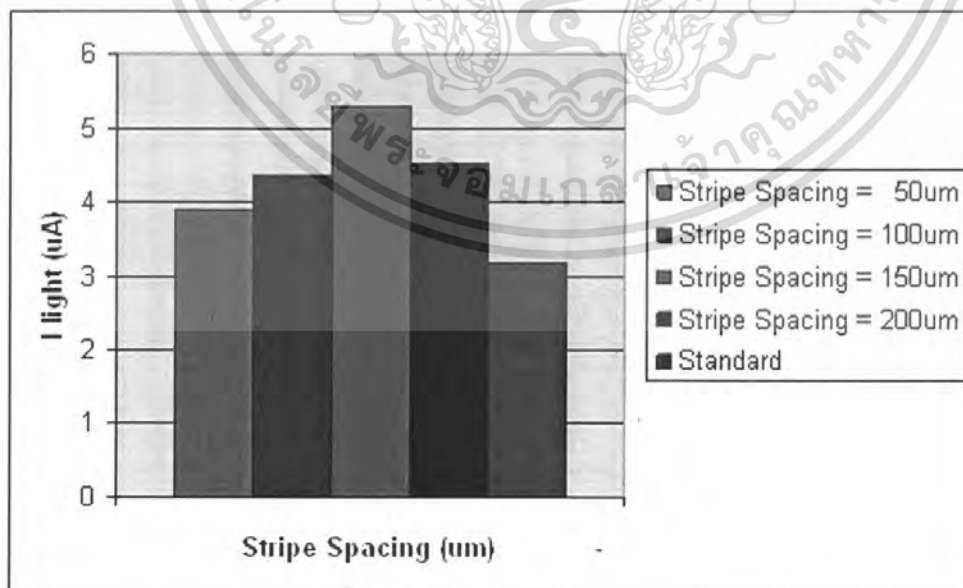
1. ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ Diode โดยมีการเปิดโคมไฟ ที่ระยะ 75 cm. แล้วปรับค่าความสว่าง เพื่อหาค่า V_{diode}
2. ทำการ bias ค่าความต่างศักย์ที่ DC power supply เป็นค่าตั้งแต่ 6-20 V.
3. นำค่าที่เราทำการ bias มาลบค่า V_{diode} ที่ได้ หาค่า $R(1\text{ k})$ จะได้ I_{diode}
4. ทำการวัดค่าความต่างศักย์ที่ Diode โดยไม่มีการเปิดโคมไฟ ในห้องมืด เพื่อหาค่า V_{dark}
5. ทำการ bias ค่าความต่างศักย์ที่ DC power supply เป็นค่าตั้งแต่ 6-20 V.
6. นำค่าที่เราทำการ bias มาลบค่า V_{dark} ที่ได้ หาค่า $R(1\text{ k})$ จะได้ I_{dark}
7. นำค่า $I_{diode} - I_{dark}$ จะ ได้ค่า I_{light}
8. พล็อตกราฟระหว่างค่า I_{light} กับค่า V_{vary}
9. ทำซ้ำข้อ 1-10 กับ Photodiode ทุกตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับค่าความต่างศักย์ปรับค่าโดยปรับค่าความสว่าง



รูปที่ 5.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับค่าความต่างศักย์ของทุกสตริป ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง



รูปที่ 5.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่ากระแส I light กับค่า stripe-spacing ของแต่ละสตริปที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง
เอกสารชิ้นนี้สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 การหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ของแต่ละสตริป

5.4.1 การวัดค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์
มีวิธีการทดลองดังนี้

