

คุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน  
เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

Characteristic of Silicon P-I-N photo diode with stain etched porous silicon  
as anti-reflection layer



เลขหมู่.....*Pl.1*.....  
เลขทะเบียน.....62452.....  
วัน,เดือน,ปี.....18 ส.ค. 2548.....

b.....*11620116*.....  
i.....

ปริญญาบัตรนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาดมหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**คุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้น  
ลดการสะท้อนแสง**

**Characteristic of Silicon P-I-N photo diode with stain etched porous silicon  
as anti-reflection layer**



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2548

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2548

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง คุณสมบัติซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

ผู้จัดทำ

1. นางสาวกนกพร สีหาพงษ์
2. นางสาวสรินยา ชนะไพบุลย์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## คุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มี ชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

นางสาว กนกพร สีหาพงษ์ รหัส 46015168

นางสาว สรินยา ชนะไพบุลย์ รหัส 46015245

รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2548

### บทคัดย่อ

ซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้าง p-i-n เป็นตัวตรวจจับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงทั้งด้านการดูดกลืนแสงและความเร็วในการทำงาน และเนื่องจากชั้นของพอร์ซิลิคอน ประกอบด้วยรูพรุนจำนวนมาก ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้เป็นชั้นดูดกลืนแสงและชั้นลดการสะท้อนแสง สำหรับตัวตรวจจับแสงที่ทำจากซิลิคอนได้ทุกชนิด

ในงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอ การทดลองและผลการทดลอง สร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ซึ่งมีชั้นพอร์ซิลิคอนที่ได้จากการกัดทางเคมีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่สร้างมีขนาดพื้นที่รับแสง  $4.84 \text{ mm}^2$  จากการทดลอง ได้นำชั้นพอร์ซิลิคอนมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการให้กระแสแสงที่เพิ่มขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบกับชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจาก  $\text{SiO}_2$  จากการศึกษาพบว่าชั้นพอร์สที่ใช้เวลาในการกัด 30 วินาที มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง 19.16 % ส่วนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 1000 Å มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง 20.9 % และเมื่อนำโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงทั้งสองแบบมาทำการศึกษาโดยมีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง Halogen พบว่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์สเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงมากกว่า 57.5 % และเมื่อให้แหล่งจ่ายแสงเป็นแสง UV พบว่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์สเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงมากกว่า 72.93 %

## Characteristic of Silicon P-I-N photo diode with stain etched porous silicon as anti-reflection layer

Miss Kanokporn Seehapong ID. 46015168

Miss Sarinya Tanaphaiboon ID. 46015245

Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech Advisor

Educational Year 2005

### Abstract

Silicon p-i-n photo diode is a high efficient photo detector for photo absorption and operation speed. Because of Porous Silicon layer contained many pore, than it can be used as photo absorption and anti-reflection layer of all Silicon photo detectors.

In this study, The experiments and results of fabrication of Silicon p-i-n photo diode with stain-etched porous silicon as anti-reflection layer are investigated and reported. P-I-N photo diode has an active area is  $4.84 \text{ mm}^2$ . We study the increase photo current of P-I-N photo diode with porous silicon as anti-reflection layer by we compare with  $\text{SiO}_2$  is anti-reflection layer. We found porous silicon at 30 sec has reflection 19.16 %,  $\text{SiO}_2$  at  $1000 \text{ \AA}$  has reflection 20.9 %. When we use halogen is a light source to the both of them, P-I-N photo diode with porous silicon as anti-reflection layer has more density current 57.5 %. If we use UV is a light source, P-I-N photo diode with porous silicon as anti-reflection layer has more density current 72.93 %.

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช ผู้ให้คำปรึกษาและแนะแนวทางในการทำวิจัยครั้งนี้ จนสามารถสำเร็จลุล่วงตรงตามวัตถุประสงค์ ขอขอบคุณ รศ.ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง หัวหน้าศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ได้อำนวยความสะดวกให้กับนักศึกษาในการทำงานวิจัยนี้ และขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือมาโดยตลอด

นอกจากนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณนายจิรวุฒิ ปราบเขต นักศึกษาปริญญาโทที่ได้ให้คำปรึกษาและความช่วยเหลือมาโดยตลอด และขอขอบคุณนายสรวิศ มุ่งการนา นักศึกษาปริญญาโทที่ได้ให้คำแนะนำในการทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ คุณลุง ผู้ที่ให้ความอุปการะและสนับสนุนในด้านการศึกษามาโดยตลอด

กนกพร สีหาพงษ์  
สรินยา ธนะไพบูลย์

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความเป็นมาของปริญญานิพนธ์.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์.....	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	
2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง.....	3
2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง.....	3
2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง.....	6
2.2 สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง.....	8
2.2.1 ชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสง.....	8
2.2.2 การแบ่งชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับตามหลักการทำงาน.....	9
2.2.3 โฟโตไดโอด.....	10
2.2.3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ.....	10
2.2.3.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด.....	13
2.2.3.3 เส้นกราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า.....	15
2.2.3.4 ลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด.....	19
2.2.3.4.1 สเปกตรัมผลตอบสนอง.....	19
2.2.3.4.2 การไบอัสย้อนโฟโตไดโอด.....	21
2.2.3.4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิ.....	24
2.2.3.5 กลไกการดูดกลืนแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต.....	24
2.3 พินโฟโตไดโอด.....	26
2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของพินโฟโตไดโอด.....	26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
2.4 พอร์ตซิลิคอน.....	29
2.4.1 โครงสร้างของพอร์ตซิลิคอน.....	30
2.4.2 ความพรุนของพอร์ตซิลิคอน.....	31
2.4.3 การแบ่งประเภทของพอร์ตซิลิคอน.....	33
2.4.3.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ตซิลิคอน.....	33
2.4.3.2 แบ่งตามลักษณะรูพรุน.....	34
2.4.3.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน.....	34
2.4.4 เทคนิคในการสร้างพอร์ตซิลิคอน.....	35
2.4.5 การสร้างพอร์ตซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching.....	38
2.4.5.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี.....	38
2.4.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ตซิลิคอนที่สร้างจากวิธี Stain etching.....	39
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง	
3.1 การสร้างกระจกต้นแบบ.....	41
3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอด p-i-n .....	42
3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง.....	42
3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน.....	42
3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน.....	43
3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ( Photolithography ).....	43
3.2.5 การฉายแสง ( Exposure ).....	43
3.2.6 กระบวนการแพร่สารเจือ ( Diffusion ).....	44
3.2.6.1 กระบวนการแพร่สารเจือ โบรอน ( Boron ).....	44
3.2.6.2 กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ( Phosphorus ).....	44
3.2.7 Metallization Process.....	44
3.2.8 กระบวนการซินเตอร์ริง ( Sintering ).....	44
3.2.9 การสร้างพอร์ตซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล.....	45
3.2.10 กระบวนการสร้าง Silicon Photodiode แบบ p-i-n.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	
4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด.....	63
4.2 ศึกษากระแสของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้น SiO <sub>2</sub> เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ในขณะที่ยังไม่ได้รับแสง( I <sub>DARK</sub> ).....	65
4.3 ศึกษาผลของค่าความถี่รอยต่อ ( X <sub>j</sub> ).....	66
4.3.1 ศึกษาผลของค่าความถี่รอยต่อ ( X <sub>j</sub> ) ที่มี Halogen เป็นแหล่งจ่ายแสง.....	66
4.3.2 ศึกษาผลของค่าความถี่รอยต่อ ( X <sub>j</sub> ) ที่มี UV เป็นแหล่งจ่ายแสง	69
4.4 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N.....	71
4.4.1 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับผิวซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	71
4.4.2 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนกับผิวซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง.....	72
4.4.3 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอน ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และผิวซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง.....	73
4.5 ศึกษากระแสมีดของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และชั้นพอร์ซิลิคอนเป็น ชั้นลดการสะท้อนแสง.....	74
4.6 ศึกษากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และชั้นพอร์ซิลิคอนเป็น ชั้นลดการสะท้อนแสง .....	75
4.6.1 ศึกษากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงและมีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง Halogen.....	75
4.6.2 ศึกษากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซิลิคอนเป็น ชั้นลดการสะท้อนแสงและมีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง UV.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	78
เอกสารอ้างอิง.....	79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	การแบ่งสิ่งประดิษฐ์ที่ควรรับแสงออกเป็นชนิดต่าง ๆ.....	9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่		หน้า
2.1	ความถี่และความยาวคลื่นของแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ.....	4
2.2	สเปกตรัมความไวต่อแสงของสายตามนุษย์.....	5
2.3	การทดลองพิสูจน์ว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น.....	6
2.4	การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.....	7
2.5	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสง ในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกกระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่า ๆ หนึ่ง.....	7
2.6	ตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ.....	11
2.7	ตัวอย่างภาพโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ.....	12
2.8	ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn.....	14
2.9	แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn.....	15
2.10	ลักษณะสมบัติของเส้นกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าโฟโตไดโอด เส้นหมายเลข 1 แสดงในสภาพมืดและมีรูปร่างเหมือนของไดโอดทั่วไป เส้นหมายเลข 2 และ 3 แสดงในสภาพมีแสงและเส้นกราฟจะเคลื่อนลงด้านล่าง....	16
2.11	( ก ) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร $I_{sh}$ ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินพุต.....	16
	( ข ) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด $V_{oc}$ และความเข้มของแสงอินพุต....	16
2.12	การวัดความเข้มของแสงด้วยโฟโตไดโอด ( ก ) ทำการไบอัสแบบย้อนกลับและวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมโหลด $R_L$ .....	18
	( ข ) ต่อโฟโตไดโอดกับออปแอมป์และวัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร.....	18
2.13	ลักษณะสมบัติของเส้น I-V ในสภาพมืดของโฟโตไดโอดและเส้นโหลด.....	18
2.14	ลักษณะสมบัติเส้น I-V ในสภาพมีคของโฟโตไดโอด โดยขยายสเกลให้ใหญ่ให้ เห็นชัดในช่วง -10 mV ถึง +10 mV.....	19
2.15	ตัวอย่างลักษณะสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ.....	20
2.16	ตัวอย่างวงจรสำหรับไบอัสให้โฟโตไดโอด.....	22
2.17	ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขาขึ้นของโฟโตไดโอดชนิดซิลิกอน และแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งจะเห็นได้ว่าการไบอัสย้อนกลับจะทำให้ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าสั้นลง..	22
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตของโฟโตไดโอดชนิดซิลิกอนและความเข้มของแสง โดยมีแรงดันไบอัสย้อนกลับ $V_R$ เป็นพารามิเตอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อ	

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
	เพิ่ม $V_R$ จะทำให้คุณสมบัติเชิงเส้นของโฟโตไดโอดดีขึ้น.....
2.19	ตัวอย่างการต่อโฟโตไดโอดจากรูปที่ 2.16 ( ข ) โดยมีโหลดความต้านทาน $50\Omega$ ต่ออยู่.....
2.20	กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่าง ๆ ในรอยต่อ pn ในสภาพกำลังมีการไบอัสย้อนกลับ
2.21	การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึก จากผิวของโฟโตไดโอดย่านปลอดภัยอยู่ระหว่างตำแหน่ง $x_1$ และ $x_2$ .....
2.22	( ก ) และ ( ข ) โครงสร้างพื้นฐานของพินโฟโตไดโอด.....
	( ค ) แถบพลังงานของพินโฟโตไดโอดขณะไบอัสย้อนกลับ.....
	( ง ) การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกในพินโฟโตไดโอด.....
2.23	( ก ) การขึ้นกับแรงดันไบอัสย้อน ของกระแสไฟฟ้ามืดของพินโฟโตไดโอดชนิด Si โดยที่พารามิเตอร์คือ อุณหภูมิขณะทำงาน.....
	( ข ) การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ามืด ของพินโฟโตไดโอดชนิด Ge , Si และ GaAs.....
2.24	ตัวอย่างโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดที่มีการผลิตจริง.....
2.25	ภาพตัดขวางของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิกอน.....
2.26	ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน.....
2.27	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิกอนกับขนาดรูพรุน ( d ) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน.....
2.28	แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่าง ๆ..
2.29	แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิกอนลักษณะต่าง ๆ ซึ่งลักษณะของแท่งพอร์สที่แตกต่างกันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันได้.....
2.30	แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิกอนรูปร่างต่าง ๆ.....
2.31	ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่าง ๆ.....
2.32	แสดงแบบจำลองลักษณะ โครงสร้างทางควอนตัมแบบต่าง ๆ และทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน.....
3.1	ลักษณะมาสก์ที่ 1 เปิดช่องออกไซค์สำหรับแพร์สารเจือ.....
3.2	ลักษณะมาสก์ที่ 2 เปิดช่องออกไซค์สำหรับทำขั้วโลหะ.....
3.3	ลักษณะมาสก์ที่ 3 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม.....

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่		หน้า
3.4	ลักษณะมาสก์ที่ 4 เปิดช่องสำหรับกัดพอร์สซิลิคอน.....	42
3.5	แสดงการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมติ.....	45
3.6	แสดงภาพตัดขวางกระบวนการสร้าง p-i-n โฟโตไดโอด.....	50
3.7	แสดงภาพก่อน-หลังกัดพอร์สซิลิคอน.....	56
3.8	Clean Bench.....	57
3.9	เครื่อง Ultrasonic.....	57
3.10	เครื่อง spin สารเจือและ เตออบ.....	58
3.11	เตาแพร่สารเจือ.....	58
3.12	เครื่อง spin น้ำยาไวแสง.....	59
3.13	เตออบแผ่น.....	59
3.14	เครื่องฉายแสง.....	60
3.15	Developer bench.....	60
3.16	Evaporate.....	61
3.17	Microscope.....	61
4.1	เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมการเก็บข้อมูล.....	62
4.2	โปรแกรม I-V diode.....	63
4.3	Probe Station.....	63
4.4	HP4061 A.....	64
4.5	Transistor curve tracer.....	64
4.6	แสดงผลของความถี่รอยต่อ ( $X_j$ ) ที่มีผลต่อ $I_{DARK}$ ซึ่งมีชั้น $SiO_2$ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของ โฟโตไดโอดแบบ P-I-N.....	65
4.7	แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N และที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันเท่ากับ 10 V ที่ความถี่รอยต่อ ( $x_j$ ) ค่าต่าง ๆ.....	66
4.8	แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ค่าความถี่รอยต่อต่าง ๆ กัน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 8000 lx.....	67
4.9	แสดงผลของค่าแรงดันไบอัสที่มี Halogen เป็นแหล่งจ่ายแสง โดยมีค่าความถี่รอยต่อต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N.....	68

## สารบัญรูป ( ต่อ )

รูปที่	หน้า
4.10 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ค่าความถี่รอยต่อต่าง ๆ กัน โดยมี UV เป็นแหล่งจ่ายแสง.....	69
4.11 แสดงผลของค่าแรงดันไบอัสที่มี UV เป็นแหล่งจ่ายแสง โดยมีค่าความถี่รอยต่อต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N.....	70
4.12 แสดงผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่มีความหนาแน่นค่าต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N.....	71
4.13 แสดงผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอนและชั้นพอร์ตซิลิคอน ที่มีความหนาแน่นค่าต่าง ๆ กัน ของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N.....	72
4.14 แสดงผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอน ชั้นพอร์ตซิลิคอน และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่มีความหนาแน่นค่าต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N.....	73
4.15 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสมืดของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ตซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง.....	74
4.16 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ตซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ค่าความเข้มแสงต่าง ๆ กัน โดยกำหนดให้มีแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 V.....	75
4.17 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ตซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยกำหนดให้มีค่าความเข้มแสง 8000 lx.....	76
4.18 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ตซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่มีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง UV.....	77

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของปริศยานิพนธ์

การตรวจรับหรือวัดแสงเป็นสิ่งที่สำคัญมากในการใช้งานแสงให้เป็นประโยชน์ ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการคิดค้นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงขึ้นมาหลายชนิด เพื่อใช้งานในย่านความยาวคลื่นที่แตกต่างกันและวัตถุประสงค์ที่ต่างกัน เช่น โฟโตมัลติพลายเออร์ โฟโตเซลล์ โฟโตไดโอด พินโฟโตไดโอด โฟโตทรานซิสเตอร์ อวาลานซ์โฟโตไดโอด CCD เซลล์แสงอาทิตย์ โฟโตแคปเจอร์ ฯลฯ เป็นต้น

โฟโตไดโอด ( photodiode ) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน ( internal photoelectric ) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น ปัจจุบันโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn มีราคาไม่แพงและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลาย ในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ และมีการผลิตโฟโตไดโอดจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ เช่น Si, GaAs, GaAsP และ GaP ซึ่งไวต่อแสงในย่านความถี่ต่าง ๆ กัน สำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานเร็วมากคือ พินโฟโตไดโอดและอวาลานซ์โฟโตไดโอด โดยพินโฟโตไดโอด ( p-i-n photodiode ) คือ โฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโตไดโอดธรรมดาตรงที่ระหว่างชั้น p และชั้น n จะมีชั้น i ตั้งอยู่ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ ( intrinsic ) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโด๊ปด้วยสารเจือปนด้วยปริมาณที่น้อยมาก ลักษณะเด่นของพินโฟโตไดโอดคือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ ( junction capacitance ) มีค่าน้อย จึงทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ( ultra-fast response speed ) ถึงระดับพิโกวินาที ปัจจุบันมีการใช้งานพินโฟโตไดโอด เป็นตัวตรวจรับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว เช่น ในระบบการสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์ ในอุปกรณ์ดิสก์ ในอุปกรณ์รีโมตคอนโทรลด้วยแสง เป็นต้น การทำความเข้าใจเกี่ยวกับพินโฟโตไดโอดจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษากระบวนการสื่อสารด้วยแสงจากข้อคิดที่ได้กล่าวมาแล้วของ p-i-n โฟโตไดโอด ปริศยานิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการพัฒนาคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงของ p-i-n โฟโตไดโอด โดยใช้พอร์ซซิลิคอน ( porous silicon ) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

## 1.2 วัตถุประสงค์ของปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาค่าของ  $x$ , ที่มีผลต่อกระแสแสงของ p-i-n โฟโตไดโอด
2. ศึกษาการทำงานของ p-i-n โฟโตไดโอด ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อน

แสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎี

#### 2.1 คุณสมบัติพื้นฐานของแสง

จากประสบการณ์ในชีวิตประจำวัน เราจะพบว่าแสงและวัสดุมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิด เช่น วัสดุสามารถสะท้อนแสงได้ วัสดุดูดกลืนแสงได้ วัสดุเปล่งแสงได้ เป็นต้น การใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ก็เช่นกัน ได้ใช้ปรากฏการณ์เหล่านี้เป็นหลักในการทำงาน ในการศึกษาออปติกอิเล็กทรอนิกส์มีความจำเป็นต้องเข้าใจว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นอย่างไร ในที่นี้จะกล่าวถึงความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับแสงว่า แสงมีคุณสมบัติเป็นอย่างไรบ้าง

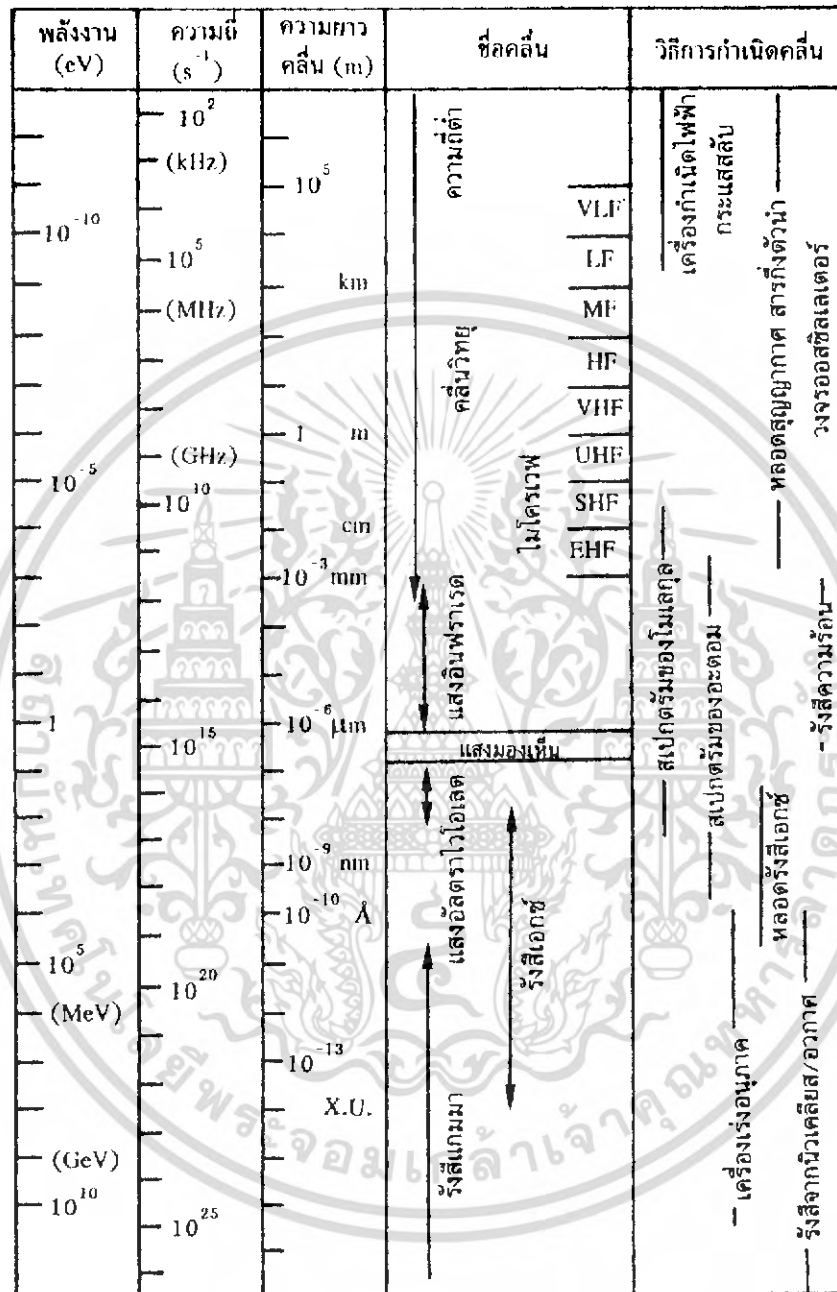
แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้ง “คลื่น” (Wave) และ “อนุภาค” (Particle) ปรากฏการณ์ที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อนแสง (reflection) การแทรกสอดแสง (interference) และการหักเหแสง (refraction) แสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ การส่องแสงเข้าสู่ผิวโลหะแล้วทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกสู่อวกาศ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (external photoelectric effect) หรือการเพิ่มขึ้นของค่าสภาพนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกแสงหรือการเปล่งแสงของไดโอดเปล่งแสง เป็นต้น

##### 2.1.1 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งถ้าให้  $\lambda$  คือความยาวคลื่นแสง  $\nu$  คือความถี่ และ  $c_0$  คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ( $c_0 = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}$ ) จะมีความสัมพันธ์ดังนี้

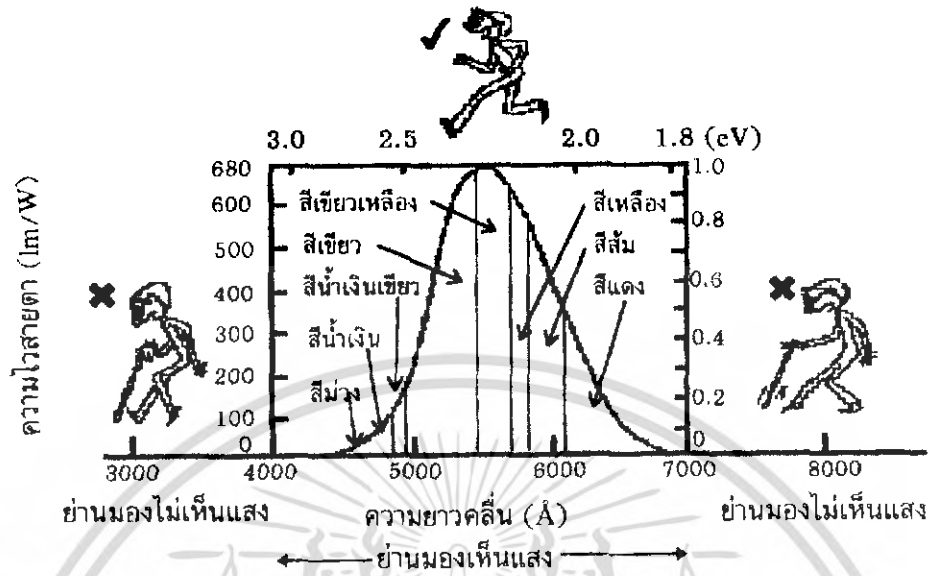
$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \quad (2.1)$$

แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวคลื่นอยู่ในช่วงประมาณ 400- 700 nm แสงมองเห็นนี้ในสเปกตรัมแสงมีการแบ่งเป็นแสงสีต่าง ๆ ได้แก่ แสงสีม่วง คราม น้ำเงิน เขียว เหลือง ส้ม และแดง ในจำนวนสีต่าง ๆ เหล่านี้สีที่ตามนุษย์มีความไว (sensitivity) มากที่สุดคือ แสงสีเขียว รูปที่ 2.1 แสดงตารางคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ และรูปที่ 2.2 แสดงกราฟความไวของสายตามนุษย์ที่มีต่อแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ (eye-sensitive curve)



รูปที่ 2.1 ความถี่และความยาวคลื่นของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 สเปกตรัมความไวต่อแสงของสายตามนุษย์

ถ้าแสงเดินทางในวัสดุที่มีเนื้อสารเรียบตลอดและเป็นวัสดุไอโซทรอปี (isotropy) แสงจะเดินทางเป็นเส้นตรง แต่ถ้าแสงเดินทางจากวัสดุหนึ่งไปสู่วัตถุอีกชนิดหนึ่ง ที่พรมแดนของวัสดุทั้งสองนั้นแสงจะหักเหหรือสะท้อนกลับได้ การเดินทางของแสงในวัสดุที่มีค่าดัชนีหักเหแสงเท่ากับ  $n$  จะทำให้ความเร็วของแสงช้ากว่าในสุญญากาศ กล่าวคือ ความเร็วแสง  $c$  ในวัสดุจะเท่ากับ

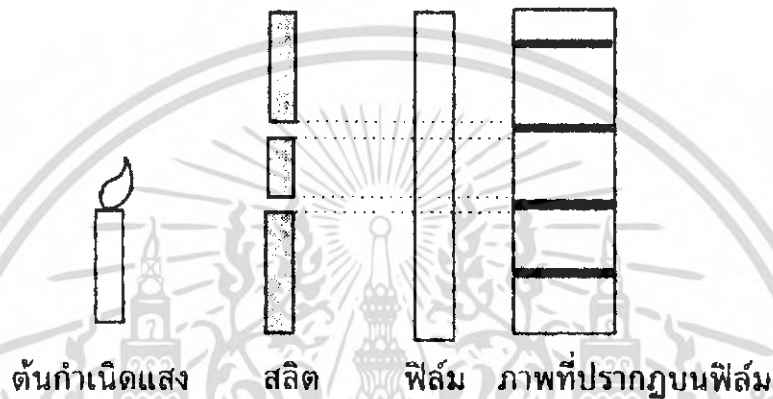
$$c = \frac{c_0}{n} \quad (2.2)$$

ค่าดัชนีหักเหแสง  $n$  ของวัสดุใด ๆ จะขึ้นกับความยาวคลื่นหรือความถี่ของแสงด้วย และค่า  $n$  นี้มีความสัมพันธ์กับค่าคงตัวไดอิเล็กทริก  $\epsilon$  ของวัสดุ (dielectric constant) ดังนี้

$$n = \sqrt{\frac{\epsilon}{\epsilon_0}} \quad (2.3)$$

โดยที่  $\epsilon_0$  คือค่าคงตัวไดอิเล็กทริกของสุญญากาศ  $= 8.85418782 \times 10^{-12} \text{ F/m}$

ตัวอย่างที่แสดงว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น เช่น การทดลองของยัง (Young) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 มีต้นกำเนิดแสงไฟส่องแสงผ่านสลิต (slit) ซึ่งมีรูเจาะไว้ 2 รู ด้านหลังสลิตมีแผ่นไวแสงเป็นตัวบันทึกภาพ เมื่อดูภาพบนแผ่นไวแสงจะพบว่ามีการแทรกสอดของแสงและเกิดแถบสว่างและมืดแบบลายมัลลายปรากฏอยู่ เราเรียกภาพริ้วเช่นนี้ว่า ภาพริ้วแทรกสอด (interference fringe) ในสาขาวิชาทัศนศาสตร์คลื่น (wave optics) ปรากฏการณ์เช่นนี้เกิดจากการเป็นคลื่นของแสง



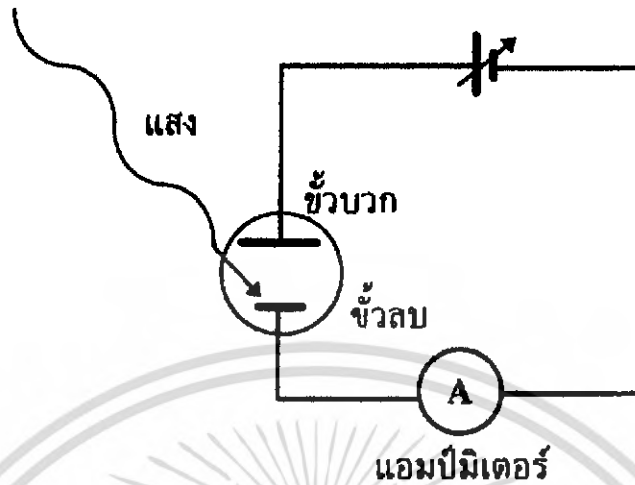
รูปที่ 2.3 การทดลองพิสูจน์ว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น

### 2.1.2 การเป็นอนุภาคของแสง

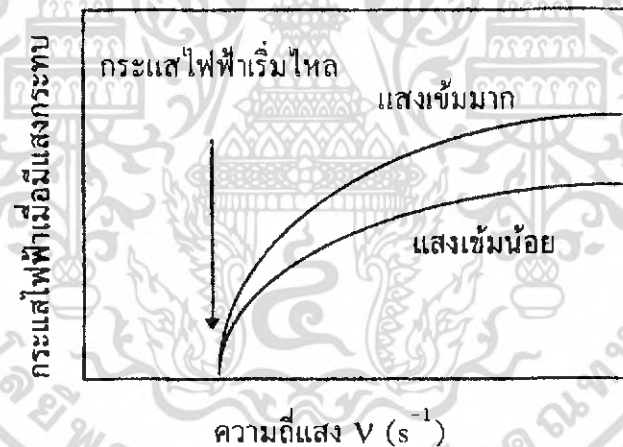
แสงนอกจากมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคด้วย เราเรียกอนุภาคแสงว่า โฟตอน (photon) อนุภาคแสงมีพลังงานอยู่ภายใน และถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ  $\nu$  อนุภาคแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  (หน่วย electron volt: ย่อว่า eV) โดยที่  $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ (Planck's constant)  $= 6.626176 \times 10^{-34} (J \cdot s)$

ตัวอย่างปรากฏการณ์หนึ่งซึ่งแสดงว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวของโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศแล้วทำให้อิเล็กตรอนที่ผิวโลหะกระเด็นหลุดออกจากผิวโลหะ ดังแสดงวิธีทดลองในรูปที่ 2.4

ในรูปที่ 2.4 ในหลอดสุญญากาศมีขั้วไฟฟ้าบวกและลบบรรจุอยู่ และขั้วไฟฟ้าเหล่านี้ถูกต่อออกไปสู่วงจรภายนอกซึ่งมีแบตเตอรี่ไบอัสอยู่ เมื่อส่องแสงลงบนขั้วไฟฟ้าลบจะพบว่า ถ้าแสงมีความถี่สูงกว่าค่า ๆ หนึ่งจะทำให้มีกระแสไหลในวงจร แต่ถ้าแสงมีความถี่ต่ำกว่าค่า ๆ นี้ ก็จะไม่มีการไหลในวงจรดังแสดงผลการทดลองในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 การทดลองการเกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก



รูปที่ 2.5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความถี่ของแสงในปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก กระแสไฟฟ้าจะเริ่มไหลเมื่อความถี่ของแสงสูงกว่าค่า ๆ หนึ่ง

ปรากฏการณ์นี้ ไอน์สไตน์ (Einstein) ได้อธิบายไว้ว่าเมื่อแสงที่มีความถี่  $\nu$  เดินทางไปในปริภูมิ (space) แสงนั้นไม่ได้มีพลังงานที่มีค่าต่อเนื่อง แต่แสงจะเป็น "อนุภาค" ที่มีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  ที่วิ่งไปในปริภูมินั้น ไอน์สไตน์ได้ตั้งชื่ออนุภาคแสงไว้ว่า "light quantum" ต่อมาใน

ปัจจุบันเราเรียกอนุภาคแสงว่า “โฟตอน” (photon) นอกจากนี้ไอน์สไตน์ยังได้อธิบายรายละเอียดของปรากฏการณ์ในรูปที่ 2.5 ไว้ดังนี้

พลังงานสูงสุดของอิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ  $E$  มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวของโลหะ  $h\nu$  ลบด้วยงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก  $q\phi$  และเขียนเป็นสมการได้ว่า

$$e = h\nu - q\phi \quad (2.4)$$

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

สูตรนี้บอกให้เราทราบว่า ค่าความถี่ต่ำสุดของแสงที่จะสามารถทำให้เกิดปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริกเช่นนี้ได้ สามารถคำนวณได้โดยการให้  $E$  ในสมการที่ (2.4) มีค่าเท่ากับศูนย์ จึงได้ว่า  $h\nu = q\phi$  ซึ่ง  $\phi$  คือ เวิร์กฟังก์ชันของโลหะชนิดนั้น ๆ และจากสูตรนี้พลังงานของอิเล็กตรอน  $E$  ที่กระเด็นหลุดออกจากโลหะมีค่าแปรผันตรงกับความถี่  $\nu$

## 2.2 สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง

### 2.2.1 ชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง

สิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสง (light detector) หมายถึง สิ่งประดิษฐ์ที่มีความไวต่อแสงและสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าได้

ตาของมนุษย์มีความไวต่อแสงและเป็นตัวตรวจจับแสงชนิดหนึ่ง (แต่ไม่ได้เปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า) สามารถส่งสัญญาณไปให้ประสาทรับแสงได้รับรู้ภาพ แต่ตาของมนุษย์มีข้อเสียที่มองภาพในที่มืดๆ ไม่ได้หรือไม่เห็นเลย และช่วงความยาวคลื่นของแสงที่มองเห็นค่อนข้างจำกัด ตาของมนุษย์สามารถมองเห็นแสงได้เฉพาะในย่าน 400-700 nm โดยประมาณ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องมีการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์ที่ไวต่อแสงในย่านต่างๆ ตั้งแต่แสงเหนือม่วงไปจนถึงแสงอินฟราเรด

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงมีการพัฒนาให้สามารถจัดการข้อมูลแสงได้ในหลายรูปแบบ ซึ่งแต่ละชนิดไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นที่ต่างกัน บางชนิดมีความสามารถขยายสัญญาณได้ในตัว บางชนิดตอบสนองด้านเวลารวดเร็วมาก บางชนิดจับภาพได้ทั้งแบบ 1 มิติ 2 มิติ หลายชนิดมีความเชื่อถือได้สูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน ในกระบวนการตรวจจับแสง อาจตรวจวัดแสงในรูปของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ได้ หรือสัญญาณความร้อนก็ได้

สัญญาณได้ในตัว บางชนิดตอบสนองด้านเวลารวดเร็วมาก บางชนิดจับภาพได้ทั้งแบบ 1 มิติ 2 มิติ หลายชนิดมีความเชื่อถือได้สูงและมีอายุการใช้งานยาวนาน ในกระบวนการตรวจรับแสง อาจตรวจวัดแสงในรูปของสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าก็ได้ หรือสัญญาณความร้อนก็ได้

เราสามารถแบ่งสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงออกได้เป็น 2 ชนิดใหญ่ๆ คือ **ชนิดโฟโตอิเล็กทริก** (photoelectric type) และ **ชนิดเทอร์โมอิเล็กทริก** (thermoelectric type) สำหรับชนิดโฟโตอิเล็กทริกเหมาะกับการวัดแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงแคบๆ มีอัตราการขยายสัญญาณสูง ทำงานไวรวดเร็ว มีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายมาก ส่วนชนิดเทอร์โมอิเล็กทริกทำงานได้ที่แสงช่วงความยาวคลื่นกว้างๆ และสามารถใช้วัดค่าความเข้มสัมบูรณ์ (absolute intensity) ของแสงได้

**2.2.2 การแบ่งชนิดของสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับตามหลักการทำงาน**

สิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงแบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ได้ตามหลักการทำงานดังแสดงในตาราง

ที่ 2.1

**ตารางที่ 2.1 การแบ่งสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงออกเป็นชนิดต่างๆ**

ชนิด	ปรากฏการณ์		ตัวอย่างวัสดุ	ตัวอย่างสิ่งประดิษฐ์
Photoelectric Effect	External Photoelectric Effect	Photoelectron Emission Effect	AgOCs BiOAgCs NaKSbCs GaAsCs	Photomultiplier Image Tube Image Converter Image Intensifier
	Internal Photoelectric Effect	Photoconductive Effect	Se, CdS, CdSe Sb <sub>2</sub> S <sub>3</sub> , PbO, SeAsTe Amorphous Si	Photoconductive cell VIDICON Electrophotography
			Photovoltaic Effect	pn, pin, pnp, MOS, Si, Ge, GaAs, GaInAs, Superlattices
				ไมโครรอยต่อ pn
Thermal Electric Effect	Thermal Electric Effect	Seebeck Effect	AgBi, BiSb	Thermoelectric Device Thermocouple
	Pyro Electric Effect		TGS, SBN	Infrared VIDICON

ในปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการทดลองคุณสมบัติของแสงที่มีผลต่ออุปกรณ์โฟโตไดโอด ในที่นี้จึงกล่าวถึงเฉพาะอุปกรณ์ตรวจรับแสงแบบโฟโตไดโอดเท่านั้น

### 2.2.3 โฟโตไดโอด ( Photodiode )

โฟโตไดโอด ( Photodiode ) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน ( internal photodiode ) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ pn เมื่อมีแสงตกกระทบบนรอยต่อ pn จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้าง ๆ แล้วอาจรวมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงโฟโตไดโอดแล้วจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้า และใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง ปัจจุบันโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ pn มีราคาไม่แพงและมีใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ และมีการผลิตโฟโตไดโอดจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ เช่น Si, GaAs, GaAsP และ GaP ซึ่งไวต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นต่าง ๆ กัน สำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วมากคือ พินโฟโตไดโอดและอวาลานซ์โฟโตไดโอด ในเรื่องนี้จะกล่าวถึงโครงสร้างและหลักการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอด

#### 2.2.3.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงอินพุตเป็นสัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบบน ปัจจุบันมีการพัฒนาให้โฟโตไดโอดมีโครงสร้างและคุณสมบัติเด่นแตกต่างกันออกไปมากมายหลายชนิด เช่น







- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn ( pn photodiode ) และแบ่งออกเป็น
  - ชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชัน ( planar diffusion )
  - ชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ ( low capacitance planar diffusion )
  - ชนิดรอยต่อ  $pn^+$
- พินโฟโตไดโอด ( pin photodiode )
- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี ( Schottky photodiode )
- อวาลานซ์โฟโตไดโอด ( Avalanche photodiode )

โฟโตไดโอดทั้งหมดเหล่านี้มีคุณสมบัติเด่นโดยทั่วไปคือ

1. สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอินพุตแบบเชิงเส้นได้ดี ( excellent linearity )
2. มีสัญญาณรบกวนต่ำ ( low noise )
3. ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้าง ( wide spectral response )

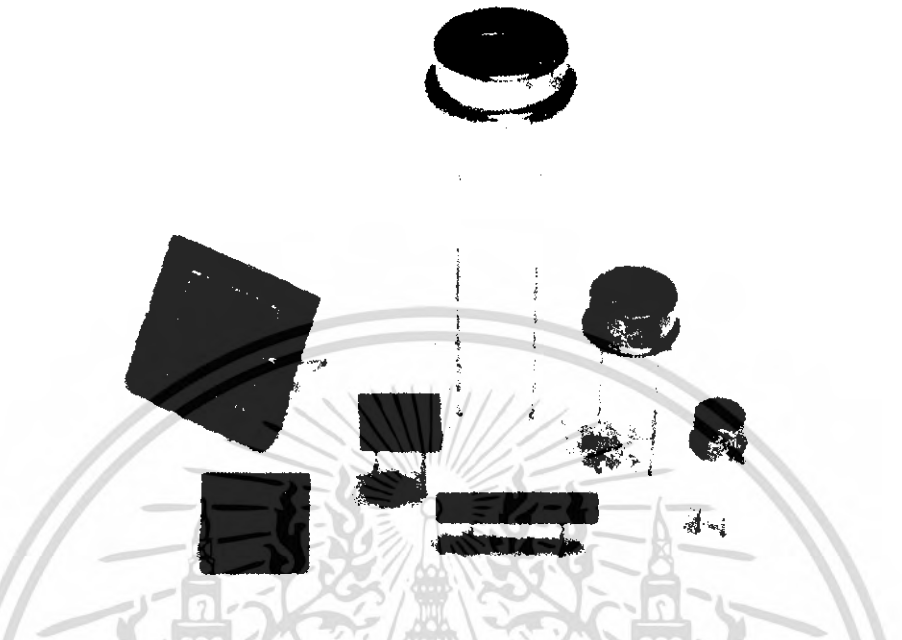
4. มีความทนทานทางกลศาสตร์ (mechanical ruggedness)
5. มีขนาดกะทัดรัดและเบา (compact & light weight)
6. มีอายุการใช้งานยาวนาน (long life time)

รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ รูปที่ 2.17 แสดงตัวอย่างภาพโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตในเชิงพาณิชย์ จุดเด่นของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ สรุปโดยสังเขปได้ดังนี้

โฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ	คุณสมบัติเด่น
 โฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย
 โฟโตไดโอดชนิดซิลิคอนที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย ตอบสนองเร็ว และมีความไวสูง
 โฟโตไดโอดชนิด p-n ซิลิคอน	กระแสไฟฟ้ามืดมีค่าน้อย ตอบสนองเร็ว และมีความไวสูง ตัดทอนแสงอินฟราเรด
 พินโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน	ตอบสนองเร็วมาก
 โฟโตไดโอดชนิดขดตักของ GaAsP, GaP	ตอบสนองแสงย่าน อัลตราไวโอเล็ต
 อะวาลานซ์โฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน	มีความสามารถขยายสัญญาณ ตอบสนองเร็วมาก

รูปที่ 2.6 ตัวอย่างโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างภาพโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ

1) โฟโตไดโอดชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชัน (Planar diffusion type) มีโครงสร้างเป็นรอยต่อ pn และมีฉนวน  $SiO_2$  เคลือบทับ มีกระแสไฟฟ้ามีค่าน้อย วัสดุที่ใช้ได้แก่ Si GaAsP GaP Ge และ GaAs เป็นต้น

2) โฟโตไดโอดชนิดพลาแนร์ดิฟฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ (low capacitance planar diffusion type) เป็นชนิดที่ออกแบบให้สารเจือในชั้น n มีปริมาณน้อย ทำให้ชั้น n มีความต้านทานสูงและชั้นปลอดพาหะค้อยข้างหนา เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าน้อย ทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วมาก ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าเพียง 1 ใน 10 ของชนิดแรก นอกจากนี้เนื่องจากชั้น p มีความบางมาก จึงตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

3) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ  $pn^+$  สารกึ่งตัวนำชั้น  $n^+$  มีค่าสภาพความต้านทานต่ำโดยการโคปด้วยสารเจือปนปริมาณมาก ๆ และชั้น  $n^+$  หนามาก ๆ จนทำให้ที่รอยต่อระหว่างชั้น n และชั้น  $n^+$  เปรียบเสมือนชั้นปลอดพาหะ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด จึงใช้วัดแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

4) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pin หรืออินโฟโตไดโอด ที่บริเวณตรงระหว่างชั้น p และ n มีการใส่ชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic ย่อว่า i) ทำให้โฟโตไดโอดทำงานได้รวดเร็ว

มากเป็นพิเศษ เพราะชั้น  $i$  หนาและมีค่าเป็นคาปาซิแตนซ์น้อยมาก ในการใช้งานจะใช้วิธีไบอัสแบบย้อนกลับจึงทำให้กระแสไฟฟ้าวามีค่าน้อย

5) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky Photodiode) เป็นโฟโตไดโอดรอยต่อชอตต์กีแบร์เรียร์ ใช้วิธีเคลือบโลหะที่บางมาก ๆ สงบนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อชอตต์กีแบร์เรียร์ เช่น เคลือบทองคำลงบน GaAsP ชนิด  $n$  เนื่องจากโลหะที่เคลือบนั้นบางมาก ดังนั้นโฟโตไดโอดชนิดนี้จึงตอบสนองต่อแสงตั้งแต่ย่านมองเห็นไปจนถึงย่านอัลตราไวโอเล็ตได้ดี

6) โฟโตไดโอดชนิดอวาแลนซ์ (Avalanche photodiode) เป็นโฟโตไดโอดที่มีการขยายสัญญาณอยู่ภายใน ทำงานโดยใช้สนามไฟฟ้าสูงป้อนเข้าสู่รอยต่อ  $pn$  แบบย้อนกลับจนทำให้พาหะที่ถูกกระตุ้นด้วยแสงถูกเร่งให้วิ่งไปชนกับอะตอมตัวอื่น ๆ และเกิดอิเล็กตรอนชุดที่ 2 (secondary electrons) ขึ้นมาใหม่ กระบวนการเช่นนี้เกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์อวาแลนซ์ (Avalanche effect) ทำให้สามารถตรวจวัดแสงที่มีความเข้มต่ำ ๆ ได้ดี เพราะโฟโตไดโอดชนิดนี้มีกลไกของการขยายสัญญาณอยู่ภายใน นอกจากนี้ก็มีผลตอบสนองที่เร็วมากด้วย