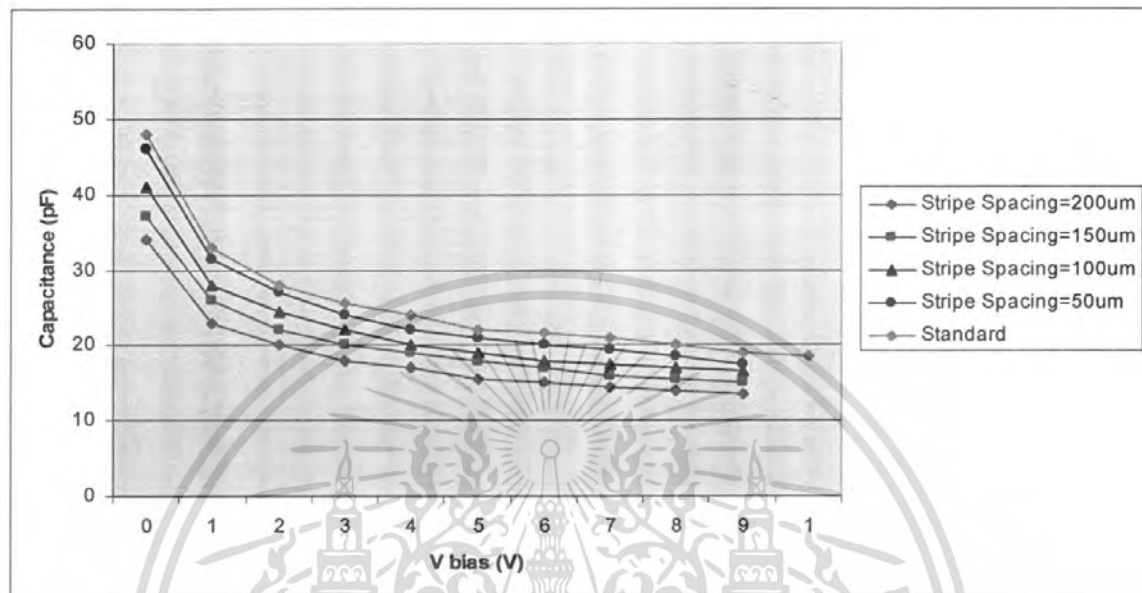
1. ทำการวัดค่าประจุไฟฟ้าของphotodiodeแต่ละสตริปโดยใช้เครื่องวัด R-L-C meter เพื่อศึกษาว่า Photodiode แต่ละตัวมีคุณสมบัติในการทำงานที่ความเร็วสูงได้ดีที่สุด