### 2.2.3.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด

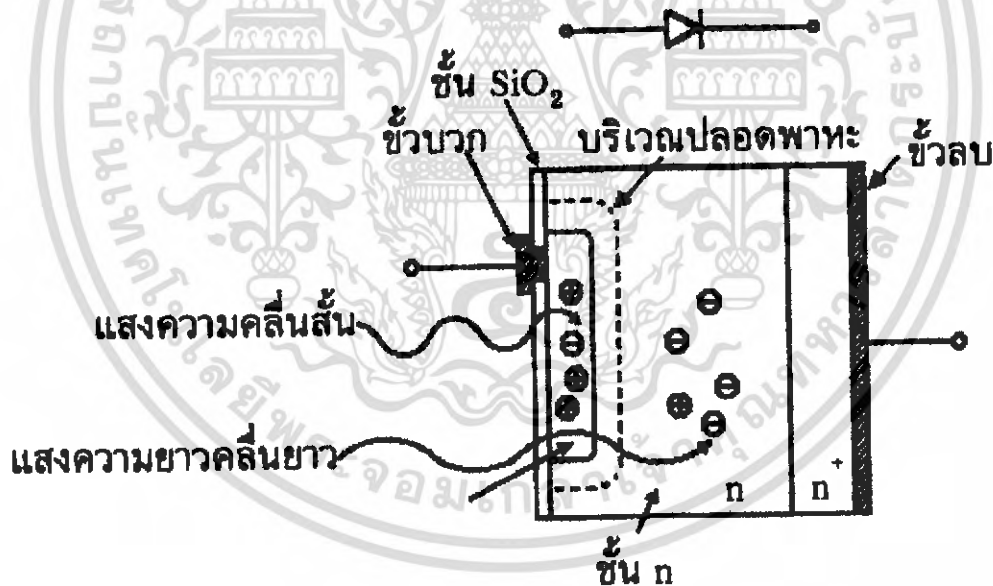
ในการเรื่องนี้จะอธิบายหลักการทำงานของโฟโตไดโอด ที่มีโครงสร้างพื้นฐานชนิดรอยต่อ  $pn$  รูปที่ 2.9 แสดงตัวอย่างภาพตัดขวางของไดโอด ที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด  $p$  และต่อติดกับชนิด  $n$  เป็นรอยต่อ  $pn$  ที่รอยต่อ  $pn$  นี้ทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ในกรณีโฟโตไดโอดที่ทำจากวัสดุพหุซิลิคอนนั้น ชั้น  $p$  เตรียมได้จากการแพร่ซึมธาตุโบรอน (B) เข้าสู่ซิลิคอนด้วยความลึกประมาณ  $1\mu m$  ที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ  $pn$  เป็นย่านปลอดพาหะ ในการผลิตจริงจะมีการควบคุมความหนาและปริมาณการโดปสารเจือปนของชั้น  $p$  ชั้น  $n$  และชั้นล่างสุด ( $n^+$ ) ให้เหมาะสมซึ่งจะช่วยให้โฟโตไดโอดไวต่อแสงในย่านที่ต้องการได้ และสามารถทำงานที่ย่านความถี่สูงที่ต้องการได้

เมื่อมีแสงตกกระทบโฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ กล่าวคือถ้า

$$h\nu \geq E_g \quad (2.5)$$

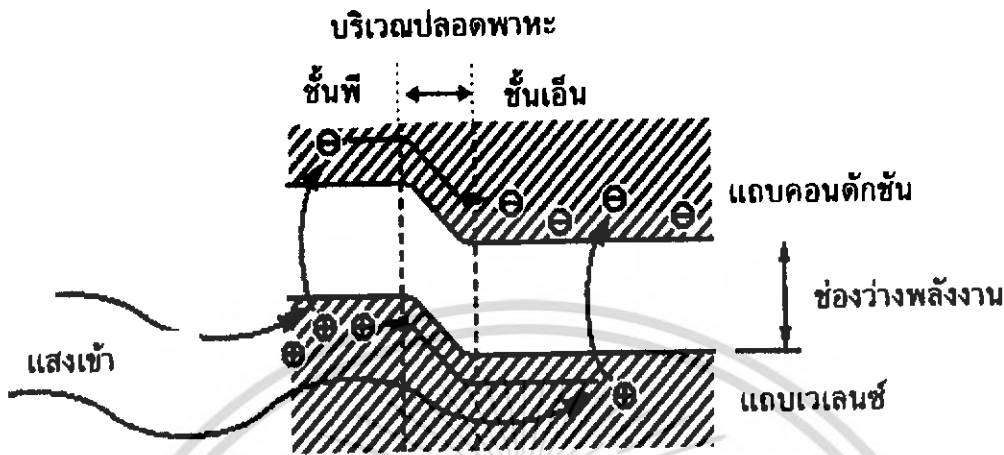
แสงก็จะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยพลังงานฟิสิกของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่แถบคอนดักชัน และที่แถบวาเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่

รูปที่ 2.9 แสดงลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn การเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p ชั้นปลอดพาหะ และชั้น n อิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้น p จะแพร่กระจายไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบคอนดักชันในชั้นปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) พัดพาให้วิ่งไปสู่ชั้น n ส่วนในกรณีโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ จะไหลจากแถบวาเลนซ์ในชั้น n หรือชั้นปลอดพาหะไปสู่ชั้น p จำนวนของการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลนั้นจะแปรผันตรงกับจำนวนฟิสิกของแสง (photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน อิเล็กตรอนที่สะสมอยู่ในชั้น n จะทำให้ชั้น n มีประจุเป็นลบและโฮลที่ไปสะสมในชั้น p จะทำให้ชั้น p มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก ต่อจากนั้นถ้าเราต่อโฟโตไดโอดกับวงจรภายนอก อิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น n และโฮลก็จะไหลออกจากชั้น p ไปสู่วงจรภายนอก



รูปที่ 2.8 ตัวอย่างภาพตัดขวางแสดงโครงสร้างพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

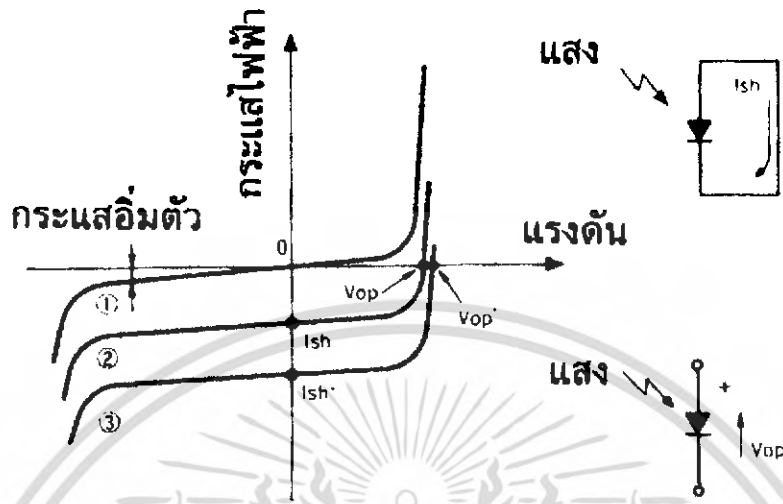


รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ pn

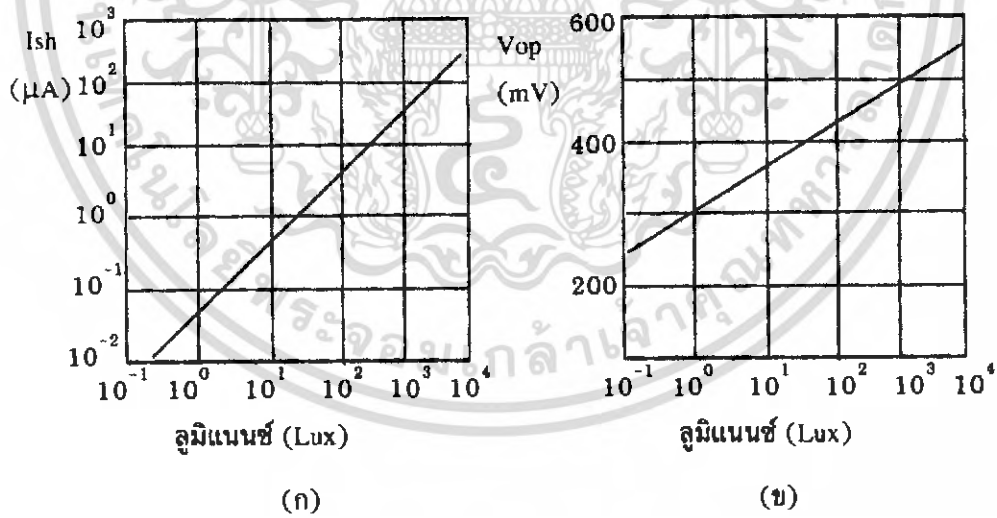
### 2.2.3.3 เส้นกราฟลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้า

ในขณะที่ยังไม่ส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอด ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในสภาวะมืด จะมีรูปร่างเหมือนของไดโอดที่ใช้เป็นตัวเรกติฟายเออร์ดังแสดงในรูปที่ 2.10 (เส้นหมายเลข 1) เมื่อส่องแสงเข้าสู่โฟโตไดโอดจะทำให้เส้น I-V เลื่อนแบบขนานไปสู่หมายเลข 2 และถ้าความเข้มของแสงมากขึ้นก็จะเป็นหมายเลข 3 ในขณะที่กำลังส่องแสงอยู่ถ้าเราทำการวัดกระแสลัดวงจรโฟโตไดโอดจะได้ค่า  $I_{sh}$  หรือ  $I'_{sh}$  โดยกระแสไฟฟ้าจะไหลจากแอโนดไปสู่แคโทด ถ้าเป็นวงจรเปิดเราจะได้แรงดันวงจรเปิด  $V_{OP}$  หรือ  $V'_{OP}$  และโดยทั่วไปกระแสไฟฟ้าลัดวงจร  $I_{sh}$  จะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มของแสงในลักษณะเชิงเส้นตรงที่ตีมาดังแสดงในรูปที่ 2.11 (ก)

ถ้าความเข้มของแสงอยู่ในช่วง  $10^{-12} - 10^{-3}$  (W)  $I_{sh}$  จะเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงประมาณ 6-8 หลัก ความเข้มของแสงที่ต่ำที่สุดที่ยังคงทำให้  $I_{sh}$  เปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงจะขึ้นกับค่า NEP (Noise Equivalent Power) ของโฟโตไดโอด ส่วนความเข้มของแสงที่สูงที่สุดที่ยังคงทำให้  $I_{sh}$  เป็นเส้นตรงจะขึ้นอยู่กับค่าสภาพความต้านทานของโหลดและแรงดันไบแอสย้อนกลับดังสมการต่อไปนี้



รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติของกระแสไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าในโฟโตไดโอด  
 เส้นหมายเลข 1 แสดงในสภาพมืดและมีรูปร่างเหมือนของไดโอดทั่วไป  
 เส้นหมายเลข 2 และ 3 แสดงในสภาพมีแสงและเส้นกราฟจะเคลื่อนลงด้านล่าง



รูปที่ 2.11 (ก) ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าลัดวงจร  $I_{sh}$  ของโฟโตไดโอดและความเข้มของแสงอินฟราเรด

(ข) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันวงจรเปิด  $V_{OP}$  และความเข้มของแสงอินฟราเรด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$P_{\max} = \frac{V_{Bi} + V_R}{(R_s + R_L) \cdot R_L} \quad (2.6)$$

โดยที่  $P_{\max}$  : ความเข้มของแสงที่สูงสุดที่กระแสไฟฟ้ายังเปลี่ยนแบบเชิงเส้นตรงกับความเข้มของแสง

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

$V_R$  : แรงดันป้อนย้อนกลับ (V)

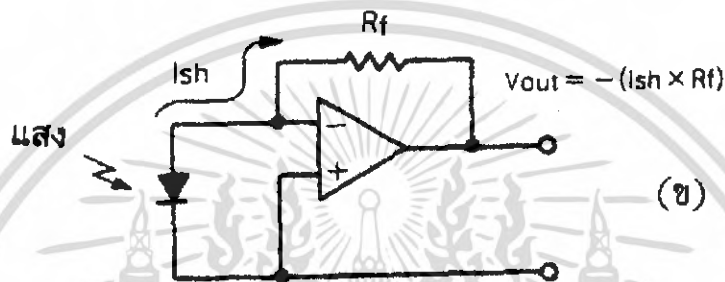
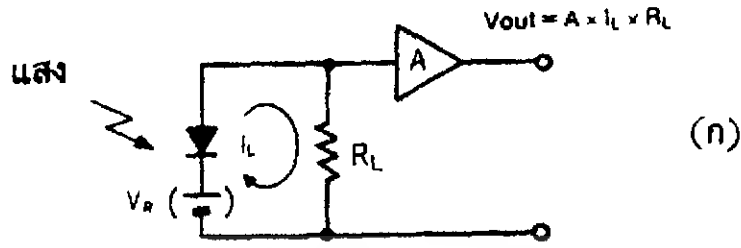
$R_L$  : ความต้านทานโหลด ( $\Omega$ )

$R_s$  : เรสพอนซิวิตีหรือความไวของโฟโตไดโอด (A/W) ที่ความยาวคลื่น  $\lambda$

$R_s$  : ความต้านทานอนุกรม ( $\Omega$ )

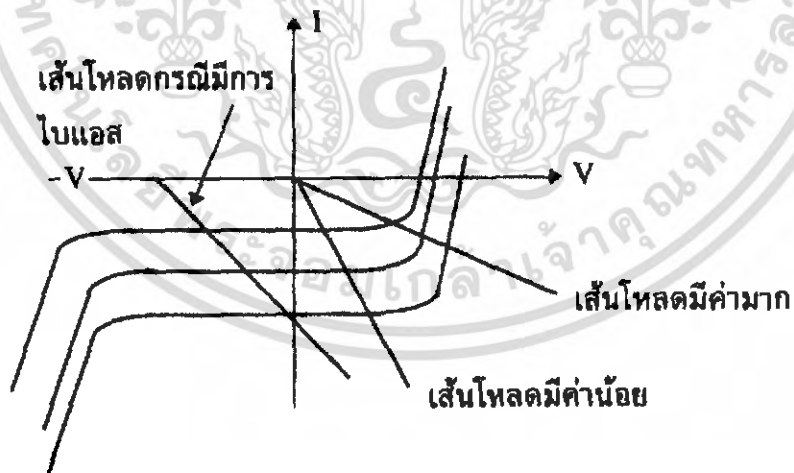
เนื่องจากแรงดันวงจรมืด  $V_{OP}$  แปรผันตรงกับค่า  $\ln P$  (P คือ ความเข้มของแสง) และเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิจึงทำให้  $V_{OP}$  เปลี่ยนแปลงมากด้วย ดังนั้นจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้  $V_{OP}$  เป็นเกณฑ์ในการวัดความเข้มของแสง

การใช้กระแสลัดวงจร  $I_{sh}$  เป็นเกณฑ์ในการวัดความเข้มของแสงทำได้โดยการใช้วงจรดังแสดงในรูปที่ 2.12 ในรูป (ก) มีโหลดตัวต้านทาน  $R_L$  ต่ออยู่ที่เอาต์พุตของโฟโตไดโอด ดังนั้นแรงดัน  $I_{sh} \times R_L$  จึงสามารถขยายได้โดยใช้แอมพลิฟายเออร์ A และถ้ามีการไบอัสย้อนกลับด้วยแรงดัน  $V_R$  จะช่วยให้สามารถวัดแสงที่มีการเปิดและปิดแสงด้วยความเร็วสูงได้เร็วขึ้น แต่มีข้อเสียที่ลักษณะเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าและความเข้มของแสงในวงจรมืดไม่ค่อยจะดีนัก รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะสมบัติของ I-V และเส้นโหลด



รูปที่ 2.12 การวัดความเข้มของแสงด้วยโฟโตไดโอด

- (ก) ทำการไบอัสแบบย้อนและวัดแรงดันไฟฟ้าคร่อมโหลด  $R_L$
- (ข) ต่อโฟโตไดโอดกับออปแอมป์และวัดกระแสไฟฟ้าลัดวงจร

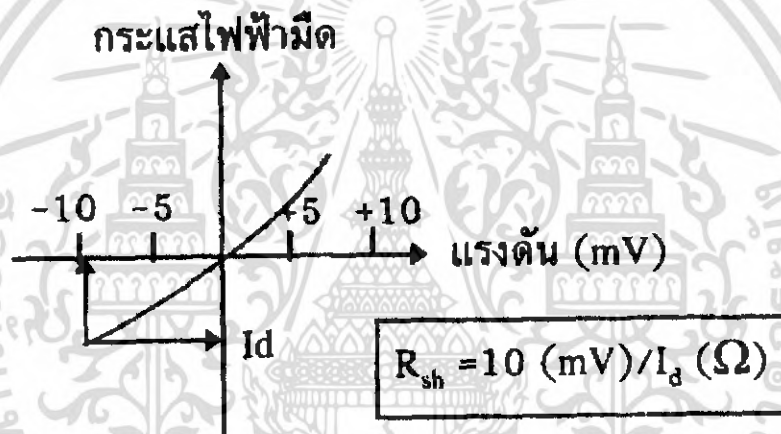


รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติของเส้น I-V ในสภาพมืดของโฟโตไดโอดและเส้นโหลด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.12 ( ข ) เป็นวิธีการใช้ออปแอมป์แบบวงจรป้อนกลับซึ่งความต้านทานอินพุตสมมูล ( equivalent input resistance ) มีค่าน้อยกว่า  $R_f$  หลายหลัก ทำให้สามารถใช้วงจรมีขีด  $I_{sh}$  ให้ได้ค่าใกล้เคียงกับค่าอุดมคติได้ดีมาก

รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะสมบัติ I-V ในสภาพมิด โดยขยายสเกลให้ใหญ่ให้เห็นชัดในช่วง  $-10$  mV ถึง  $+10$  mV ( ขยายจากรูปที่ 2.10 ) จากรูปนี้จะเห็นว่ากระแสไฟฟ้ามิดไหลในลักษณะเชิงเส้นตรงกับแรงดัน เราสามารถคำนวณค่าความต้านทานจันต์  $R_{sh}$  ได้จากความลาดของเส้นตรงนี้ ความต้านทานจันต์นี้เป็นสาเหตุของการเกิดกระแสไฟฟ้ารบกวนชนิดเทอร์มอล ( thermal noise current ) ผู้ผลิตทั่วไปจะให้ค่า  $I_d$  ที่แรงดันไบแอสย้อนกลับ  $V_R = -10$  mV ซึ่งผู้ใช้สามารถคำนวณหาค่า  $R_{sh}$  ได้จากสูตร  $R_{sh} = 10(\text{mV})/I_d\Omega$



รูปที่ 2.14 ลักษณะสมบัติเส้น I-V ในสภาพมิดของโฟโตไดโอด โดยขยายสเกลให้ใหญ่ให้เห็นชัดในช่วง  $-10$  mV ถึง  $+10$  mV

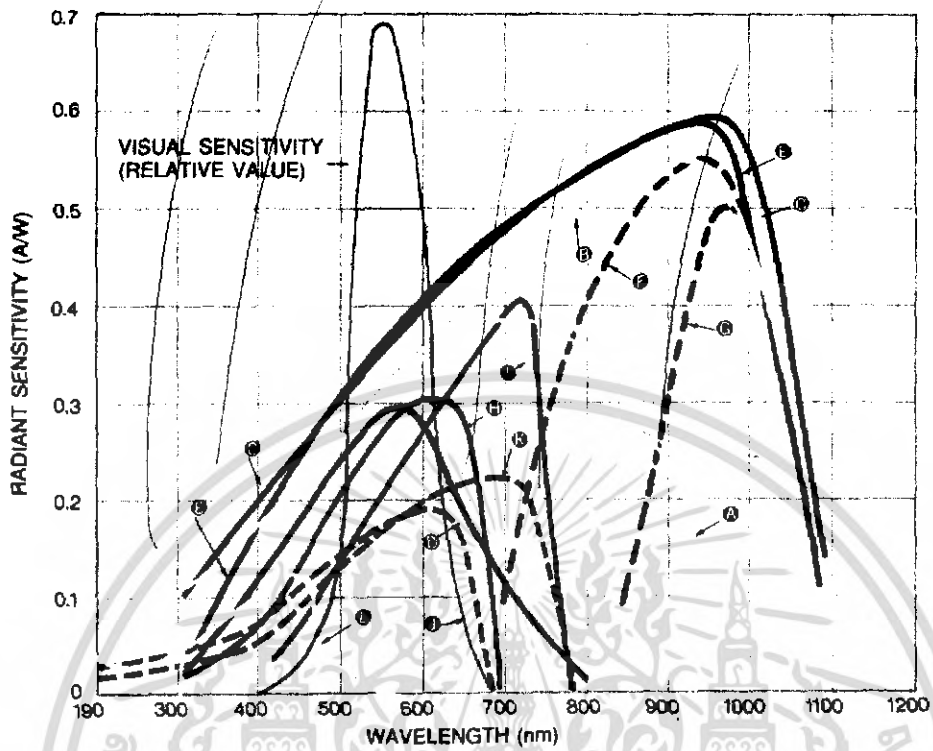
### 2.2.3.4 ลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด

#### 2.2.3.4.1 สเปกตรัมผลตอบสนอง

ได้กล่าวไว้ในหัวข้อที่แล้วว่า ถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่าน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $E_g$ ) จะไม่เกิดการดูดกลืนแสง ความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกดูดกลืนได้จะต้องมีค่าดังนี้

$$\lambda \leq \frac{1240}{E_g} \quad (\text{nm}) \quad (2.7)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชนิดของโฟโตไดโอด	คุณสมบัติเด่น	ช่วงตอบสนอง (nm)	ขอบสเปกตรัม (nm)	สัญลักษณ์ในรูป
โฟโตไดโอดชนิด Si	ตอบสนองย่านอัลตราไวโอเลต ถึง แสงมองเห็น	190-1000	720	A
	ตอบสนองย่านอัลตราไวโอเลต ถึง อินฟราเรด	190-1100	960	B
	ตอบสนองย่านแสงมองเห็น ถึง อินฟราเรด	320-1100	960	C
	ตอบสนองย่านแสงมองเห็น	320-730	560	D
พินโฟโตไดโอดชนิด Si	ตอบสนองเร็วมาก สำหรับการสื่อสารด้วยแสง การเชื่อมข้อมูลด้วยเส้นใยแสง	320-1100	960	E
	ชนิดไม่ตอบสนองต่อแสงมองเห็น	700-1100	960	F
	ชนิดไม่ตอบสนองต่อแสงมองเห็น	840-1100	980	G
โฟโตไดโอดชนิด GaAsP (ชนิดแพร์ซิม)	ตอบสนองย่านแสงมองเห็น	300-680	640	H
	ตอบสนองย่านแสงมองเห็นและไวต่อแสงสีแดง	400-760	710	I
โฟโตไดโอดชนิด GaAsP (ชนิดชอตต์กี)	ตอบสนองย่านอัลตราไวโอเลต ถึง แสงมองเห็น	190-680	610	J
	ตอบสนองย่านแสงมองเห็นและไวต่อแสงสีแดง	190-760	710	K
โฟโตไดโอดชนิด GaP	ตอบสนองย่านแสงอัลตราไวโอเลตถึง สีเขียว	190-550	440	L

รูปที่ 2.15 ตัวอย่างลักษณะสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

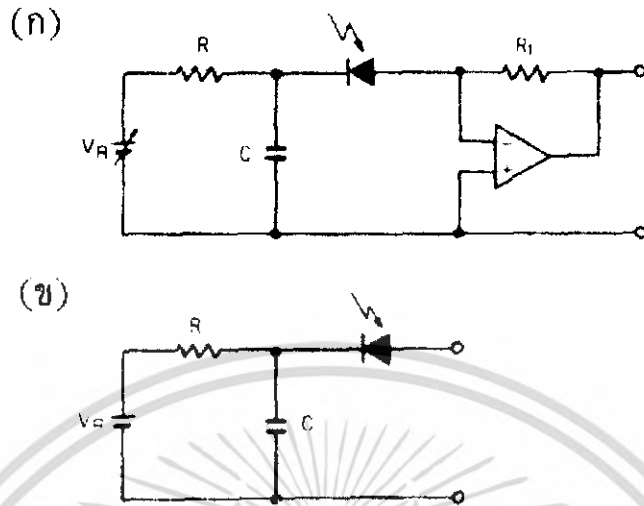
ตัวอย่างเช่น ที่อุณหภูมิห้อง กระจกของวัสดุ Si มีค่า  $E_g$  เท่ากับ 1.1 eV ดังนั้น ความยาวคลื่นของแสงที่จะถูกดูดกลืนด้วย Si ต้องสั้นกว่า 1100 nm หรือกระจกของวัสดุ GaAs ต้องสั้นกว่า 700 nm ตัวอย่างลักษณะสเปกตรัมผลตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดแสดงดังรูปที่ 2.15 การที่สเปกตรัมมีลักษณะเป็นเพราะว่าระยะทางแทรกซึม (penetration depth) ของแสงจะลดลงเมื่อความถี่สั้นลง ดังนั้นผลตอบสนองความยาวคลื่นสั้นจึงลดลงด้วย