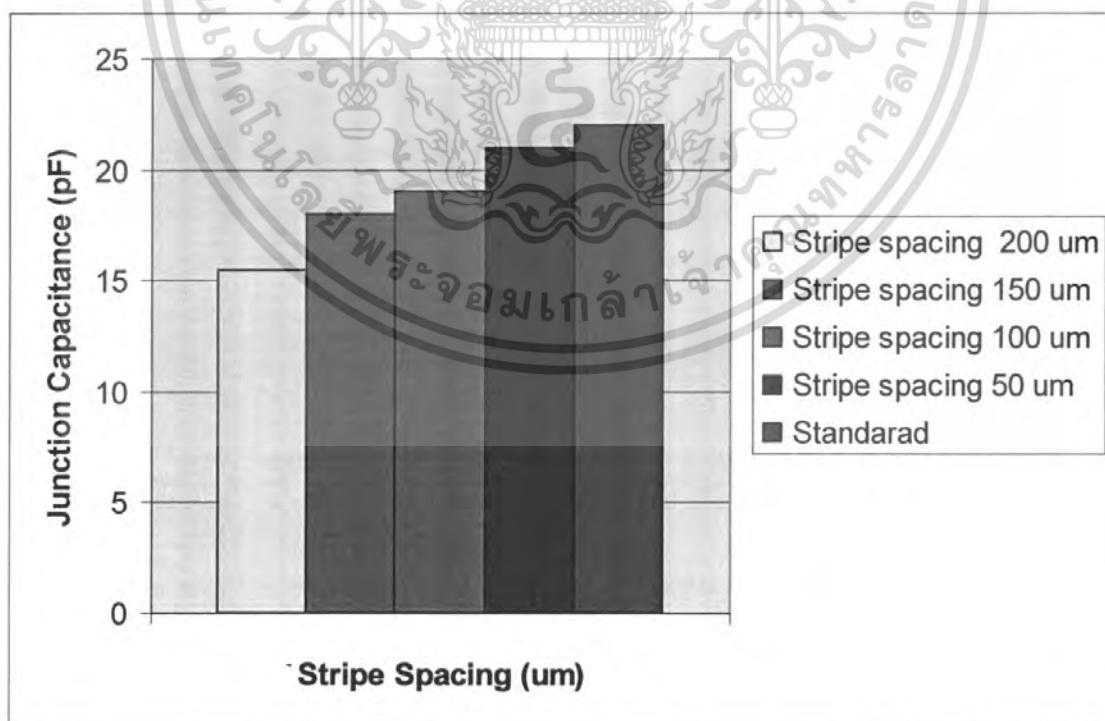
รูปที่ 5.9 เครื่อง R-L-C meter

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ของแต่ละสตริป



รูปที่ 5.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความต่างศักย์ของแต่ละสตริป



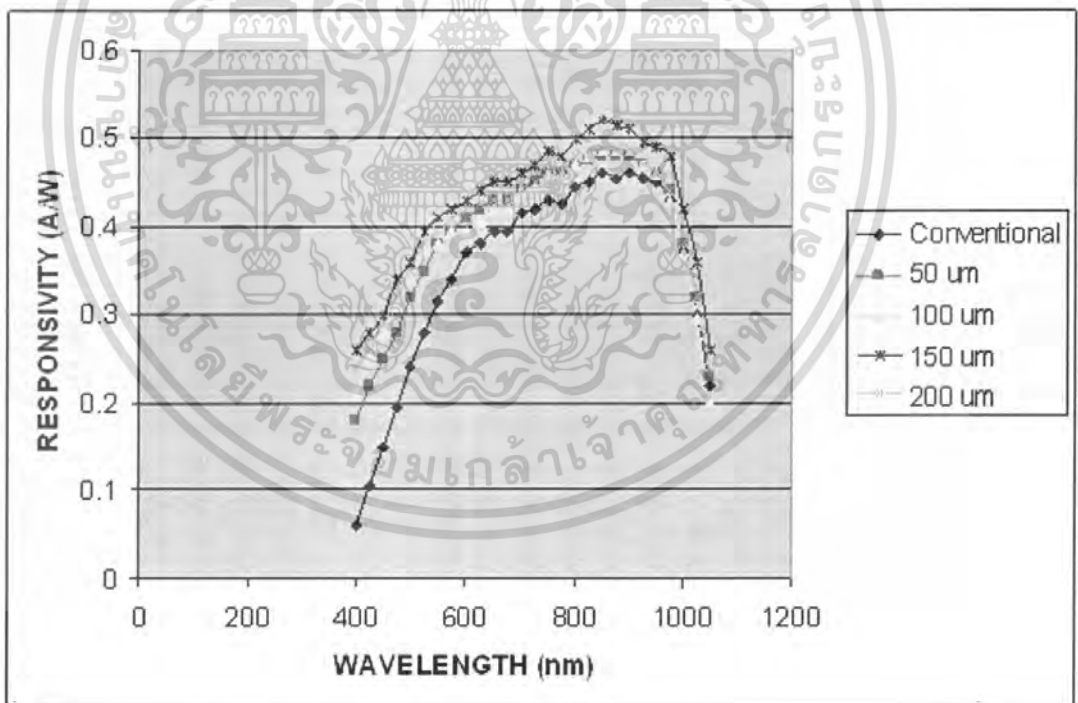
รูปที่ 5.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุไฟฟ้า กับค่า Stripe-spacing ของแต่ละสตริปที่ความ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเฉพาะที่ไปเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.5 การวัดสภาพตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด

เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอด ไดโอดจะถูกนำไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทานทาน $1\text{ k}\Omega$ และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่โฟโตไดโอดหาด้วยวิธีอ้อมจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จากนั้นนำไปหาค่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม แหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ ใช้หลอดทั้งสแตนด์แสงผ่าน monochromator ของ nikon รุ่น G250 เพื่อเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสงโดยความยาวคลื่นแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 400-1050 nm

สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้างธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p+ มีความกว้าง(W)20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ (S)50,100,150 และ 200 μm ตามลำดับ แสดงตามรูป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฟโตไดโอดโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ มีสภาพการตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงกว่า โครงสร้างแบบธรรมดาในทุกความยาวคลื่น โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ สภาพการตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดซึ่งแถบ p+ มีความกว้าง 20um และมีระยะห่างระหว่าง แถบ 150um มีสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงกว่า โครงสร้างแบบธรรมดาเป็นอย่างมาก และ สูงสุดในกลุ่ม

เมื่อเปรียบเทียบสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิดPIN โครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p+ มีความกว้าง(W)20um และมีระยะห่างระหว่างแถบ(S)150um จะเห็นว่า มีสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมในช่วงความยาวคลื่น 400-700nm มีการเพิ่มมากกว่าในความยาวคลื่นช่วง 700-1000nm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 6

สรุปผลการทำงาน

- นำ **photodiode** มาทดสอบกับแสงเพื่อศึกษาว่ามีคุณสมบัติ **photodiode** ที่ดี
- **Photodiode** ชนิดที่มี **stripe** ให้กระแสแสงมากกว่า **photodiode** แบบธรรมดา
- เมื่อพิจารณาที่ **bias** ค่าหนึ่ง **photodiode** ที่มี **stripe spacing** **150 um** จะให้ค่ากระแสแสงมากที่สุด
- **photodiode** ที่มี **stripe spacing** ค่ามาก จะมีความเร็วสูงกว่าตัวที่มีค่าน้อย

บทที่ 7

การนำไปใช้งาน

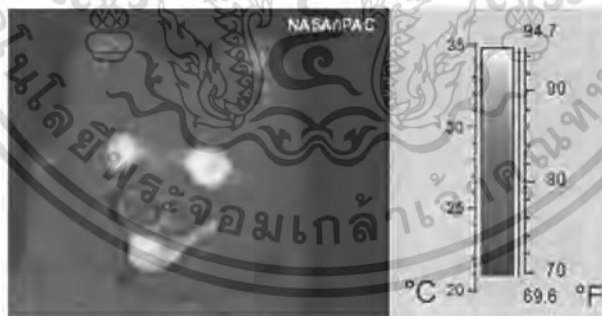
การนำอินฟราเรดไปใช้งานในปัจจุบันนี้มีการเพิ่มสูงขึ้น โดยสามารถแบ่งออกเป็นหัวข้อหลักๆ ได้ดังนี้

7.1 การมองเห็นกลางคืน

อินฟราเรดถูกใช้เป็นเครื่องมือในการมองเห็นตอนกลางคืนเมื่อแสงที่มองเห็นนั้นไม่เพียงพอต่อการมองเห็น เครื่องมือที่ใช้มองกลางคืนทำงานโดยผ่านกระบวนการที่เกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของโฟตอนที่อยู่ในอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งถูกขยายโดยกระบวนการทางเคมีและไฟฟ้า โดยสามารถเปลี่ยนกลับไปยังแสงที่มองเห็นได้ แหล่งกำเนิดแสงอินฟราเรดสามารถถูกทำให้เพิ่มในการมองเห็นซึ่งเป็นการปราศจากแหล่งจ่ายแสงที่มองเห็น

การใช้แสงอินฟราเรดและอุปกรณ์ในการมองกลางคืนไม่ควรสับสนกับภาพอุณหภูมิจึงสร้างภาพขึ้นด้วยความแตกต่างของอุณหภูมิที่ผิว โดยตรวจการแผ่รังสีอินฟราเรด(ความร้อน) ซึ่งไหลออกมาจากวัตถุและสภาพแวดล้อม

7.2 เทอร์โมกราฟี



รูปที่ 7.1 ภาพเทอร์โมกราฟีของหมา

อินฟราเรดเทอร์โมกราฟีคือไม่มีการสัมผัส ไม่มีอันตรายต่อวิธีทดสอบซึ่งใช้ภาพความร้อนในการตรวจสอบ แสดงจอและบันทึกรูปแบบความร้อนและอุณหภูมิตั้งแต่ผิวของวัตถุ อินฟราเรดเทอร์โมกราฟีอาจจะถูกใช้ได้ทุกสถานการณ์ ซึ่งข้อมูลของความร้อนและอุณหภูมิจะอธิบายถึงความหมายของข้อมูลเกี่ยวกับระบบ, วัตถุหรือกระบวนการ เทอร์โมกราฟีใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานเพื่อทำการซ่อมแซม, การประเมิน, คุณภาพที่รับรอง, กฎหมายที่บังคับในการค้นหากระแสเครื่องกลและโครงสร้างของระบบ นอกจากนี้ยังใช้ในงานดับไฟ, ค้นหาและช่วยเหลือ, ยาและเอกสารเป็นเอกสารที่ส่งงานวิเคราะห์เชิงงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

วิทยาศาสตร์การแพทย์ การใช้งานอินฟราเรดเทอร์โมกราฟีไม่ง่ายที่จะใช้ เพราะต้องมีการเรียนรู้เกี่ยวกับทฤษฎี, การถ่ายโอนความร้อน และการทำงาน

7.3 ภาพถ่ายแบบอื่นๆ



รูปที่ 7.2 แสงอินฟราเรดจาก LED ของ Xbox 360 remote control

ในอินฟราเรดโฟโตกราฟีและอินฟราเรดฟิลเตอร์ถูกใช้จับอินฟราเรดระยะใกล้ กล้องดิจิทัลจะมีการใช้ตัวบล็อกอินฟราเรด กล้องดิจิทัลราคาถูกและกล้องโทรศัพท์มือถือสามารถเห็นอินฟราเรดชนิดใกล้ นอกจากนี้ยังมีเทคนิคซึ่งถูกเรียกว่า "รังสี T" ซึ่งใช้รังสีอินฟราเรดระยะไกลหรือการแผ่รังสีเตตระเฮิร์ต

7.4 ความร้อน

การแผ่ของอินฟราเรดสามารถถูกใช้เป็นแหล่งจ่ายความร้อน ตัวอย่างเช่น อินฟราเรดชามนำ(อินฟราเรดระยะใกล้) ซึ่งให้ความร้อนแก่ผู้ใช้ และสามารถเอาน้ำแข็งออกจากปีกเครื่องบิน นอกจากนี้ยังนิยมเป็นวิธีของการให้ความร้อนแก่ยางแอสฟัลต์ที่ใช้ในการสร้างและซ่อมแซมถนน อินฟราเรดยังถูกใช้ในการปรุงและอุ่นอาหาร

ความร้อนของอินฟราเรดกลายมาเป็นที่นิยมในโรงงานผลิต เช่น การขึ้นรูปพลาสติก, การเชื่อมพลาสติกและพิมพ์แห้ง นอกจากนี้ยังนำอินฟราเรดความร้อนแทนที่การนำความร้อนของเตาอบและการสัมผัส ประสิทธิภาพถูกได้รับ โดยการเมทซ์กับความยาวคลื่นของอินฟราเรดความร้อน ซึ่งดูดซับคาร์บอนเตอริสติกของวัตถุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.5 การสื่อสาร

การส่งข้อมูลอินฟราเรดใช้การสื่อสารระยะใกล้ระหว่างคอมพิวเตอร์และตัวช่วยเหลือนส่วนบุคคล อุปกรณ์นี้ถูกทำให้เป็นมาตรฐาน โดยออกเป็นIrDA การสื่อสารแบบอินฟราเรดนั้นไม่สามารถทะลุผ่านกำแพงได้ ดังนั้นไม่สามารถส่งผ่านระหว่างห้องหนึ่งกับอีกห้องหนึ่งได้ แสงเลเซอร์อินฟราเรดถูกใช้สำหรับไฟเบอร์ออปติกในระบบสื่อสาร โดยแสงอินฟราเรดมีความยาวคลื่น1330nm(น้อยที่สุดในการแพร่) หรือ1550nm (ดีที่สุดในการส่ง) โดยมีตัวเล็อกที่ดีที่สุดสำหรับไฟเบอร์ที่ทำจากซิลิกา