ขีดจำกัดทางด้านความยาวคลื่นแสงที่โฟโตไดโอดจะตอบสนองได้นั้น นอกจากจะขึ้นกับวัสดุสารกึ่งตัวนำแล้ว ยังขึ้นกับความสามารถในการทะลุผ่านแสงของวัสดุกระจกด้านหน้าของโฟโตไดโอดด้วย ตัวอย่างเช่น กระจกชนิดโบรอนซิลิเกต (boron-silicon glass) ให้แสงที่มีความยาวคลื่นยาวกว่า 300 nm ผ่านได้ ถ้าต้องการให้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นกว่า 300 nm ต้องใช้หน้าต่างกระจกชนิดควอตซ์ (quartz)

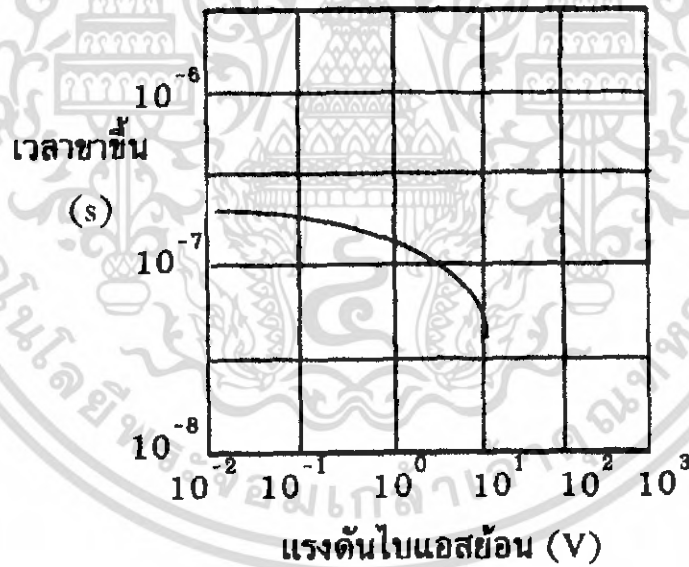
#### 2.2.3.4.2 การไบอัสย้อนโฟโตไดโอด

เนื่องจากโฟโตไดโอดทำงานโดยใช้ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก (photovoltaic effect) ดังนั้นโฟโตไดโอดสามารถให้สัญญาณไฟฟ้าเอาต์พุตได้แม้จะไม่มีภาระป้อนพลังงานไฟฟ้าจากวงจรภายนอก แต่การป้อนแรงดันไบอัสแบบย้อนเข้าสู่โฟโตไดโอดขณะทำงานจะช่วยทำให้โฟโตไดโอดมีความเร็วตอบสนองได้ดีขึ้นและมีคุณสมบัติเชิงเส้นที่ดีขึ้น โดยปกติกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตของโฟโตไดโอดขึ้นกับความเข้มของแสงกล่าวคือ การเกิดจำนวนคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลขึ้นกับความเข้มของแสง อย่างไรก็ตามเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับจะทำให้ขึ้นพลอดพาหะมีความหนาเพิ่มขึ้นได้บ้าง

รูปที่ 2.16 แสดงตัวอย่างวงจรการไบอัสย้อนกลับให้โฟโตไดโอด รูปที่ 2.17 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขาขึ้นและแรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการไบอัสย้อนกลับทำให้ช่วงเวลาขาขึ้นสั้นลง รูปที่ 2.18 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตและความเข้มของแสงโดยมีแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_R$  เป็นพารามิเตอร์ซึ่งจะเห็นว่าเมื่อเพิ่ม  $V_R$  จะทำให้คุณสมบัติเชิงเส้นของโฟโตไดโอดดีขึ้น อย่างไรก็ตามแม้ว่าการไบอัสย้อนกลับจะมีข้อดีแต่ขณะเดียวกันก็มีข้อเสียด้วย เช่น ทำให้มีกระแสไฟฟ้ามืดและสัญญาณรบกวนเพิ่มขึ้น และการไบอัสย้อนกลับที่ค่าแรงดันสูงมาก ๆ จนเกินขีดจำกัด จะทำให้โฟโตไดโอดเสียหาย

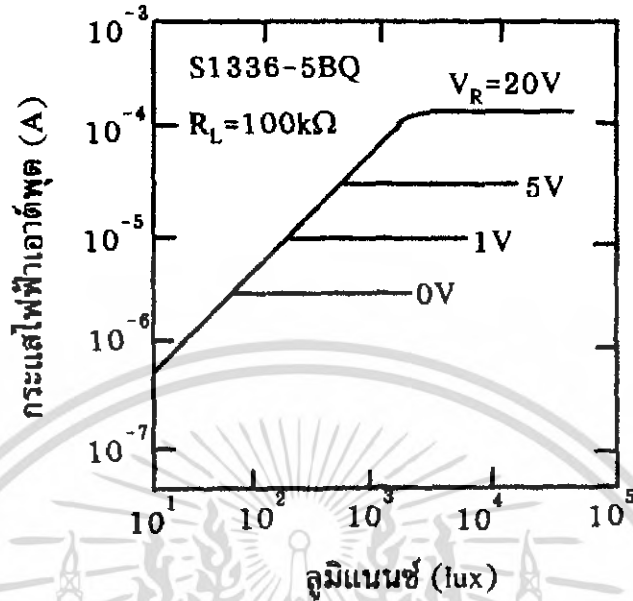


รูปที่ 2.16 ตัวอย่างวงจรสำหรับไบอัสให้โฟโตไดโอด



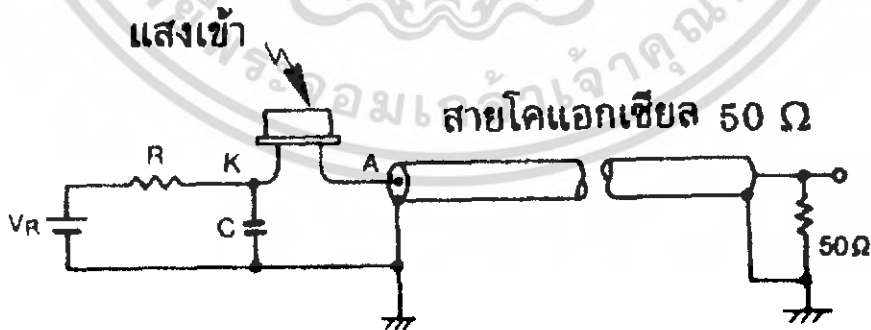
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาขาขึ้นของโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอน และแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งจะเห็นได้ว่า การไบอัสย้อนกลับจะทำให้ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าสั้นลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าอินพุตของโฟโตไดโอดชนิดซิลิคอนและความเข้มของแสง โดยมีแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_R$  เป็นพารามิเตอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อเพิ่ม  $V_R$  จะทำให้คุณสมบัติเชิงเส้นของโฟโตไดโอดดีขึ้น

โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n มีความเร็วตอบสนองที่ดีมาก อีกทั้งทนต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ค่าสูงมาก ๆ ได้ดี และกระแสไฟฟ้ามืดก็มีค่าน้อย จึงสามารถใช้โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ p-i-n เป็นต้นกำเนิดแสงในระบบสื่อสารด้วยแสงและในระบบปริโมคคอนโทรลต่าง ๆ ได้ดี



รูปที่ 2.19 ตัวอย่างการต่อโฟโตไดโอดจากรูปที่ 2.16(ข) โดยมีโหลดความต้านทาน  $50\Omega$  ต่ออยู่

รูปที่ 2.19 แสดงตัวอย่างการต่อวงจรจริงของรูปที่ 2.16 (ข) โดยมีโหลดความต้านทาน  $50\Omega$  ต่ออยู่ ตัวเก็บประจุชนิดเซรามิก C ใช้สำหรับช่วยลดอินพุตอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายไฟฟ้า และตัวต้านทาน R ใช้สำหรับป้องกันไม่ให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านโฟโตไดโอดมากเกินไปจนเกิดความเสียหาย การออกแบบให้แรงดันตกคร่อม R ซึ่งเกิดจากกระแสไฟฟ้าโฟโตมีค่าน้อยกว่าแรงดันไบอัสมาก ๆ

#### 2.2.3.4.3 อิทธิพลของอุณหภูมิ

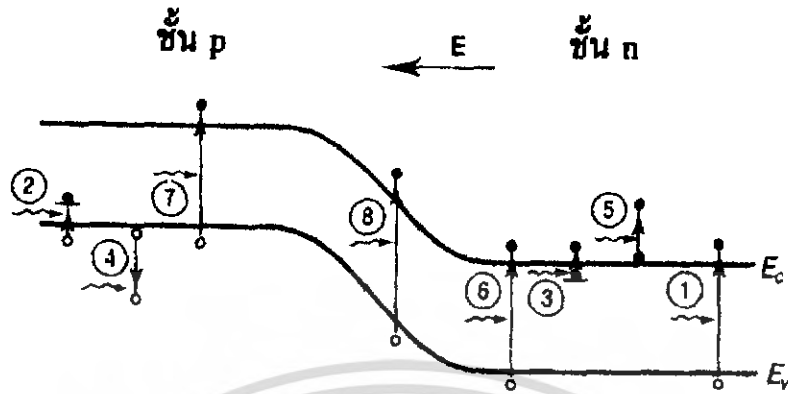
อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำงานของโฟโตไดโอดมาก การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงและกระแสไฟฟ้าที่เกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการคูณแสงมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวขึ้น ในขณะที่ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นลดลง

#### 2.2.3.5 กลไกการคูณแสงและการผลิตกระแสไฟฟ้าโฟโต

ในเรื่องที่ผ่านมานั้นได้อธิบายเกี่ยวกับหลักการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอด โดยได้กล่าวไว้ว่า โฟโตไดโอดจะผลิตกระแสไฟฟ้าเมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่า หรือเท่ากับ ช่องว่างพลังงานของวัสดุสารกึ่งตัวนำ แต่เรายังไม่ได้มีการพิจารณากันอย่างละเอียดว่าการคูณแสงก็คือการผลิตพาหะโฟโตก็คือนั้น เกิดขึ้นที่ส่วนใดของโฟโตไดโอด ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการออกแบบและผลิตโฟโตไดโอดให้มีประสิทธิภาพ

รูปที่ 2.20 แสดงสภาพกำลังมีแสงส่องเข้าไปด้านชั้น p และกำลังมีการไบอัสแบบย้อนกลับที่รอยต่อ pn หมายเลขต่าง ๆ ในรูปแสดงกลไกการคูณแสงในลักษณะต่าง ๆ โดยหมายเลขต่าง ๆ มีความหมายดังต่อไปนี้

- 1) เป็นการคูณแสงด้วยสารกึ่งตัวนำ ซึ่งอยู่เข้าไปด้านหลังและห่างไกลจากชั้นปลอดพาหะ (ในรูปนี้ชั้น n อยู่ด้านหลัง แต่อาจสลับกับชั้น p ก็ได้) ถ้าแสงมีพลังงานโฟตอนมากกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานก็จะทำให้เกิดการคูณแสงและเกิดคู่อิเล็กตรอน/โฮลได้ แต่เนื่องจากไม่มีสนามไฟฟ้าในชั้นนี้ ดังนั้นพาหะที่เกิดจาก 1) นี้ จะเคลื่อนที่ได้ด้วยวิธีการแพร่ซึมเท่านั้น ซึ่งพาหะอิเล็กตรอนและโฮลส่วนใหญ่จะรวมตัวกันมากกว่าจึงไม่มีบทบาทต่อเอาต์พุตมากนัก
- 2) เป็นการคูณแสงในชั้น p ระหว่างแถบวาเลนซ์และระดับแอกเซ็ปเตอร์ แต่ในที่สุดพาหะอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ก็จะตกลงมารวมตัวกับโฮลจึงไม่มีบทบาทต่อเอาต์พุตเช่นกัน
- 3) เหมือนกรณีข้อ 2) แต่เป็นการเปลี่ยนสถานะระหว่างระดับโคนอร์และแถบคอนดักชัน และไม่มีผลต่อเอาต์พุต



รูปที่ 2.20 กลไกการดูดกลืนแสงแบบต่างๆ ในรอยต่อ pn ในสภาพกำลังมีการไบอัสย้อนกลับ

4) เป็นการดูดกลืนแสงโดยโฮลอิสระ (free hole absorption) ในแถบวาเลนซ์ของชั้น p และเพียงแต่ระดับพลังงานของโฮลลดลงและระดับพลังงานของอิเล็กตรอนสูงขึ้นจึงไม่ก่อให้เกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

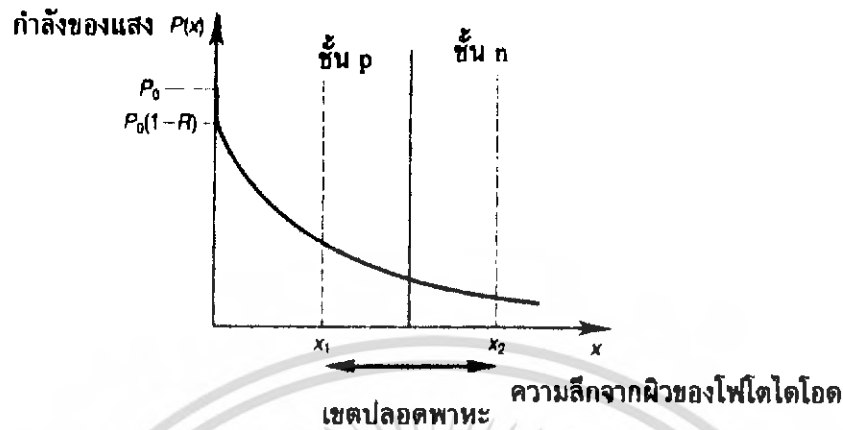
5) เหมือนกรณีข้อ 4) แต่เป็นการดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระในแถบคอนดักชัน และไม่มีผลต่อเอาต์พุต

6) เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น n ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างมากจะแพร่เข้าไปสู่ชั้น n ด้านหลังและพาหะโฮลข้างน้อยจะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้นปลอดพาหะและโฮลจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดให้ไหลไปสู่ชั้น p และโฮลเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

7) เหมือนกรณีข้อ 6) เป็นการดูดกลืนแสงในชั้น p ที่ตำแหน่งใกล้ชั้นปลอดพาหะมาก พาหะอิเล็กตรอนข้างน้อย จะมีความน่าจะเป็นสูงในการแพร่ซึมเข้าไปในชั้นปลอดพาหะและอิเล็กตรอน จะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะ กวาดให้ไหลไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนเหล่านี้จะมีผลต่อเอาต์พุต

8) เป็นการดูดกลืนแสงและคู่อิเล็กตรอน/โฮลในชั้นปลอดพาหะ พาหะอิเล็กตรอนและโฮลที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าในชั้นปลอดพาหะกวาดและแยกออกจากกันให้ไหลไปสู่ชั้น n และชั้น p และจะมีผลต่อเอาต์พุตมากที่สุด

จากที่กล่าวมาแล้ว กลไกหมายเลข 6) - 8) โดยเฉพาะอย่างยิ่งหมายเลข 8) จะมีผลในการผลิตกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตมากที่สุด



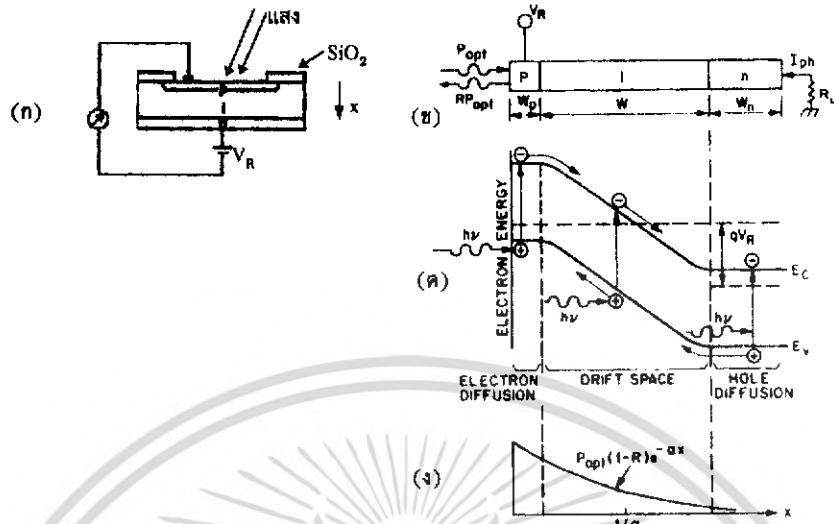
รูปที่ 2.21 การลดลงของกำลังของแสงตามระยะทางความลึกจากผิวของโฟโตไดโอดย่านปลอดพาหะอยู่ระหว่างตำแหน่ง  $x_1$  และ  $x_2$

### 2.3 พินโฟโตไดโอด

พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) คือ โฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโตไดโอดธรรมดาที่ระหว่างชั้น p และชั้น n จะมีชั้น i กั้นอยู่ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโคปนด้วยสารเจือปนด้วยปริมาณที่น้อยมาก ลักษณะเด่นของพินโฟโตไดโอดคือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ (junction capacitance) มีค่าน้อย จึงทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก (ultra-fast response speed) ถึงระดับพิโกวินาที ปัจจุบันมีการใช้งานพินโฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจรับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว เช่น ในระบบการสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์ ในอุปกรณ์ดิคตัม ในอุปกรณ์รีโมตคอนโทรลด้วยแสง เป็นต้น

#### 2.3.1 โครงสร้างและหลักการทำงานของพินโฟโตไดโอด

รูปที่ 2.22 (ก) แสดงโครงสร้างพื้นฐานของพินโฟโตไดโอด รูป (ข) แสดงความหนาของชั้นต่างๆ รูป (ค) แสดงแผนภาพพลังงานขณะไบอัสย้อนกลับ และรูปที่ 2.22 (ง) แสดงการเปลี่ยนแปลงของกำลังของแสงที่ลดลงตามระยะทางความลึกในพินโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.22 (ก) และ (ข) โครงสร้างพื้นฐานของฟิโนไดโอด (ค) แถบพลังงานของฟิโนไดโอดขณะไบอัสย้อนกลับ (ง) การลดลงของกำลังของแสงอินพุตตามระยะความลึกในฟิโนไดโอด

หลักการทํางานพื้นฐานของฟิโนไดโอดนั้นคล้ายกับกรณียของฟิโนไดโอด เพียงแต่แตกต่างกันตรงจุดที่ในฟิโนไดโอดนั้น จะมีชั้น  $i$  อยู่ระหว่างชั้น  $p$  และ  $n$  และผู้ผลิตสามารถสร้างชั้น  $i$  ซึ่งเป็นชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) จากวัสดุต่างๆ และให้มีความหนาต่างๆ ได้ตามความต้องการ ซึ่งในกรณีฟิโนไดโอดนั้น ความหนาของชั้นปลอดพาหะจะถูกกำหนดแต่เพียงด้วยปริมาณและวิธีการโคปสารเจือปนของรอยต่อ  $pn$

ในรูปที่ 2.22 เมื่อส่องแสงเข้าสู่ฟิโนไดโอดทางด้านชั้น  $p$  จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในชั้นต่างๆ ทั้งในชั้น  $p$  ชั้น  $i$  และชั้น  $n$  พาหะที่เกิดขึ้นจากแสงจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้ด้วยกลไก 2 ชนิดดังนี้คือ

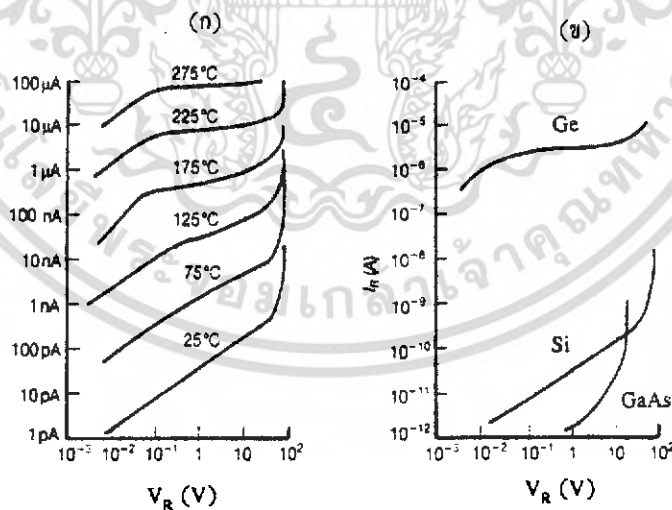
1) ถ้าพาหะอิสระเหล่านี้สามารถไหลออกสู่วงจรภายนอกได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล พาหะอิสระที่เกิดขึ้นในชั้น  $i$  จะมีบทบาทในการกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากที่สุด โดยพาหะจากชั้น  $i$  จะถูกพัดพาให้ไหลออกสู่วงจรภายนอกด้วยปรากฏการณ์พัดพาด้วยศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) โดยอิเล็กตรอนจะไหลออกทางชั้น  $n$  และโฮลจะไหลออกทางชั้น  $p$  กระแสไฟฟ้าที่ได้ในลักษณะเช่นนี้เรียกว่า “กระแสฟิโนไดโอด”  $J_{ph}$  (drift current) ชั้น  $i$  นี้เรียกว่าชั้นปลอดพาหะ

2) โฮลที่เกิดในชั้น  $n$  นั้น ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึม (diffusion length) ที่เพียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้น  $n$  ผ่านเข้าสู่ชั้น  $i$  และไหลไปสู่ชั้น  $p$  ได้ และกลายเป็น “กระแสไฟฟ้าการแพร่”  $J_{diff}$  (diffusion current) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดในชั้น  $p$  ถ้ามีระยะทางการแพร่ซึมที่ใกล้เคียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้น  $p$  เข้าสู่ชั้น  $i$  และชั้น  $n$  ได้ และจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าการแพร่ด้วย ดังนั้นกระแสไฟฟ้ารวม  $J_{total}$  ที่เกิดขึ้นในพินโฟโตไดโอด จึงเป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าดิฟฟิวชัน  $J_{dc}$  และกระแสไฟฟ้าการแพร่  $J_{diff}$  ดังนี้

$$J_{total} = J_{dc} + J_{diff} \quad (2.8)$$

โครงสร้างของพินโฟโตไดโอดที่มีการผลิตจริงแสดงตัวอย่างในรูปที่ 2.22 ในรูป (ก) แผ่นฐานได้แก่สารกึ่งตัวนำชนิด  $n$  ต่อจากนั้นมีการปลูกผลึกชนิด  $i$  ซ้อนทับและที่ผิวบนแพร่ซึมสารเจือปนให้เป็นชนิด  $p$  ชั้น  $p$  ด้านบนนี้จะบางมาก ที่ผิวบนจะมีชั้นฉนวนของ  $SiO_2$  เพื่อกำหนดตำแหน่งของขั้วไฟฟ้าด้านบน ลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้านบนนี้จะเปิดช่องออกเพื่อให้แสงเข้าสู่ชั้น  $p$  ได้โดยตรง อย่างไรก็ตามสามารถเปลี่ยนชนิดของสารกึ่งตัวนำสลับบนล่างให้เป็น  $nip$  ก็ได้เช่นกัน