รูปที่ 7.3 แสดงการใช้รีโมทอินฟราเรดควบคุมโทรทัศน์

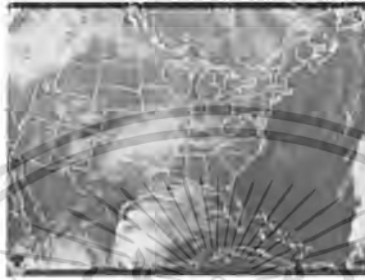
7.6 การวิเคราะห์ด้วยสเปกตรัม

การวิเคราะห์ด้วยการสั่นสะเทือนของอินฟราเรด(วิเคราะห์ที่อินฟราเรดระยะใกล้) คือเทคนิคซึ่งถูกใช้ในการแสดงโมเลกุล โดยการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบพันธะของมัน โดยแต่ละพันธะเคมีใน โมเลกุลจะสั่นสะเทือนที่ความถี่เฉพาะตัวของพันธะ กลุ่มอะตอมใน โมเลกุล (เช่น CH_2) อาจจะมีหลายวิธีของการสั่น โดยเกิดทิศทางการยืดและการ โค่งงอของกลุ่มอะตอมทั้งหมด ถ้า การสั่นนำไปสู่ความเปลี่ยนแปลงของไดโพลภายใน โมเลกุล มันจะมีการดูดซับโฟตอนที่มีความถี่เดียวกัน ความถี่ของการสั่นสะเทือนใน โมเลกุลทั้งหมดจะตอบสนองที่ความถี่ของแสงอินฟราเรด เป็นปกติที่เทคนิคนี้จะนำองค์ประกอบจากธรรมชาติมาใช้ในการแสงจาก $4000\text{-}400\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นอินฟราเรดชนิดกลาง สเปกตรัมของความถี่ที่ดูดซับทั้งหมดจะถูกบันทึกไว้ สิ่งนี้จะถูกทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับตัวอย่างของส่วนประกอบในทอมของกลุ่มเคมีและและยังได้ตัวที่บริสุทธิ์ (อย่างเช่น น้ำจะแสดงการดูดซับของO-Hออกมาประมาณ 3200 cm^{-1})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.7 อุตุนิยมวิทยา

ดาวเทียมที่เกี่ยวกับสภาพอากาศมีเรดิโอมิเตอร์ที่สามารถตรวจสอบอุณหภูมิหรือภาพถ่ายอินฟราเรดซึ่งสามารถช่วยในการวิเคราะห์หาความสูงของเมฆและชนิด คำนวณอุณหภูมิของพื้นดินและผิวน้ำ และบอกตำแหน่งของลักษณะผิวน้ำในมหาสมุทร ซึ่งจะใช้ในย่าน $10.3-12.5 \mu\text{m}$



รูปที่ 7.4 ภาพถ่ายอินฟราเรดจากดาวเทียมเกิดขึ้นในวันที่ 15 ตุลาคม 2006 โดยด้านหน้าของรูปจะเห็นคาบสมุทรเม็กซิโกเต็มไปด้วยเมฆ

ความสูงและเมฆที่เป็นน้ำแข็งจะแสดงความสว่างออกมา ความต่ำและอบอุ่นจะแสดงสีเทา (เมฆระดับปานกลาง) ผิวน้ำของพื้นดินร้อนจะแสดงสีเทามืดหรือดำ ข้อเสียของภาพถ่ายจากอินฟราเรดคือเมฆที่ต่ำเช่นเมฆที่เป็นชั้นหรือหมอกซึ่งมีอุณหภูมิใกล้เคียงกับรอบพื้นดินหรือผิวน้ำของทะเล มันจะไม่แสดงผล อย่างไรก็ตามการใช้ความแตกต่างในความสว่างของอินฟราเรด ($10.3-11.5 \mu\text{m}$) และอินฟราเรดชนิดใกล้ ($1.58-1.64 \mu\text{m}$) เมฆที่ต่ำนั้นสามารถถูกแสดงอย่างชัดเจนโดยภาพของหมอกจากดาวเทียม ข้อดีของอินฟราเรดนั้นคือสามารถถ่ายภาพกลางคืนได้

ภาพถ่ายอินฟราเรดนี้สามารถพรรณาน้ำวนของมหาสมุทรและกระแสน้ำซึ่งมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมการเดินเรือ ชาวประมงและชาวประมงซึ่งจะต้องสนใจเกี่ยวกับอุณหภูมิของพื้นดินและน้ำที่จะช่วยในการปกป้องผลผลิตจากน้ำค้างแข็งหรือเพิ่มการจับปลาในทะเล นอกจากนี้ปรากฏการณ์เอลนีโญสามารถถูกพบโดยการเทคนิคของสถิติคอลซึ่งจะแปลงจากสีมาเป็นตัวข้อมูล

7.8 สภาพภูมิอากาศ

ในขอบเขตของสภาพภูมิอากาศและบรรยากาศ การแผ่ของอินฟราเรดจะชี้ถึงแนวโน้มของพลังงานซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงระหว่างโลกและชั้นบรรยากาศ แนวโน้มนี้จัดเป็นข้อมูลในระยะยาวถึงการเปลี่ยนแปลงของสภาพภูมิอากาศของโลก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไพโรมิเตอร์ถูกใช้ให้เป็นประโยชน์ในการตรวจวัดความร้อนภายนอกอย่างต่อเนื่อง ย่านที่กว้างของอินฟราเรดเรดิโอมิเตอร์นี้จะตอบสนองได้ดีที่ความถี่ประมาณ $4.5\ \mu\text{m}$ - $50\ \mu\text{m}$.

7.9 คาราศาสตร์



รูปที่ 7.6 กล้อง Spitzer Space นี้เป็นอุปกรณ์ดูดาวและดวงอาทิตย์

นักดาราศาสตร์สังเกตวัตถุที่มีองค์ประกอบอินฟราเรดของแถบแม่เหล็กไฟฟ้าโดยส่วนมากเป็นองค์ประกอบทางแสง ประกอบด้วยกระจก เลนส์ และอุปกรณ์ตัวรับที่เป็นของแข็ง นี่เป็นเหตุผลที่จะต้องป้องกันความร้อนจากแหล่งจ่าย และตัวรับจะต้องถูกหุบด้วยฮีเลียม

ความไวของกล้องอินฟราเรดที่ตั้งบนโลกถูกจำกัดด้วยไอน้ำในชั้นบรรยากาศ ซึ่งสามารถดูดซับองค์ประกอบของการแผ่อินฟราเรดจากพื้นที่ว่างภายนอก ข้อจำกัดนี้สามารถถูกทำให้น้อยลงได้โดยการไปสังเกตในระดับที่สูง หรือนำไปในที่สูงโดยบอลลูนหรือยานอวกาศ

เอกสารนี้เป็นสมบัติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.10 ประวัติศาสตร์ของศิลปะและโบราณคดี

อินฟราเรดเกิดขึ้นในการระบายสีเพื่อปิดบังระดับชั้น โดยเฉพาะภายใต้รูปวาด บ่อยครั้งที่ จะใช้ถ่านคาร์บอนซึ่งแสดงการสะท้อนได้ดี เป็นเวลานานแล้วที่ไม่พบการใช้ในพื้นภายใต้การ ระบายทั้งหมด นักประวัติศาสตร์พบว่าชั้นที่มองเห็นของรูปนั้นแตกต่างจากใต้รูป เช่นการ เปลี่ยนแปลงถูกเรียกว่าpentimenti ถูกทำขึ้น โดยศิลปินดั้งเดิม ซึ่งจะทำให้เห็นอย่างง่ายคยาว่ารูปนั้น เป็นของแท้หรือคัดลอกมา



รูปที่ 7.7 รูปวาดที่แสดงการระบายสีเพื่อปิดบังระดับ

การใช้ลักษณะเดียวกัน โดยนักโบราณคดีแต่แตกต่างในจุดประสงค์ โดยเฉพาะงานเขียนที่ เก่าเช่น Dead Sea Scrolls, การทำงานของชาวโรมันในหมู่บ้าน Papyri, การค้นพบเส้นทางสายไหม ในถ้ำDunhuang Caves โดยถ่านดำที่ถูกใช้ในหมึกจะแสดงออกมาอย่างชัดเจน