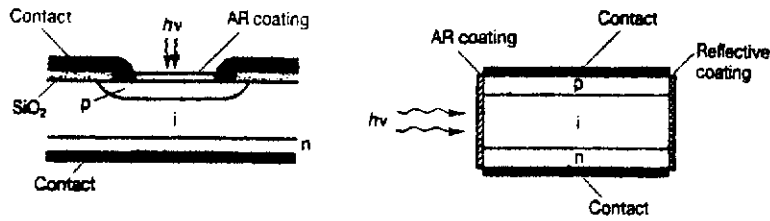
ส่วนรูป (ข) เป็นกรณีที่ออกแบบเพื่อให้แสงเข้าทางด้านข้าง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อไม่ต้องการให้การดูดกลืนแสงด้วยชั้น  $p$  ก่อนที่แสงจะเข้าถึงชั้น  $i$  และที่ด้านหลังมีการเคลือบวัสดุสะท้อนแสง แต่โครงสร้างนี้ต้องใช้แรงดันไบอัสสูงมาก เพราะชั้น  $i$  มีความหนาเป็นพิเศษ



รูปที่ 2.23 (ก) การขึ้นกับแรงดันไบอัสย้อนของกระแสไฟฟ้ามีดของพินโฟโตไดโอด

ชนิด Si โดยที่พารามิเตอร์คือ อุณหภูมิขณะทำงาน

(ข) การเปรียบเทียบกระแสไฟฟ้ามีดของพินโฟโตไดโอดชนิด Ge, Si และ GaAs



(ก) รอยต่อ pin ลักษณะของขั้วไฟฟ้าด้านบน จะเปิดช่องออกเพื่อให้แสงเข้าสู่ชั้น p ได้โดยตรง

(ข) การออกแบบเพื่อให้แสงเข้าทางด้านข้าง

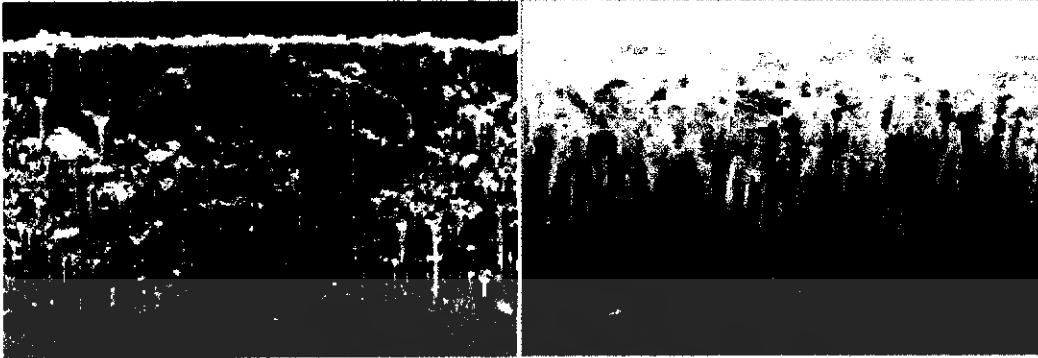
รูปที่ 2.24 ตัวอย่างโครงสร้างของพินโฟโตไดโอดที่มีการผลิตจริง

## 2.4 พอร์ซซิลิคอน (Porous Silicon)

หลังจากปี 1824 ซิลิคอนได้ถูกแยกออกเป็นธาตุบริสุทธิ์โดยนักเคมีชาวสวีเดน Jons Jacob Berkelium ในปี 1956 ได้พบว่าสามารถกัดเป็นพอร์สได้โดยวิธีการกัดแบบ Anodization โดย Uhler ซึ่งทำให้เริ่มมีการศึกษาถึงคุณสมบัติของพอร์ซซิลิคอนกันมากขึ้น และได้มีการค้นพบคุณสมบัติที่สำคัญในปี 1990 โดย Leigh Canham ว่าพอร์ซซิลิคอนสามารถเรืองแสงได้ ซึ่งทำให้ได้รับความสนใจจากทั่วโลก มีบทความจำนวนมากพยายามอธิบายถึงคุณสมบัติทางด้านเคมีและฟิสิกส์ของพอร์ซซิลิคอน ซึ่งสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวางในงานอิเล็กทรอนิกส์ ทางการแพทย์ เครื่องตรวจจับต่างๆ ฯลฯ

พอร์ซซิลิคอนนั้นเป็นวัสดุที่มีความซับซ้อน ซึ่งมีทั้งบริเวณที่เป็นระเบียบและไม่เป็นระเบียบ เชื่อว่าภายในของพอร์ซซิลิคอนอะตอมนั้น นอกจากจะมีการจัดเรียงอะตอมอย่างเป็นระเบียบเหมือนกับผลึกเดี่ยวซิลิคอน แต่ก็ยังพบว่ามีจุดบกพร่องของผลึก ช่องว่าง ระยะระหว่างช่องว่างและพันธะ Dangling bond กับอะตอมข้างเคียง ซึ่งโครงสร้างที่เล็กนี้สามารถพบได้ 2 รูปแบบ คือ จุดและแท่ง หรือแบบผสม

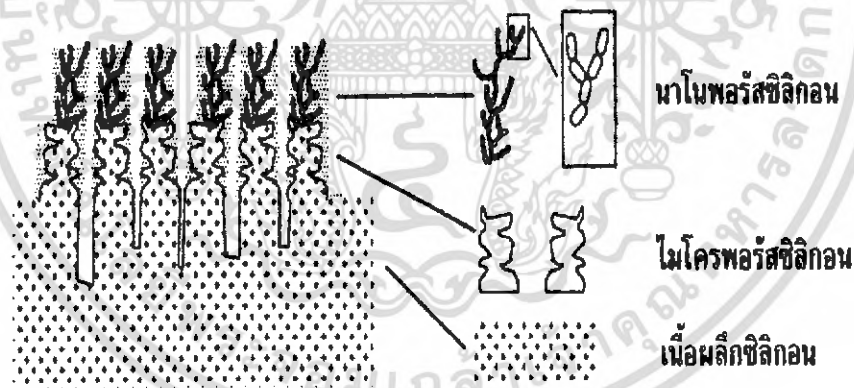
ผลึกขนาดเล็กระดับนาโนนี้ มีลักษณะแข็งเปราะและมีรูพรุน จึงทำให้ถูกเรียกว่า “พอร์ซซิลิคอน Porous Silicon”



รูปที่ 2.25 ภาคตัดขวางของโครงสร้างนาโนพอร์สซิลิกอน

#### 2.4.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอน คือ ผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยในชั้นความพรุนนี้ จะประกอบไปด้วยโครงสร้างของผลึกซิลิกอนเล็กๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร อยู่ถึง 2 ชั้นด้วยกัน โดยในแต่ละชั้นจะมีขนาดของโครงสร้างที่แตกต่างกันออกไป ดังรูปที่ 2.



รูปที่ 2.26 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน

จากภาพจะเห็นได้ว่าชั้นของพอร์สซิลิกอนจะประกอบด้วย

1. โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดโครงสร้างที่ใหญ่กว่า 50 นาโนเมตรขึ้นไป โดยโครงสร้างในชั้นนี้จะเป็นส่วนที่ติดกับเนื้อของพอร์สซิลิกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

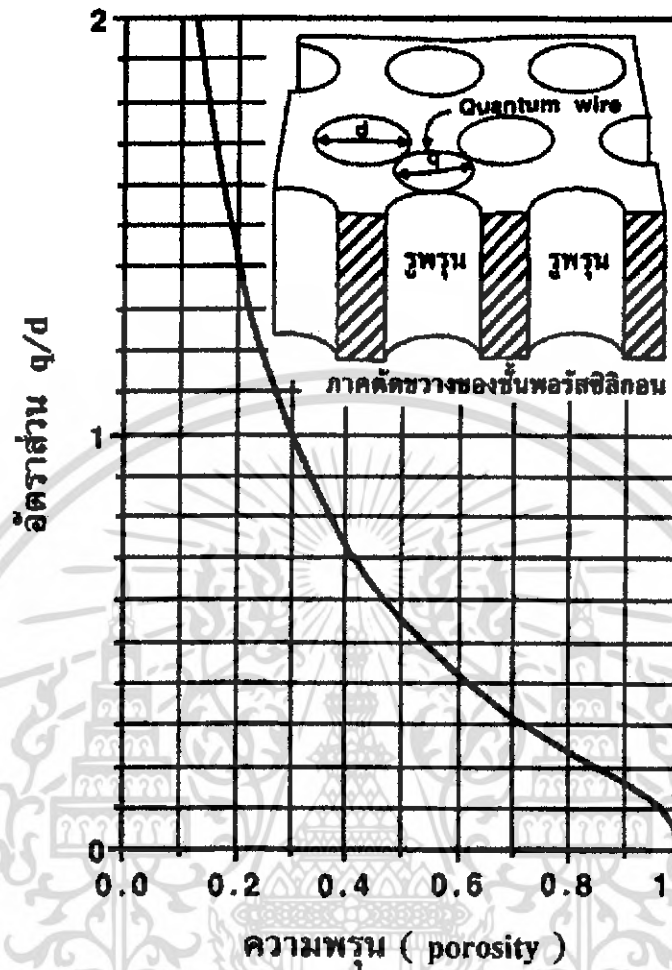
2. โครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอน เป็นชั้นของพอร์สซิลิกอนที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วงประมาณ 10 นาโนเมตรลงไป

โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิกอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาค้นคว้าโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน โดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิกอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิกอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิกอนไฮไดรด์ (Si : H) หรือซิลิกอนออกซิไฮไดรด์ (Si : O : H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไป

#### 2.4.2 ความพรุนของพอร์สซิลิกอน

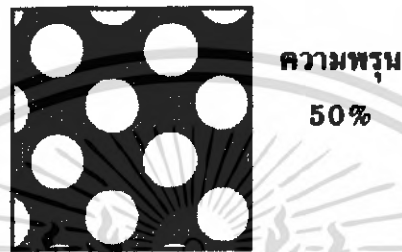
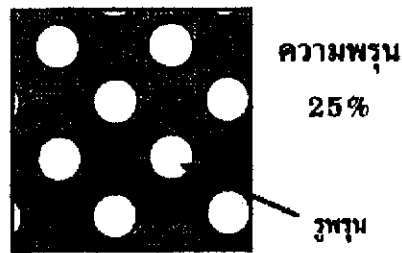
วัสดุใดๆ ก็ตามที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนจำนวนมากกระจายอยู่ภายในเนื้อของวัสดุ ก็จะได้ชื่อว่าวัสดุนั้นเป็นวัสดุที่มีความพรุน โดยค่าความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงลักษณะขนาดโครงสร้างของวัสดุได้อย่างคร่าวๆ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวลหรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

เป็นที่ทราบกันแล้วว่าพอร์สซิลิกอนนั้นก็คือ ผลึกซิลิกอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก โดยขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอนที่เหลือ และขนาดของรูพรุน จะมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร เนื้อของผลึกซิลิกอนในระดับนาโนเมตรนี้จะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตรกับขนาดของรูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน  
กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์ซซิลิกอน

จากรูปที่ 2.27 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์ซซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิคอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กลงๆ หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์ซซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

### 2.4.3 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิกอน

#### 2.4.3.1 แบ่งตามขนาดของแท่งพอร์ส

พอร์สซิลิกอนสามารถถูกแบ่งได้ตามขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์สได้เป็น 3 ประเภท ได้แก่

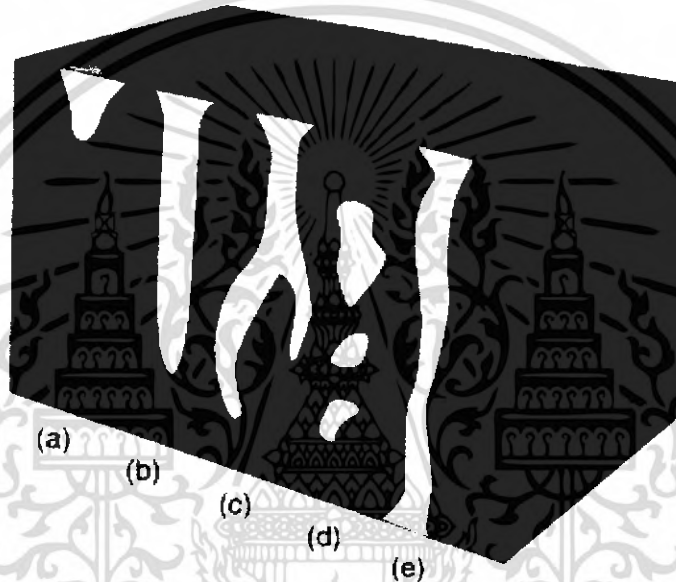
1. ไมโครพอร์ส (Micropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์สน้อยกว่า 10 นาโนเมตร
2. เมโซพอร์ส (Mesopore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์สระหว่าง 10 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมโครพอร์ส (Macropore) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแท่งพอร์ส 50 นาโนเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3.2 แบ่งตามลักษณะของรูพรุน

ลักษณะของรูพรุนของพอร์สมีหลายลักษณะ แบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทหลักๆ ได้แก่

1. Saccate หรือ Blind มีลักษณะเป็นรูตันและไม่มีการแยกของรูพรุน
2. Interconnected หรือ Banched มีลักษณะเป็นรูตันและมีการแยกออกหรือเชื่อมต่อของรู
3. Closed หรือ Totally Isolated มีลักษณะเป็นโพรงอากาศผิวปิดทุกด้าน
4. Through มีลักษณะเป็นรูกลางทะลุออกทั้งสองด้าน



รูปที่ 2.29 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สชนิดลักษณะต่างๆ ซึ่งลักษณะของแท่งพอร์สที่แตกต่างกันสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันได้

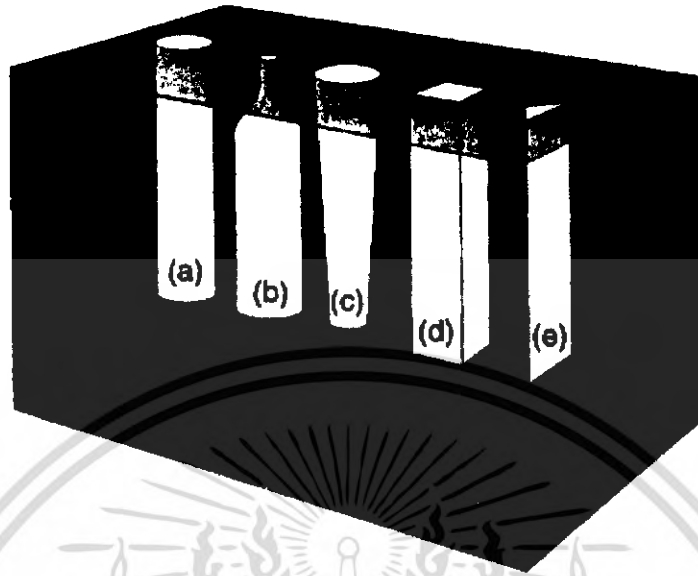
### 2.4.3.3 แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน

รูพรุนของพอร์สชนิดนอกเหนือจากขนาดและลักษณะที่แตกต่างกันแล้วยังมีรูปร่างได้หลาย

แบบ โดยรูปร่างของรูพรุนที่พบส่วนใหญ่มีอยู่ 5 แบบ ได้แก่

1. Cylindrical คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกระบอก
2. Ing-bottle คือรูพรุนที่มีรูปร่างคล้ายขวดน้ำ
3. Funnel คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงกรวย
4. Cuboid หรือ Slit คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นลูกบาศก์
5. Triangular หรือ Pyramidal คือรูพรุนที่มีรูปร่างเป็นทรงสามเหลี่ยมพีระมิด

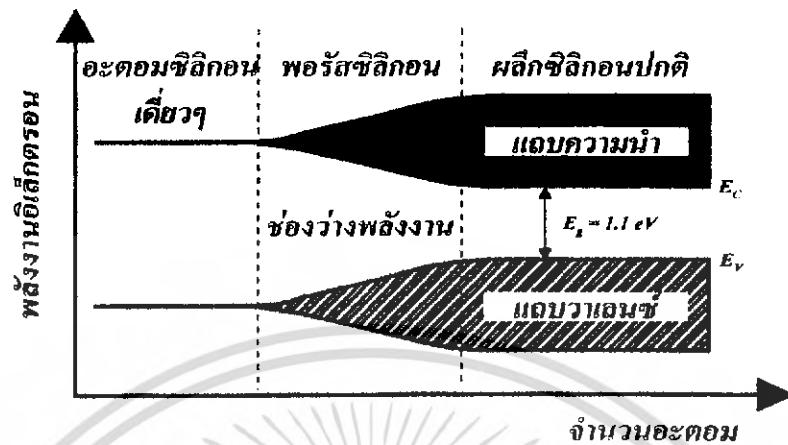
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.30 แสดงถึงรูพรุนของพอร์สซิลิกอนรูปร่างต่างๆ

#### 2.4.4 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิกอน

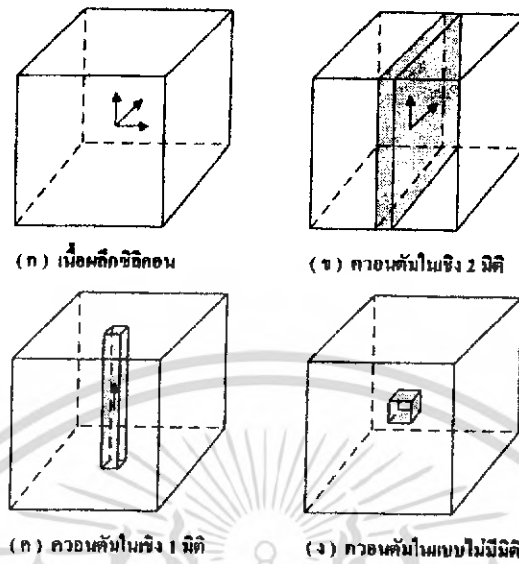
เมื่ออะตอมของผลึกซิลิกอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้เกิดการแตกแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แตกแยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการนี้เองถ้าเราสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะนำไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิกอนเดิม



รูปที่ 2.31 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

จากรูปที่ 2.31 ข้างต้นจะเห็นได้ว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิกอนลงนั้นสามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิกอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิกอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า Quantum size effect หรือ Quantum confinement effect

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆเหล่านี้ จะเสมือนว่าได้ถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติ ได้เหมือนกับอยู่ในเนื้อผลึกซิลิกอนปกติ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างไปจากเนื้อซิลิกอนเดิม



รูปที่ 2.32 แสดงแบบจำลองลักษณะ โครงสร้างทางควอนตัมแบบต่างๆและทิศทางการเคลื่อนที่ของพาหะภายใน

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับด้วยลักษณะและขนาดของโครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ quantum size effect quantum หรือ confinement effect สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกันคือ

1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (Quantum well)
2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (Quantum wire)
3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (Quantum dot)

เนื่องจากโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นเส้น หรือเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนจัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ หรือ Quantum wire นั่นเอง ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน ( $E_{ps}$ ) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างนาโนเมตรของพอร์สซิลิคอน

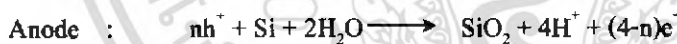
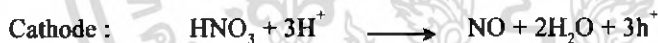
#### 2.4.5 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching

การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธี Stain etching หรือ การกัดแบบข้อมติ เริ่มมีการนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ.1960 เทคนิคที่นิยมใช้กันมากที่สุดคือการจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารประกอบของไฮโดรฟลูออริก ซึ่งมีจะประกอบด้วย สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF) กรดไนตริก(Nitric) และน้ำ เป็นส่วนประกอบหลัก นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้การกระตุ้นด้วยแสงสว่างในขณะที่ทำการกัดด้วยปฏิกิริยาเคมีเป็นตัวช่วยการทำปฏิกิริยาด้วย

##### 2.4.5.1 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี

จุดสำคัญของ การกัดแบบข้อมติ (Stain etching) ก็คือ การทำให้เกิดประจุโพลาร์เพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก(HF) ทำปฏิกิริยากับกรดไนตริก(Nitric :  $\text{HNO}_3$ ) เพื่อทำให้เกิดประจุโพลาร์ ดังสมการที่ 1 หลังจากนั้นประจุโพลาร์ที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน(Oxidation reaction) ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ดังสมการที่ 3 ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์และการถูกกัดของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยาเหมือนอย่างกรณีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี(Anodization) ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ(Non-uniform)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมติ



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมครอน ถึงประมาณ 1.5 ไมครอน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าในกระบวนการกัดแบบข้อมติ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกพร้อมกับกรดไนตริกสักครู่ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยาการกัด

ในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพาะฟักตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้ในกระบวนการกักนั้นเอง เรียกว่า “การบ่มสารละลาย(Incubation)”

#### 2.4.5.2 ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิกอนที่สร้างจากวิธี Stain etching

1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดในตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ โดยที่อัตราการเกิดชั้นพอร์ซซิลิกอนเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของกรดในตริกต่อปริมาณสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่  $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$  ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

2. ชนิดของสารเจือและค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิกอนที่นำมากัดพอร์ซ มีผลอย่างมากต่ออัตราการเกิดของชั้นพอร์ซซิลิกอนซึ่งทำให้มีผลต่อเวลาที่ใช้ในการทำ “Incubation” โดยตรง โดยที่ผลึกซิลิกอนชนิดที่จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิกอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 30 วินาที สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดที่มีค่าสภาพความต้านทาน 0.004 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการบ่มสารละลาย 9 นาที สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดที่มีค่าสภาพความต้านทาน 50 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น ในทางตรงกันข้าม ถ้าเป็นผลึกซิลิกอนชนิดอื่น จะต้องใช้เวลาในการบ่มสารละลายน้อยลงอย่างมีนัยสำคัญกับค่าสภาพความต้านทานของผลึกซิลิกอนที่เพิ่มขึ้น เช่น การบ่มสารละลายใช้เวลา 10 นาที สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดอื่นที่มีสภาพต้านทาน 0.15 โอห์ม-เซนติเมตร ก็อาจจะต้องปรับเป็นใช้เวลาในการบ่มสารละลาย 8 นาที สำหรับแผ่นซิลิกอนชนิดอื่นที่มีค่าสภาพความต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร เป็นต้น

3. สภาพของผลึกซิลิกอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์ซซิลิกอน มีการทดลองกับแผ่นซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยว(Single crystalline),แผ่นซิลิกอนแบบผลึกหลายรูป(Poly crystalline), แผ่นซิลิกอนแบบอะมอร์ฟัส(Amorphus) และชั้นอัลลอยของซิลิกอนกับเยอรมันเนียม ที่สร้างจากกระบวนการ Epitaxi เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์ซซิลิกอนด้วยวิธีการกัดข้อมสีกายได้ปัจจัยภายนอกเดียวกัน พบว่า จากการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต(UV) พอร์ซซิลิกอนที่สร้างจากแผ่นซิลิกอนแบบผลึกเดี่ยวและแผ่นซิลิกอนแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติ

Photoluminescence (PL) แต่พอร์ซซิลิกอนที่สร้างจากแผ่นซิลิกอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบ Amorphus กลับไม่แสดงคุณสมบัติ Photoluminescence ส่วนกรณีอัลลอยของซิลิกอนกับเยอรมันเนียมที่สร้างจากกระบวนการ Epitaxi พบว่าการเพิ่มความหนาแน่นของเยอรมันเนียมจะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิด Photoluminescence ลดลง ในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของสารละลายที่ใช้กักและการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ของกระบวนการทำปฏิกิริยา ล้วนมีผลกระทบต่อโครงสร้างและลักษณะของพอร์สซิติคอนที่จะเกิดขึ้น เช่น การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกักจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิติคอนที่สัมผัสกับสารละลาย เกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิติคอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิติคอนที่หยากกว่าการสร้างชั้นพอร์สซิติคอนโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ในการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เพื่อการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ ต้องมีการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบโครงสร้างและกระบวนการสร้าง โดยในการออกแบบจะกล่าวถึงการออกแบบกระจกชั้นแบบ และในส่วนของกระบวนการสร้างจะกล่าวถึงรายละเอียดในการสร้างโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ไปจนถึงการสร้างชั้นพอร์ตซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่

#### 3.1 การสร้างกระจกชั้นแบบ

กระจกชั้นแบบมีทั้งหมด 4 มาส์กคือ

- มาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร์สารเจือ
- มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ
- มาส์กที่ 3 สร้างลวดลายอลูมิเนียม
- มาส์กที่ 4 เปิดช่องสำหรับกัดพอร์ตซิลิคอน

รูปที่ 3.1 ลักษณะมาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร์สารเจือ



รูปที่ 3.2 ลักษณะมาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ



รูปที่ 3.3 ลักษณะมาส์กที่ 3 สร้างสวดลายอลูมิเนียม



รูปที่ 3.4 ลักษณะมาส์กที่ 4 เปิดช่องสำหรับกัดพอร์สซิลิคอน

### 3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

#### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

โดยเริ่มดำเนินการเตรียมแผ่นผลึกซิลิคอนชนิด  $i$  ระนาบ (111) ความหนาของแผ่นซิลิคอน ประมาณ 275 ไมครอน

การตัดแบ่งแผ่นซิลิคอน จะใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษที่เรียกว่า Diamond-edged saw การลดความคมของแผ่นซิลิคอน โดยการใช้ผงขัดของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีหลายเบอร์หลายขนาดดังนี้

- # 600 เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน
- # 1000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 ไมครอน
- # 2000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.9 ไมครอน
- # 4000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ไมครอน

สุดท้ายใช้ผงอลูมินา ( $Al_2O_3$ ) ขัดเพื่อให้เป็นเงาคล้ายกระจก โดยผงอลูมินามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน

#### 3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน

การทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. การทำความสะอาดครั้งแรก เพื่อล้างสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนแผ่นซิลิคอน
2. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอน กำจัดไขมันและสิ่งแปลกปลอม

### 3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันคือ กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ซึ่งเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง เพื่อเคลือบผิวหน้า และใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO<sub>2</sub>) ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ เวลา และกระบวนการสร้าง ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้สามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน โดยการทิ้งให้แผ่นผลึกซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแห้งหรือไอน้ำในบรรยากาศซึ่งมีอุณหภูมิสูง

การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

#### 1. ออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



#### 2. ออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



### 3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่ายภาพกระจกมาสก์ลงบนแผ่นซิลิคอน เพื่อเตรียมเปิดช่องออกไซด์เฉพาะบริเวณที่ต้องการแพร่สารเจือ โดยเคลือบผิวของแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำยาไวแสง (Photo-resist) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

#### 1. น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative photo resist)

โดยเมื่อถูกแสงแล้วจะแข็งตัวไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

#### 2. น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive photo resist)

โดยเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะอ่อนตัว และสามารถละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

### 3.2.5 การฉายแสง (Exposure)

อัตราความไวต่อแสงของความยาวคลื่น  $\lambda$  อยู่ในช่วง 300-500 nm คือแสงที่เรามองเห็น สีม่วงและน้ำเงินนั่นเอง กรณีแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda > 500$  nm คือแสงสีเหลืองในห้องปฏิบัติการเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

Negative resist วัสดุสเปกตรัม 405 nm

Positive resist วัสดุสเปกตรัม 365 nm

### 3.2.6 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)

#### 3.2.6.1 กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (Boron)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือโบรอน ด้วยแหล่งสารเจือ BN ลงไปบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ไว้

#### 3.2.6.2 กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ด้วยแหล่งสารเจือ  $\text{SiP}_2\text{O}_4$  (PH1000) ลงไปบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ไว้

### 3.2.7 Metallization Process

Metallization Process คือ กระบวนการทำขั้วโลหะ (Metal contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน (Metal wire interconnection)

#### คุณสมบัติโลหะที่ดีมีดังนี้

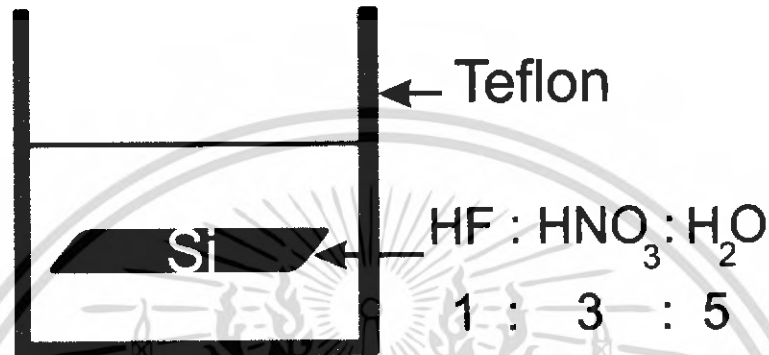
1. Contact resistance (RC) ต่ำ หรือ มีสภาพเป็น good electrical contact และมีสภาพเป็น Ohmic contact ไม่ใช่ Rectifier contact
2.  $\rho$  ต่ำ หรือ High conductivity เพื่อลด Voltage drop ในโลหะ และลดค่า Propagation delay
3. ไม่ทำปฏิกิริยาอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง มีอายุการใช้งานนานๆ
4. ต้องสามารถทำ Photo etching ได้ และได้ลวดลายที่คมชัด
5. ต้องยึดติดกับชั้น  $\text{SiO}_2$  ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต่อเชื่อมโลหะภายนอกได้ดี
6. ราคาถูก สร้างง่าย

### 3.2.8 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิคระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอน และทำให้เกิดส่วนอัลลอยระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนขึ้นในขณะเดียวกัน โดยการนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในเตาแพร่สารในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ซีซี/นาที เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$

### 3.2.9 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมติ (Stain etching)

เป็นการสร้างแท่งซิลิคอนเล็กๆ จำนวนมากเพื่อเป็นชิ้นลดการสะท้อนแสง การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมติทำได้โดย จุ่มผลึกซิลิคอนที่ต้องการสร้างพอร์สลงไปใต้น้ำยากัด โดยมีส่วนผสมดังนี้คือ  $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{H}_2\text{O}$  ในอัตราส่วน 1 : 3 : 5



รูปที่ 3.5 แสดงการกัดพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมติ

### 3.2.10 กระบวนการสร้าง Silicon Photodiode แบบ p-i-n

#### 1. การเตรียมแผ่นซิลิคอนและการตรวจสอบคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิคอนชนิดอินทรีนซิก ระบาย (111)
- พิกัดความต้านทาน  $\cong 2000 \Omega\text{-cm}$
- ความหนา  $\cong 275 \mu\text{m}$

#### 2. การทำความสะอาดผิว

- Ultrasonic ในน้ำ DI 3 นาที (เพื่อกำจัดฝุ่นละออง)
- ล้างในน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซ  $\text{N}_2$
- ดัมใน  $\text{HNO}_3 \cong 10$  นาที (เพื่อกำจัดโลหะหนัก เช่น เศษ Silicon)
- ล้างในน้ำ DI
- ดัมในน้ำ DI (I) 5 นาที
- ดัมในน้ำ DI (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วย  $\text{N}_2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 3. การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichol 5 นาที (กำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน)
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

4. Slice etching (เพื่อกำจัด  $SiO_2$  ที่อยู่บนผิว Silicon ก่อนการ Oxidation)

- ล้างใน HF 5% 10 นาที (จะไม่มีน้ำเกาะบนผิว Silicon)
- ต้มในน้ำ DI (I)
- ต้มในน้ำ DI (II)
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

## 5. Oxidation

- Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 1 ชั่วโมง
  - Wet ด้วย  $O_2$  1000 cc/min 3 ชั่วโมง
  - Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 1 ชั่วโมง
- อุณหภูมิเตา  $1000^\circ C$ , อุณหภูมิน้ำ  $90^\circ C$

## 6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

- อบแผ่นไลต์ความชื้นที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  30 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหน้า
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $95^\circ C$  30 นาที

## 7. การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching) ด้านหลัง

- จุ่มในสารละลาย Buffer for Oxidation (อัตราการกัด 1000 อังสตรอม/นาที)
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

## 8. ลอกฟิล์มด้านหน้า

- แช่ใน Acetone (I) 1 นาที
- แช่ใน Acetone (II) 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)

- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

9. ทำความสะอาดผิวหน้า ( ด้านหลัง )

- ต้มใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

10. Slice etching ด้านหลัง

- จุ่มใน HF 5% 11 วินาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

11. Pre-deposition ด้านหลังด้วย Phosphorus (สารเจือชนิด n)

- Pre-dep 1000°C ด้วย  $N_2$  1000 cc/min 30 นาที

12. ลอกชั้น Phosphorus

- จุ่มใน HF 5% 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

13. ทำความสะอาดผิวด้านหลัง

- ต้มใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

14. Drive-in ด้านหลังด้วย Phosphorus 1100°C

- Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 6 ชั่วโมง
- Wet ด้วย  $O_2$  1000 cc/min  $\frac{1}{2}$  ชั่วโมง
- Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min  $2\frac{1}{2}$  ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 15. Photo Mask#1 (Diffusion ) ด้านหน้า

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ spin 3000 rpm 20 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- Alignment Expose เวลา 10 วินาที
- Developer ฟิล์มโดย
  - AZ Developer ( I ) 15 วินาที
  - AZ Developer ( II ) 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>
- นำไปแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ 90°C 10 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที

## 16. Oxide etching

- แช่ใน Buffer for Oxidation 8 นาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

## 17. ลอกฟิล์ม

- แช่ใน Acetone ( I ) 1 นาที
- แช่ใน Acetone ( II ) 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย N<sub>2</sub>

## 18. ทำความสะอาดผิวหน้า

- คัมใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

19. Slice etching

- จุ่มใน HF 5% 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

20. Pre-deposition ด้านหน้าด้วย Boron

- Pre-dep 1000°C ด้วย  $N_2$  1000 cc/min 20 นาที

21. ลอกชั้น Pre-deposition (Boron)

- จุ่มใน HF 5% 10 วินาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

22. ทำความสะอาดผิวด้านหน้า

- ต้มใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าให้แห้งด้วย  $N_2$

23. Drive-in

Drive-in (Boron) 1100°C ด้วย  $O_2$  (Dry) 1200 cc/min.

- Wafer ( 1 ) 10 นาที
- Wafer ( 2 ) 20 นาที
- Wafer ( 3 ) 30 นาที
- Wafer ( 4 ) 40 นาที

24. Photo Mask # 2 ( contact window )

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( AZ ) ด้วยการ ( spin ) 3000 rpm. 20 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที ( prebake )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Alignment Expose
  - Developer ฟิล์มโดย
    - AZ Developer ( I ) 15 วินาที
    - AZ Developer ( II ) 15 วินาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
  - อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 85°C 30 นาที
25. Oxide etching
- แช่ใน Buffer for Oxidation 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
26. สลอกฟิล์ม
- แช่ใน Acetone ( I ) 1 นาที
  - แช่ใน Acetone ( II ) 1 นาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
27. ทำความสะอาดผิวหน้า
- คัดใน Trichol 5 นาที
  - Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
28. Aluminium Evaporation ที่ความดัน  $2 \times 10^{-6}$  มม.ของปรอท ( torr )
29. Photo Mask # 3 ( contact mask )
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( AZ ) ด้วยการ ( spin ) 3000 rpm.
  - อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 85°C 20 นาที ( prebake )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Alignment Expose
- Developer ฟิล์ม โดย
  - AZ Developer ( I ) 15 วินาที
  - AZ Developer ( II ) 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $85^{\circ}C$  30 นาที

### 30. Al etching

- นำแผ่นจุ่มในสารละลาย Al etching ที่  $40^{\circ}C$  ( ประมาณ 10 – 20 วินาที )
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 31. ลอกฟิล์ม

- แช่ใน Acetone ( I ) 1 วินาที
- แช่ใน Acetone ( II ) 1 วินาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 32. Sintering $500^{\circ}C$

- Dry  $N_2$  1000 cc / min 12 นาที

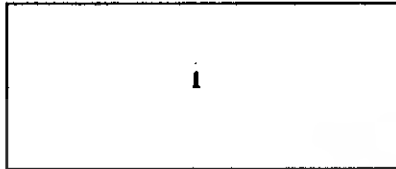
### 33. Porous Mask # 4

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( S 1818 ) ด้วยการ spin 4000 rpm 20sec
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}C$  20 นาที ( prebake )
- Alignment Expose
- Developer ฟิล์ม โดย
  - S 1818 Developer ( I ) 15 วินาที
  - S 1818 Developer ( II ) 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างในน้ำ DI (I)
  - ล้างในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $90^\circ C$  30 นาที
35. สร้างพอร์ซซลิคอนแบบกัศทะลุ Al
- ผสมน้ำยากัดพอร์ซโดยมีส่วนผสม HF :  $HNO_3$  :  $H_2O$  ในอัตราส่วน 1 : 3 : 5
  - นำแผ่นจุ่มในสารละลายที่ใช้ในการกัดพอร์ซซลิคอนโดยใช้เวลาการกัดดังนี้
    - กัดพอร์ซเป็นเวลา 30 วินาที
    - กัดพอร์ซเป็นเวลา 40 วินาที
    - กัดพอร์ซเป็นเวลา 60 วินาที
    - กัดพอร์ซเป็นเวลา 80 วินาที
  - ล้างในน้ำ DI (I)
  - ล้างในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
36. ลอกฟิล์ม
- แช่ใน Acetone (I) 1 นาที
  - แช่ใน Acetone (II) 1 นาที
  - ล้างในน้ำ DI (I)
  - ล้างในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$

โดยลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แสดงได้ดังนี้



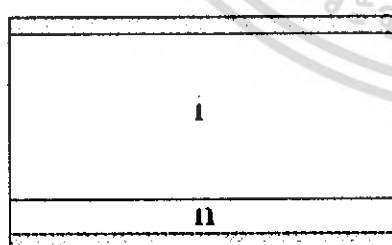
(ก) เตรียมแผ่นผลึกชนิด i



(ข) ออกซิเดชัน



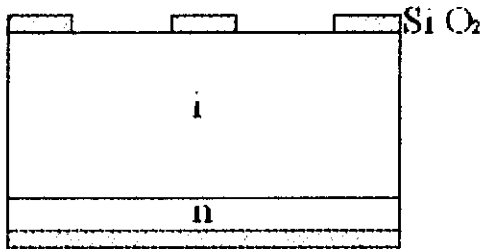
(ค) กัดออกไซด์ที่ด้านหลังของแผ่น



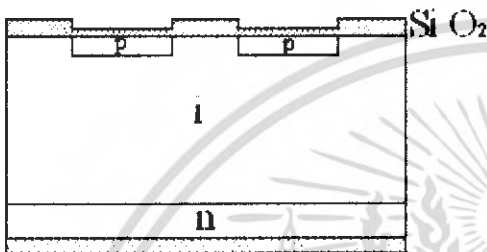
(ง) แพร่อะตอมสารเจือชนิด N

รูปที่ 3.6 แสดงภาพตัดขวางกระบวนการสร้าง p-i-n โฟโตไดโอด

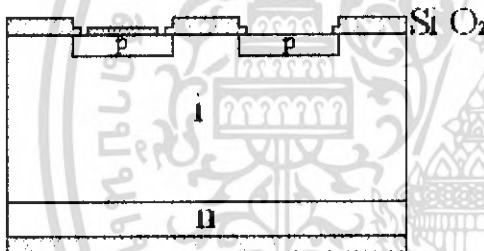
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



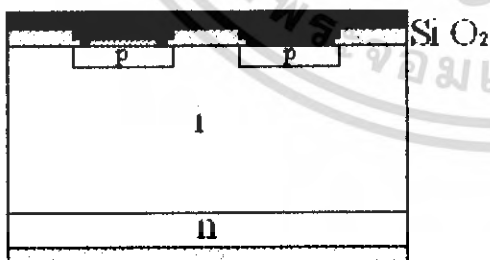
(จ) เปิดชั้นออกไซด์เพื่อแพร่อะตอม  
สารเจือชนิด P Mask # 1  
(Diffusion Mask)



(ฉ) แพร่อะตอมสารเจือชนิด P



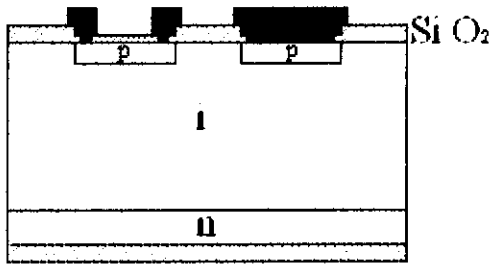
(ช) เปิดชั้นออกไซด์เพื่อสร้างขั้วโลหะ  
Mask # 2 (Contact Mask)



(ซ) เคลือบชั้นอลูมิเนียม

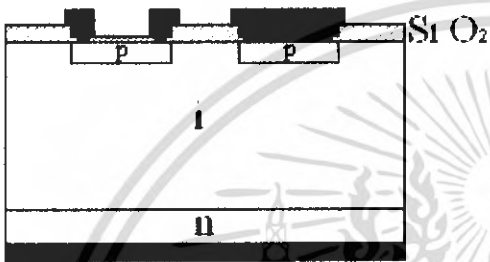
รูปที่ 3.6 (ต่อ) แสดงภาพตัดขวางกระบวนการสร้าง p-i-n โฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

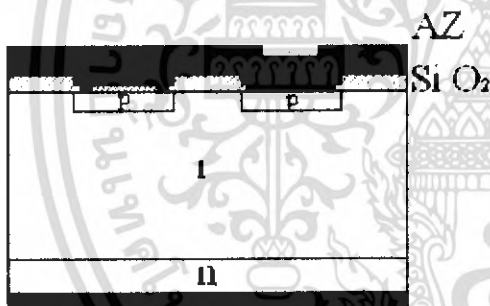


(ฉ) สร้างลวดสายอลูมิเนียม

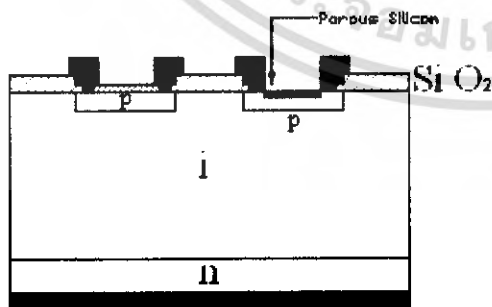
Mask # 3 (Aluminium Mask)



(ฅ) เปิดออกไซด์ด้านล่างและสร้าง  
อลูมิเนียม



(ฎ) เคลื่อน้ำยาไวแสง จากนั้นใช้  
Mask # 4 เปิดบริเวณที่ต้องการ  
สร้างพอร์ซซิลิคอน

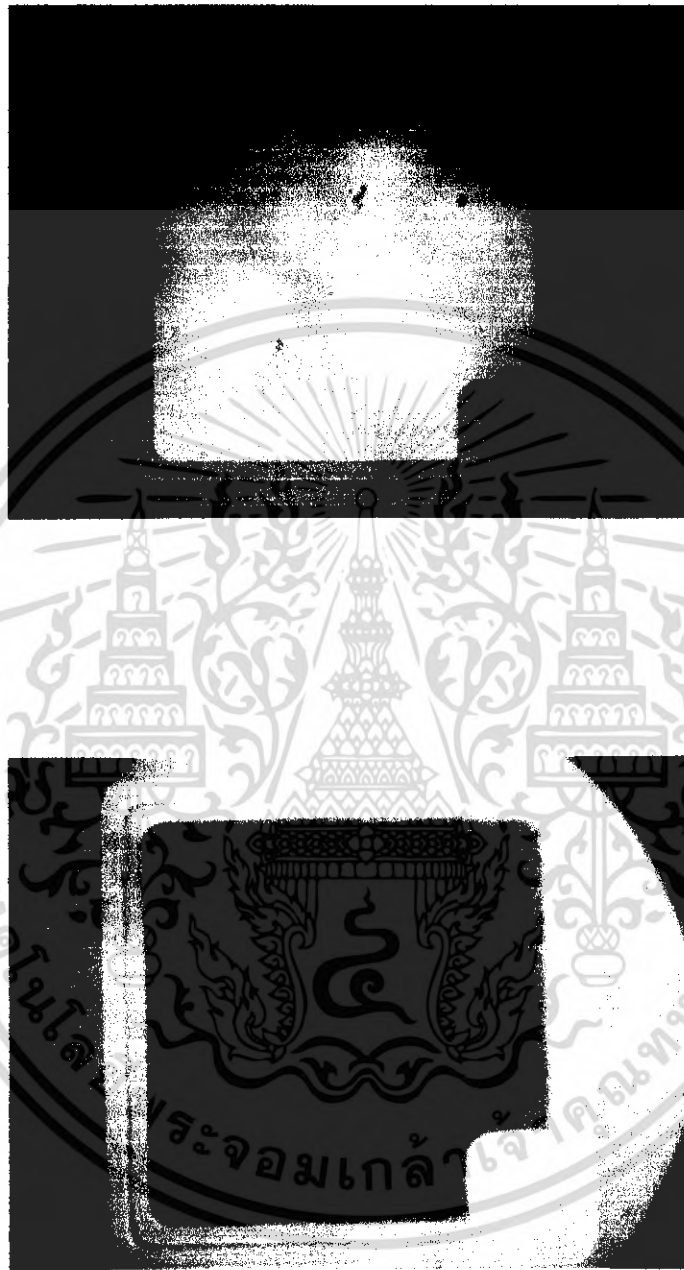


(ฏ) จุ่มลงในน้ำยากัด

HF : HNO<sub>3</sub> : H<sub>2</sub>O

รูปที่ 3.6 (ต่อ) แสดงภาพตัดขวางกระบวนการสร้าง p-i-n โฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**รูปที่ 3.7** แสดงภาพก่อน-หลังกัคพอร์สซิติกอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