7.11 ระบบชีววิทยา



รูปที่ 7.8 ภาพอุณหภูมิของงูที่กินหนู

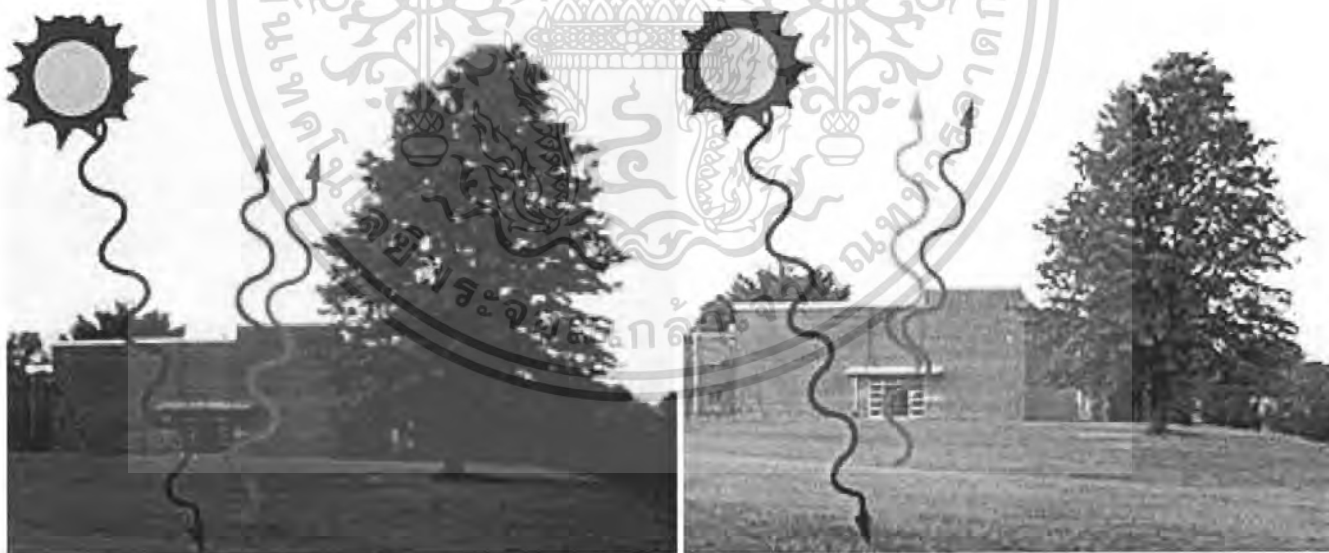
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหยื่อถูกพิษของงูถูกรู้ โดยการจับด้วยเซนเซอร์อินฟราเรดว่ามีเหยื่อบนหัวของมัน มีการโต้เถียงเกี่ยวกับความแน่นอนของระบบตัวรับอินฟราเรด นอกจากนี้จากธรรมชาติจะพบในงูกะปะและงูเห่าล้อม คางคกคูดเลือด แมลงช้าง ผีเสื้อสีคล้ำ และแมลงคูดเลือด

7.12 เกี่ยวกับโลกและอินฟราเรด

“วัตถุที่ไม่สามารถพิสูจน์ได้อาจจะถูกทำลายและเคลื่อนย้าย” บทความนี้เกิดการกล่าวจนชินหูตั้งแต่ กรกฎาคม 2006

พื้นผิวของโลกและเมฆคูดเคลื่อนการแผ่ของรังสีที่มองเห็นและไม่เห็นจากดวงอาทิตย์และปล่อยออกมาในรูปพลังงานอินฟราเรดสู่ชั้นบรรยากาศ เนื้อสารในชั้นบรรยากาศ หยดน้ำและไอน้ำ แต่ยังคงมีคาร์บอน ไดออกไซด์ มีเทน ไนตรัสออกไซด์ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ และคลอโรฟลูออโรคาร์บอนซึ่งคูดเคลื่อนอินฟราเรดนี้ และปล่อยกลับออกมายัง โลกอีกครั้ง ดังนั้นปรากฏการณ์เรือนกระจกมีผลต่อชั้นบรรยากาศและพื้นผิวซึ่งจะทำให้ร้อนกว่าเดิม



รูปที่ 7.9 แสดงถึงความสัมพันธ์ของโลกกับอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้