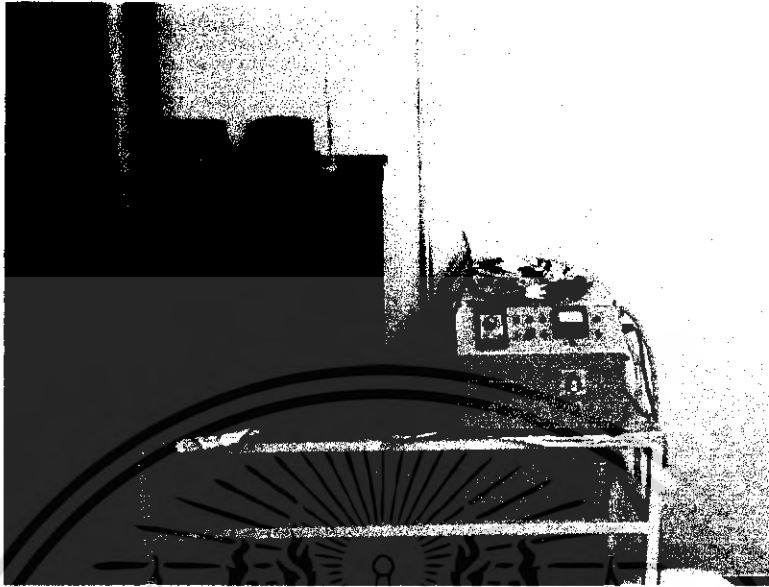


รูปที่ 3.8 Clean Bench

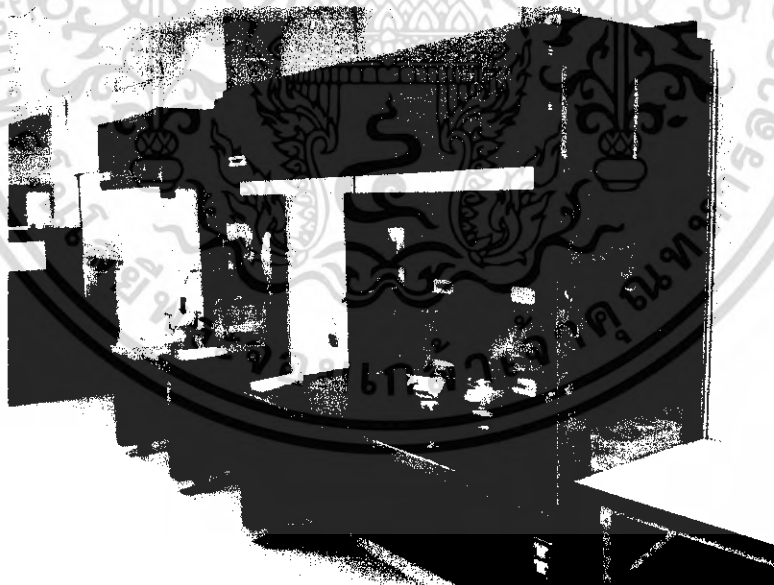


รูปที่ 3.9 เครื่อง Ultrasonic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

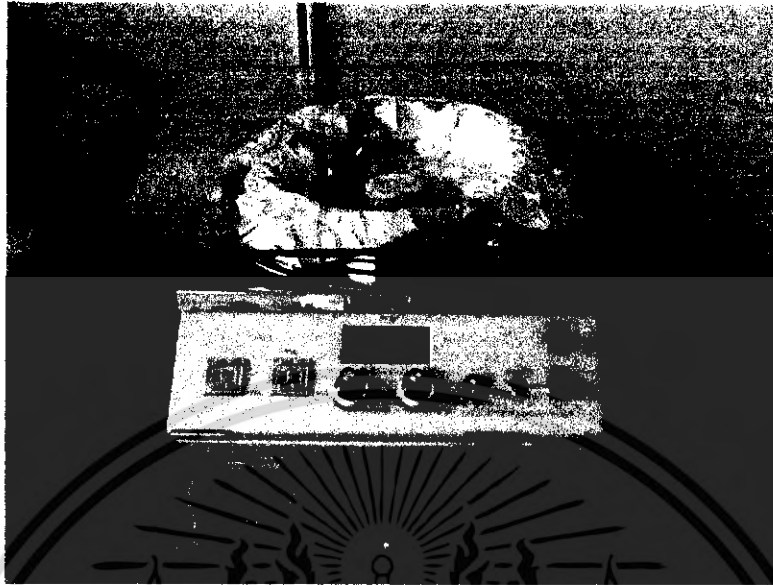


รูปที่ 3.10 เครื่อง spin สารเจือและ เคาอป



รูปที่ 3.11 เคาแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

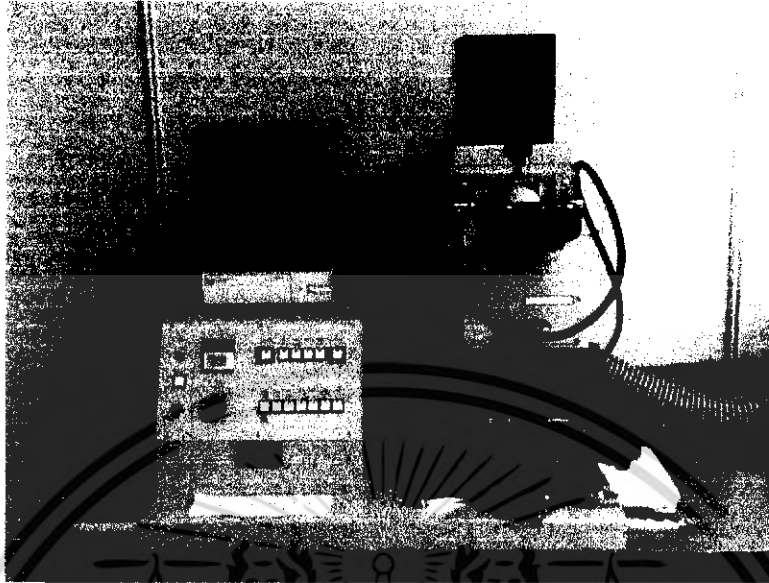


รูปที่ 3.12 เครื่อง spin นำยาไวแสง



รูปที่ 3.13 เตาอบแผ่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

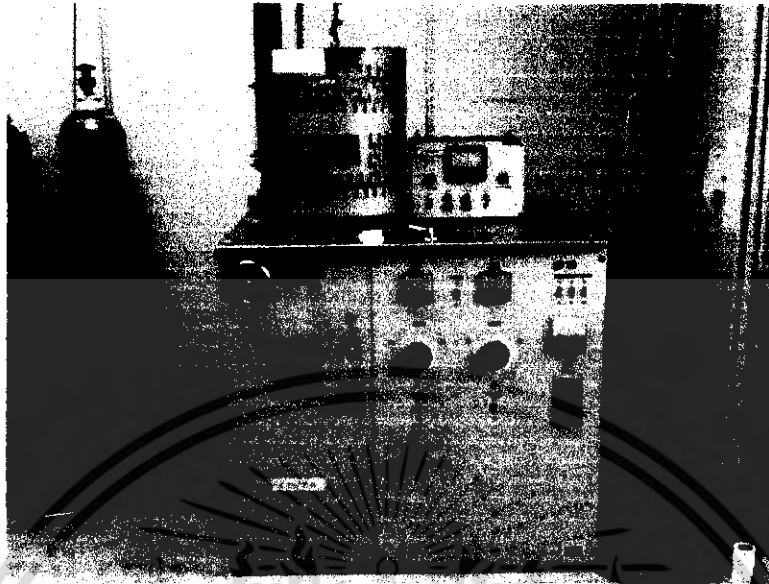


รูปที่ 3.14 เครื่องฉายแสง

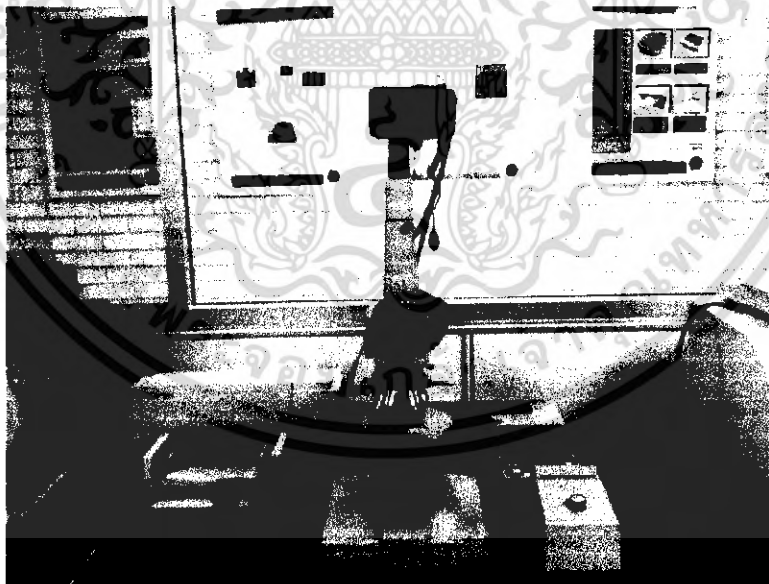


รูปที่ 3.15 Developer bench

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.16 Evaporate



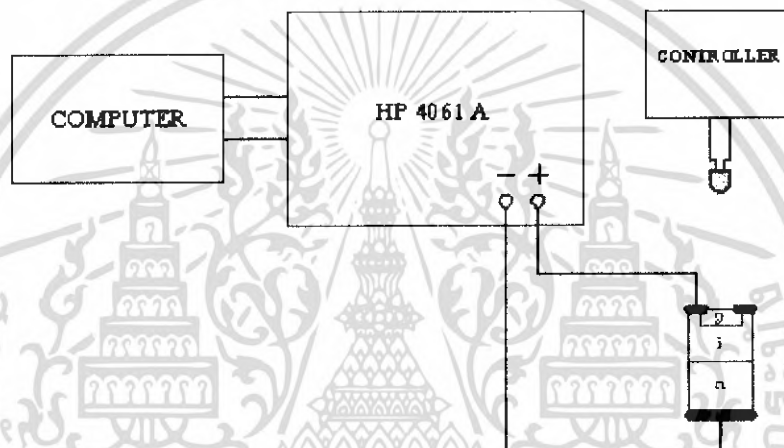
รูปที่ 3.17 Microscope

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### การวัดและผลการทดลอง

เพื่อศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จึงนำโฟโตไดโอดที่สร้างไปทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดจากเครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูลดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล

#### 4.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัด

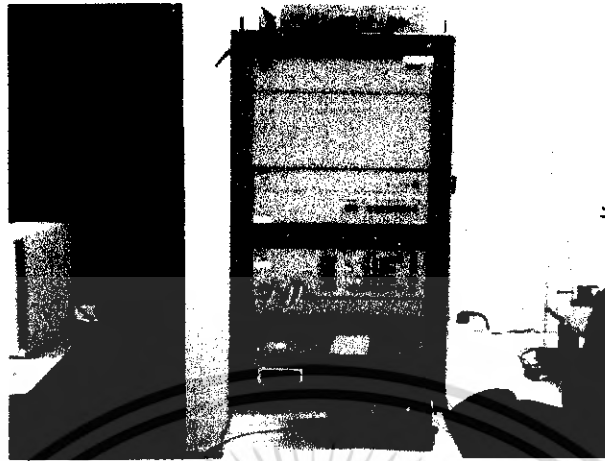


รูปที่ 4.2 โปรแกรม I-V diode

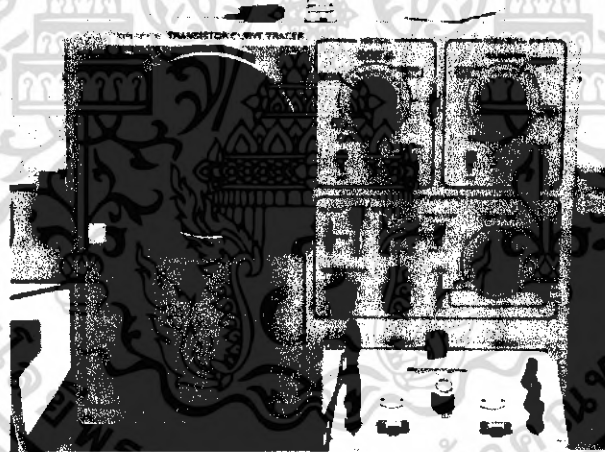


รูปที่ 4.3 Probe Station

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 HP4061 A

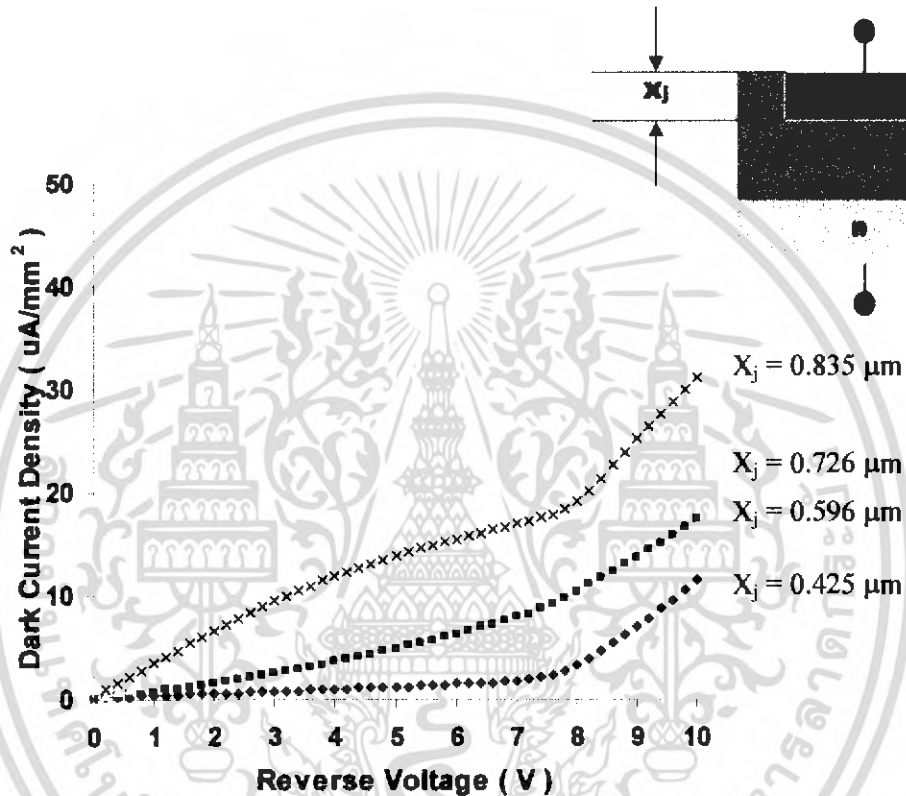


รูปที่ 4.5 Transistor curve tracer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการทดลองได้นำโฟโตไดโอดแบบ P-I-N มาทำการวัดค่าเพื่อหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ของค่ากระแสและแรงดัน

#### 4.2 ศึกษากระแสของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้น $\text{SiO}_2$ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ในขณะที่ยังไม่ได้รับแสง ( $I_{\text{DARK}}$ )



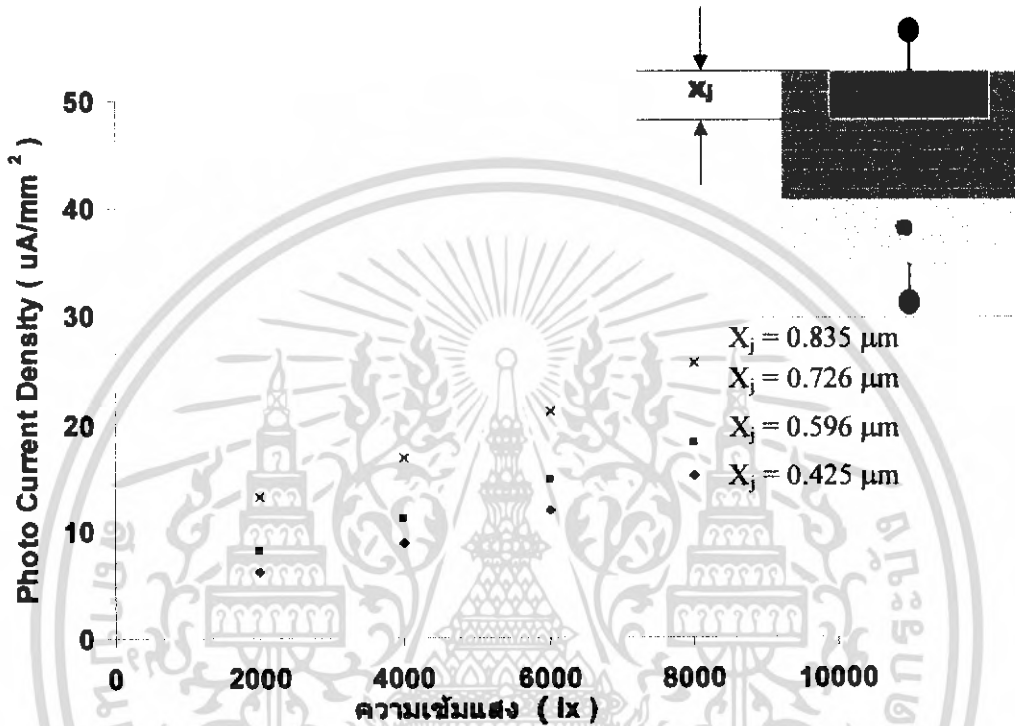
รูปที่ 4.6 ผลของความลึกรอยต่อ ( $X_j$ ) ที่มีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ซึ่งมีชั้น  $\text{SiO}_2$  เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

จากรูปที่ 4.6 เป็นการแสดงผลของความลึกรอยต่อที่มีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ซึ่งสังเกตได้ว่าที่ความลึกรอยต่อเท่ากับ  $0.425 \mu\text{m}$  จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสมืด  $11.59 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  และที่ค่าความลึกรอยต่อเท่ากับ  $0.835 \mu\text{m}$  จะให้ค่ากระแสมืด  $31.19 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  พิจารณาที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ  $10 \text{ V}$  เนื่องจากค่าของความลึกรอยต่อจะแปรผันตรงต่อความหนาแน่นพาหะคือเมื่อความลึกรอยต่อเพิ่ม ความหนาแน่นพาหะจะลดลง ทำให้  $I_{\text{DARK}}$  เพิ่มขึ้น จากสูตร

$$I_{\text{DARK}} = Aqn_i^2 \left( \frac{D_e}{L_e N_A} + \frac{D_h}{L_h N_D} \right) \quad (\text{สมการที่ 4.1})$$

#### 4.3 ศึกษาผลของค่าความลึกรอยต่อ ( $X_j$ )

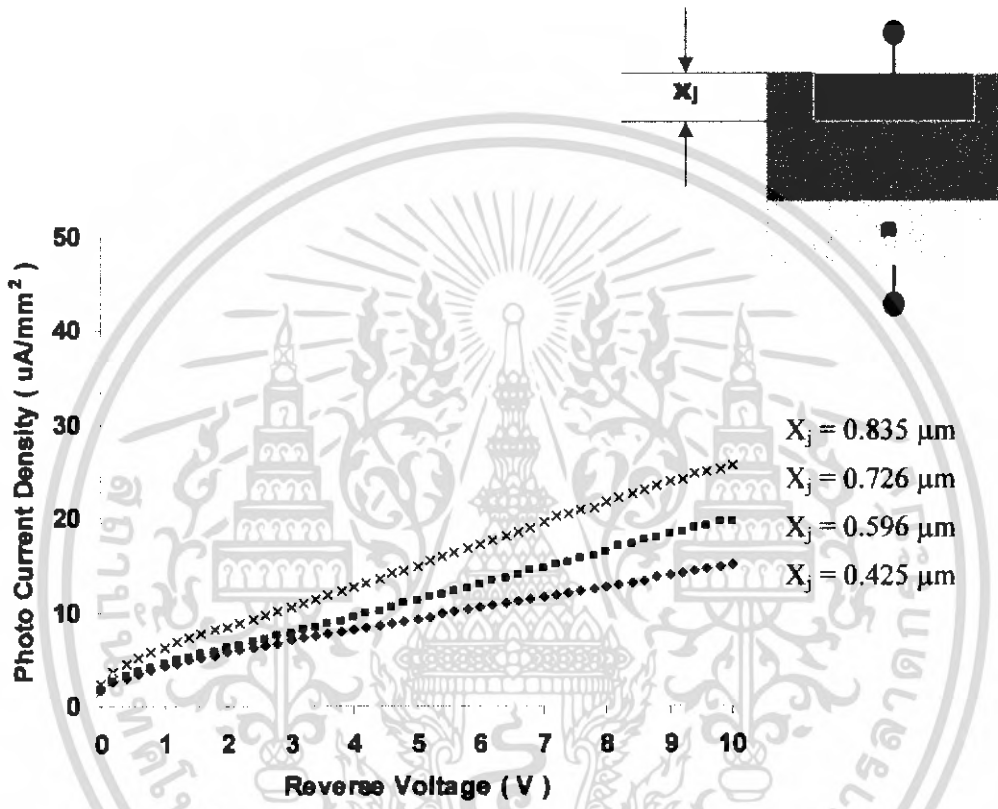
##### 4.3.1 ศึกษาผลของค่าความลึกรอยต่อ ( $X_j$ ) ที่มี Halogen เป็นแหล่งจ่ายแสง



รูปที่ 4.7 ค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ความเข้มแสงต่าง ๆ กัน โดยมีแหล่งจ่ายแรงดันเท่ากับ 10 V ที่ความลึกรอยต่อ ( $x_j$ ) ค่าต่าง ๆ

จากรูปที่ 4.7 แสดงผลของค่าความลึกรอยต่อที่มี Halogen เป็นแหล่งจ่ายแสงโดยกำหนดให้มีค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 V จากกราฟจะพบว่า ที่ค่าความลึกรอยต่อเท่ากับ 0.835  $\mu\text{m}$  โดยพิจารณาที่ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 8000 lx จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง 25.61  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$  และที่ค่าความลึกรอยต่อเท่ากับ 0.425  $\mu\text{m}$  จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง 15.02  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$  จะพบว่าค่าความเข้มแสงยิ่งมากก็จะทำให้ได้ค่าความหนาแน่นของกระแสแสง

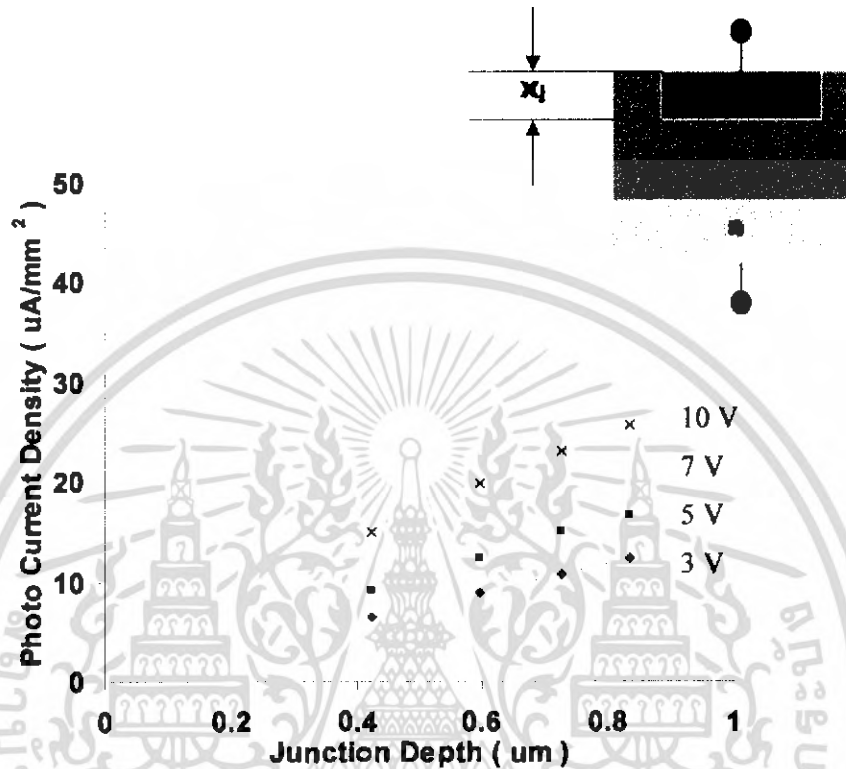
จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าที่ค่าความเข้มแสง 8000 lx โดยกำหนดให้มีค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 10 V จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงได้มากที่สุด เราจึงนำค่าความเข้มแสงที่มากที่สุดมาทำการศึกษาต่อว่าถ้าเพิ่มค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับแล้ว ค่าความหนาแน่นกระแสแสงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างไร



รูปที่ 4.8 ค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ค่าความถี่รอยต่อต่าง ๆ กัน โดยกำหนดให้ค่าความเข้มแสงเท่ากับ 8000 lx

จากรูปที่ 4.8 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ค่าความถี่รอยต่อต่าง ๆ กัน จากกราฟจะพบว่าที่ค่าความถี่รอยต่อเท่ากับ 0.835  $\mu\text{m}$  จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง 25.61  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$  และที่ค่าความถี่รอยต่อเท่ากับ 0.425  $\mu\text{m}$  จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง 15.02  $\mu\text{A}/\text{mm}^2$  จะพบว่าที่ค่าความถี่รอยต่อ 0.835  $\mu\text{m}$  จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงได้

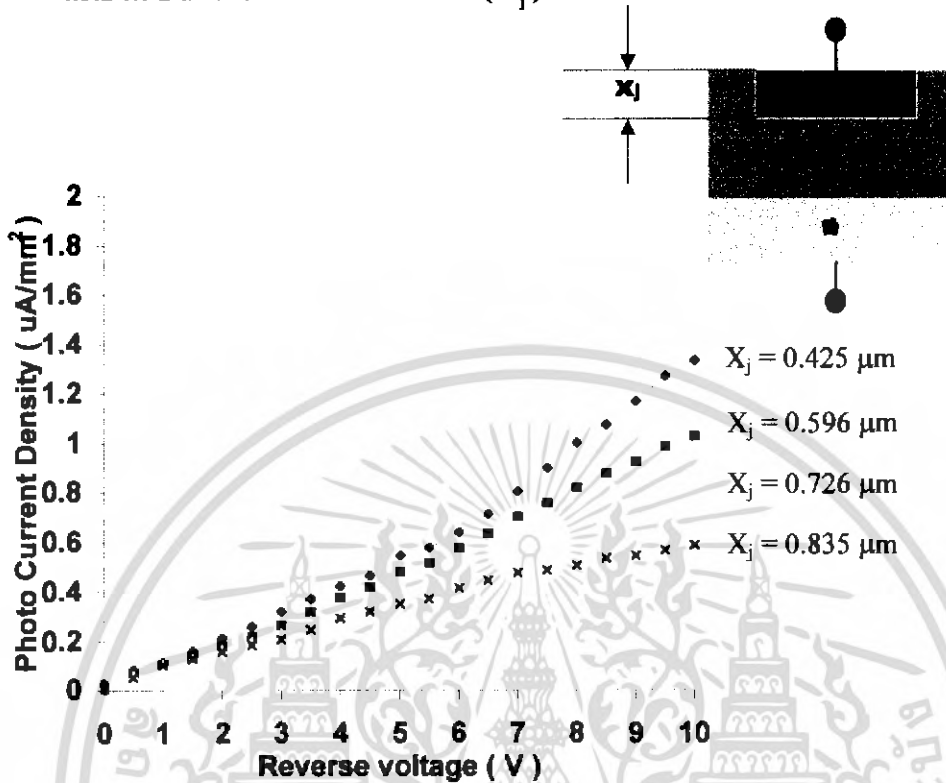
ดีกว่าเนื่องจากแหล่งจ่ายแสง Halogen เป็นแหล่งจ่ายแสงที่มีค่าความยาวคลื่นสูง ทำให้ที่ค่าความลึกรอยต่อหน้า ๆ จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงได้ดี



รูปที่ 4.9 ผลของค่าแรงดันไบอัสที่มี Halogen เป็นแหล่งจ่ายแสงโดยมีค่าความลึกรอยต่อต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

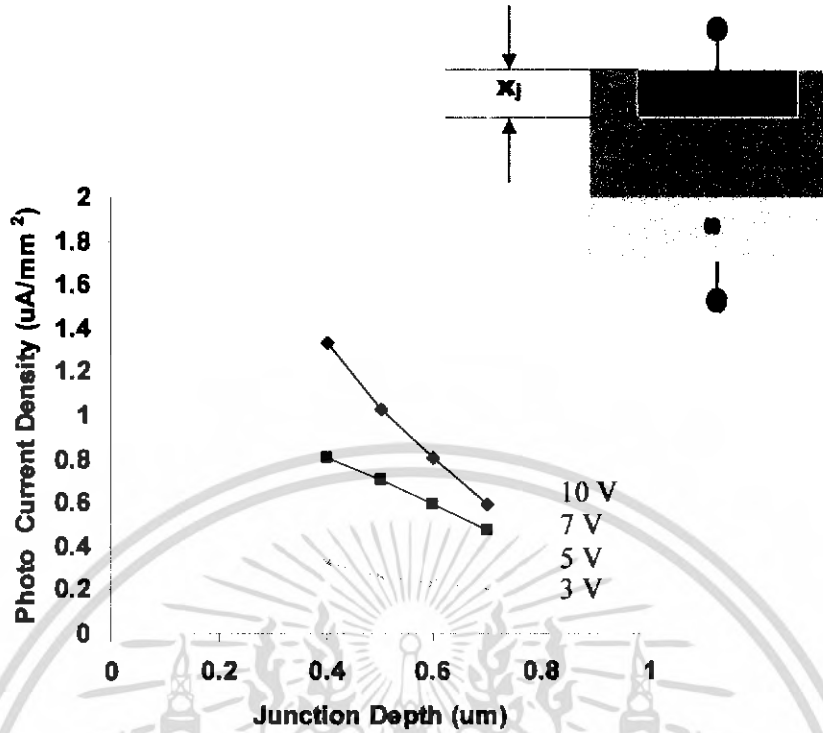
จากรูปที่ 4.9 แสดงผลของค่าแรงดันไบอัสที่มี Halogen เป็นแหล่งจ่ายแสงโดยมีค่าความลึกรอยต่อต่าง ๆ กัน จากกราฟจะพบว่าที่ค่าแรงดันไบอัส 10 V จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงมากที่สุด และที่ค่าความลึกรอยต่อ 0.425 um จะมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงน้อยกว่าที่ค่าความลึกรอยต่อ 0.835 um

#### 4.3.2 ศึกษาผลของค่าความลึกรอยต่อ ( $X_j$ ) ที่มี UV เป็นแหล่งจ่ายแสง



รูปที่ 4.10 ค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ค่าความลึกรอยต่อต่าง ๆ กัน โดยมี UV เป็นแหล่งจ่ายแสง

จากรูปที่ 4.10 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ค่าความลึกรอยต่อต่าง ๆ กัน โดยมี UV เป็นแหล่งจ่ายแสง จากกราฟพบว่าที่ค่าความลึกรอยต่อเท่ากับ  $0.835 \mu\text{m}$  จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง  $0.58 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  และที่ค่าความลึกรอยต่อเท่ากับ  $0.425 \mu\text{m}$  จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง  $1.33 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  หรือก็คือ ที่ค่าความลึกรอยต่อตื้น ๆ จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงได้มากกว่าที่ค่าความลึกรอยต่อที่มากกว่า แต่ปริมาณค่าความหนาแน่นของกระแสแสงที่ได้มีค่าน้อยกว่าค่าความหนาแน่นของกระแสแสงที่มีแหล่งจ่ายแสงเป็น Halogen เพราะว่าแสง UV เป็นแสงที่มีค่าความยาวคลื่นสั้นกว่าแสง Halogen



รูปที่ 4.11 ผลของค่าแรงดันไบอัสที่มี UV เป็นแหล่งจ่ายแสง โดยมีค่าความลึกรอยต่อต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

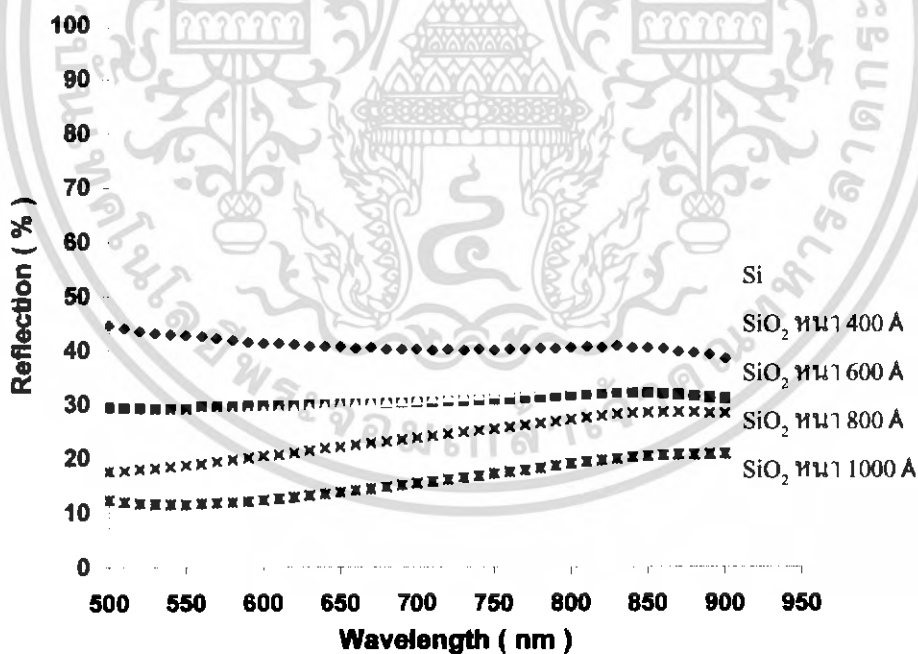
ในรูปที่ 4.11 เป็นการแสดงผลของแรงดันไบอัสที่มีผลต่อความลึกรอยต่อ โดยพิจารณาแรงดันไบอัสที่ค่าต่าง ๆ กัน โดยที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 V จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงสูงที่สุด แต่ที่ค่าความลึกรอยต่อ 0.835 um จะมีค่าความหนาแน่นกระแสแสง 0.58 uA/mm<sup>2</sup> ซึ่งน้อยกว่าที่ค่าความลึกรอยต่อ 0.425 um ซึ่งมีค่าความหนาแน่นกระแสแสง 1.33 uA/mm<sup>2</sup> หรือก็คือยิ่งค่าแรงดันไบอัสสูงก็จะทำให้ได้ค่ากระแสที่สูงด้วยเช่นกัน

จากที่ได้ทำการศึกษาแล้วพบว่าค่าความลึกรอยต่อ ค่าความเข้มแสง และการจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีผลต่อค่าความหนาแน่นกระแสแสง ถ้าต้องการโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ใช้งานในช่วงความยาวคลื่นสูงหรืออยู่ในช่วงของแสง Halogen ก็ควรเลือกโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีค่าความลึกรอยต่อมาก ๆ แต่ถ้าต้องการใช้งานโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ในช่วงความยาวคลื่นต่ำหรืออยู่ในช่วงแสง UV ก็ควรเลือกค่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีค่าความลึกรอยต่อสั้น ๆ

จากการศึกษาและวิจัยพบว่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่ใช้งานอยู่เมื่อได้รับแสงจะมีแสงส่วนหนึ่งที่สะท้อนออกไป และค่าความหนาแน่นของกระแสแสงก็จะขึ้นอยู่กับแสงที่ได้รับเข้ามาด้วย ถ้าเราต้องการให้ได้โฟโตไดโอดแบบ P-I-N มีค่าความหนาแน่นกระแสแสงมาก ๆ ก็ต้องให้โฟโตไดโอดแบบ P-I-N สามารถรับแสงที่ตกกระทบลงมาให้มากที่สุดหรือก็คือการลดการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N เราจึงได้ทำการศึกษาเรื่องชั้นพอร์ซซิลิคอนเพราะจากที่ได้ทราบมาว่าชั้นพอร์ซซิลิคอนสามารถทำเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้ เราจึงได้ทำการศึกษาโฟโตไดโอดแบบ P-I-N โดยมีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และทำการเปรียบเทียบค่าระหว่างโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง กับโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ว่าชั้นพอร์ซซิลิคอนกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ว่าชั้นไหนสามารถลดการสะท้อนแสงได้มากที่สุด

#### 4.4 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

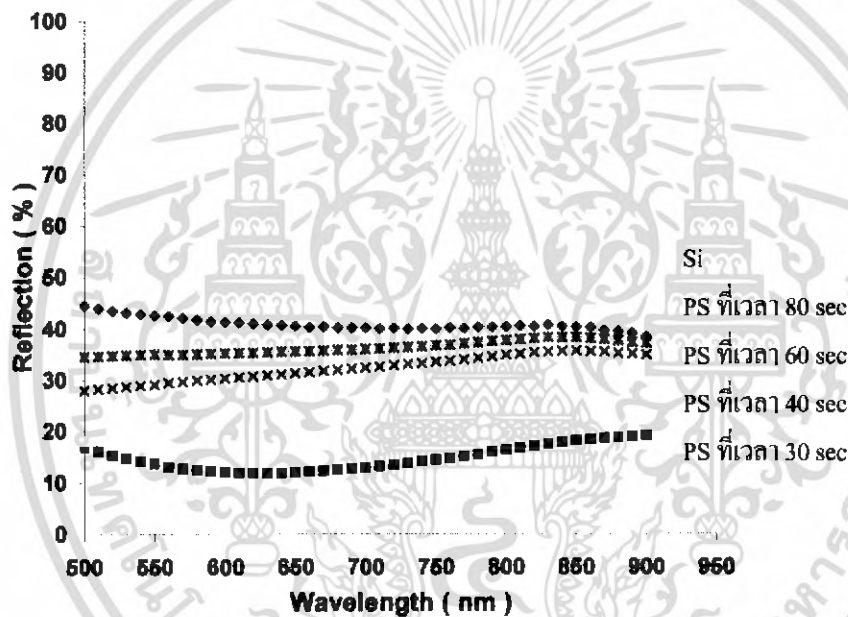
##### 4.4.1 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กับผิวซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 4.12 ผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน ของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

จากรูปที่ 4.12 แสดงผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน พบว่าที่ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาเท่ากับ 1000 Å จะมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุดคือ 20.9 % และที่ชั้นซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่สูงที่สุดคือ 38.39 % ดังนั้นจึงจะนำซิลิคอนไดออกไซด์ที่ค่าความหนาเท่ากับ 1000 Å ไปทำการเปรียบเทียบกับชั้นพอร์สซิลิคอน

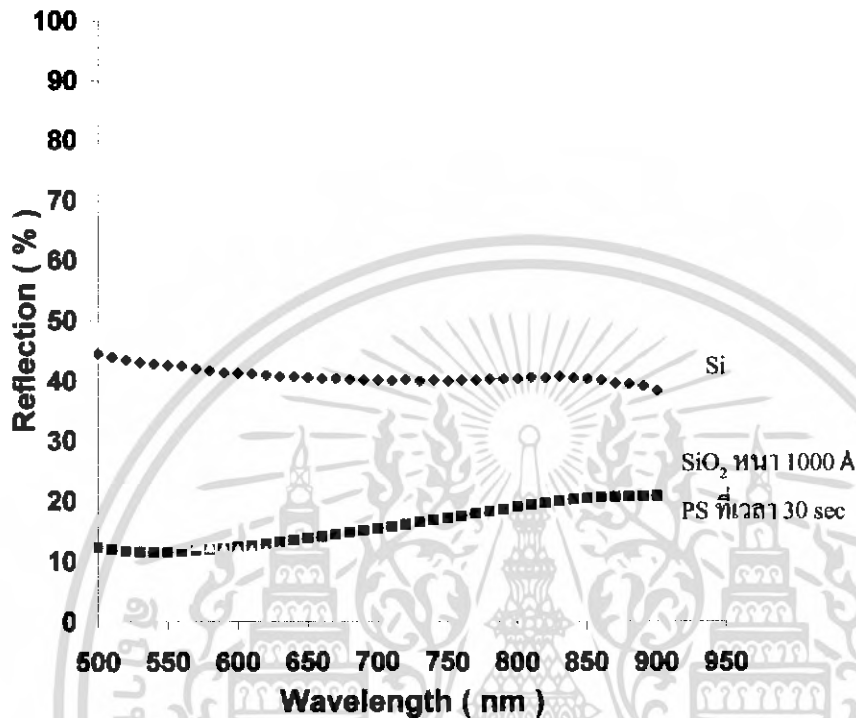
#### 4.4.2 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนกับผิวซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 4.13 ผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอนและชั้นพอร์สซิลิคอน ที่มีความหนาต่าง ๆ กัน ของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

จากรูปที่ 4.13 แสดงผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอนและชั้นพอร์สซิลิคอน ที่มีความหนาต่าง ๆ กันพบว่าที่ชั้นพอร์สซิลิคอนที่เวลา 30 วินาที จะมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุดคือ 19.16 % และที่ชั้นซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่สูงที่สุดคือ 38.39 % ดังนั้นจึงจะนำพอร์สซิลิคอนที่เวลา 30 วินาที ไปทำการเปรียบเทียบกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาเท่ากับ 1000 Å

#### 4.4.3 ศึกษาผลการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และผิวซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

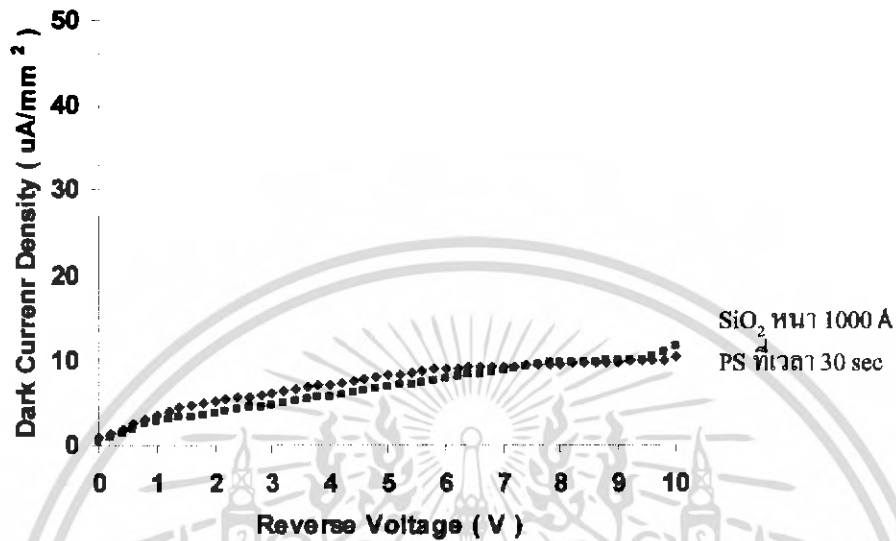


รูปที่ 4.14 ผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอน ชั้นพอร์สซิลิคอน และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่มีความหนาต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N

จากรูปที่ 4.14 แสดงผลการสะท้อนแสงที่ค่าความยาวคลื่นต่าง ๆ กันของผิวซิลิคอน ชั้นพอร์สซิลิคอน และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่มีความหนาต่าง ๆ กันของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N พบว่าเมื่อนำชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาเท่ากับ 1000 Å ซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำที่สุดของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ มาเปรียบเทียบกับชั้นพอร์สซิลิคอนที่เวลาการกัดเท่ากับ 30 วินาทีซึ่งมีค่าเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ดีที่สุดของชั้นพอร์สซิลิคอน จึงทำให้ทราบว่าชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถลดการสะท้อนแสงได้ดีกว่าชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในช่วงความยาวคลื่นที่ประมาณ 580 nm ถึง 900 nm

ต่อไปจะเป็นการนำชั้นพอร์สซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N มาทำการวัดคุณสมบัติความสัมพันธ์ของค่ากระแสและแรงดัน โดยแบ่งหัวข้อที่จะทดลองดังนี้

#### 4.5 ศึกษากระแสมืดของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



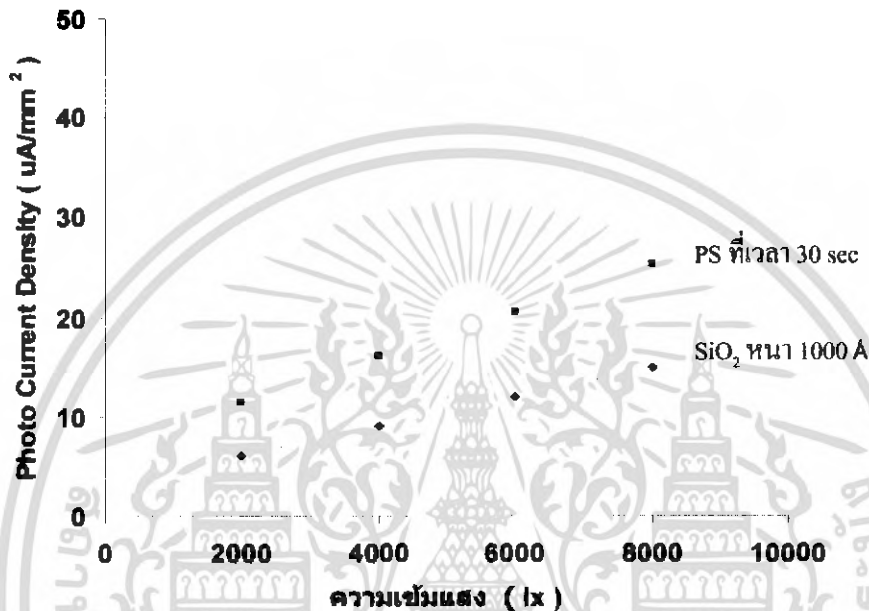
รูปที่ 4.15 ค่าความหนาแน่นกระแสมืดของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

จากรูปที่ 4.15 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสมืดของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง พบว่าค่าความหนาแน่นกระแสมืดของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีค่าไม่แตกต่างกันมากนักคือ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ  $11.59 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  และที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ  $10.38 \mu\text{A}/\text{mm}^2$  พิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 V

ต่อไปจะทำการศึกษาว่าถ้ามีการได้รับแสงแล้วค่าความหนาแน่นกระแสแสงจะมีค่าเท่าไร โดยให้แหล่งมีจ่ายแสงเป็นแสง Halogen

#### 4.6 ศึกษากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

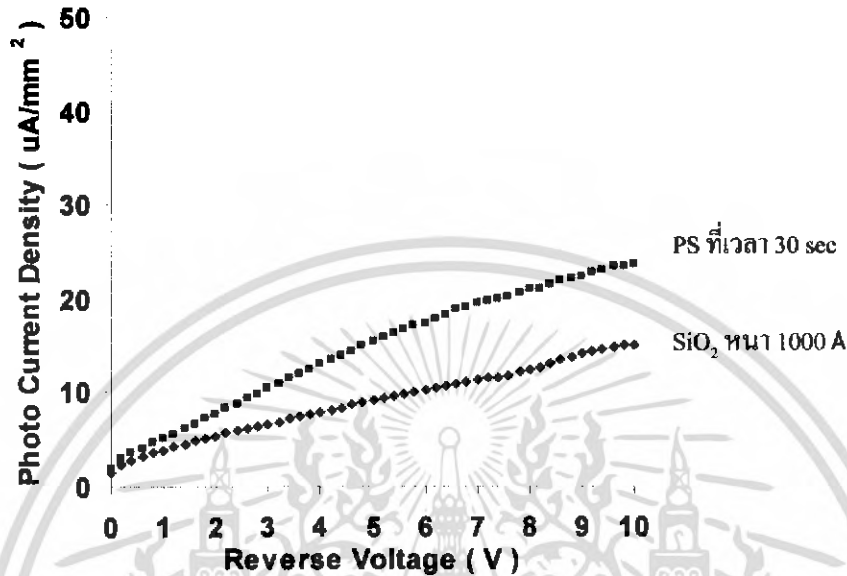
##### 4.6.1 ศึกษากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และมีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง Halogen



รูปที่ 4.16 ค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ค่าความเข้มแสงต่าง ๆ กัน โดยกำหนดให้มีความดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 V

จากรูปที่ 4.16 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์ซซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยกำหนดให้มีความดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 V จะพบว่าค่าความหนาแน่นกระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ที่ค่าความเข้มแสง 8000 lx จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ 15.02 uA/mm<sup>2</sup> ที่โฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แต่ที่ชั้นพอร์ซซิลิคอนจะมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ 25.28 uA/mm<sup>2</sup>

ต่อไปจะทำการเปรียบเทียบค่าความหนาแน่นกระแสแสงโดยให้มีแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่าง ๆ กัน ที่ค่าความเข้มแสงมากที่สุดคือ 8000 lx

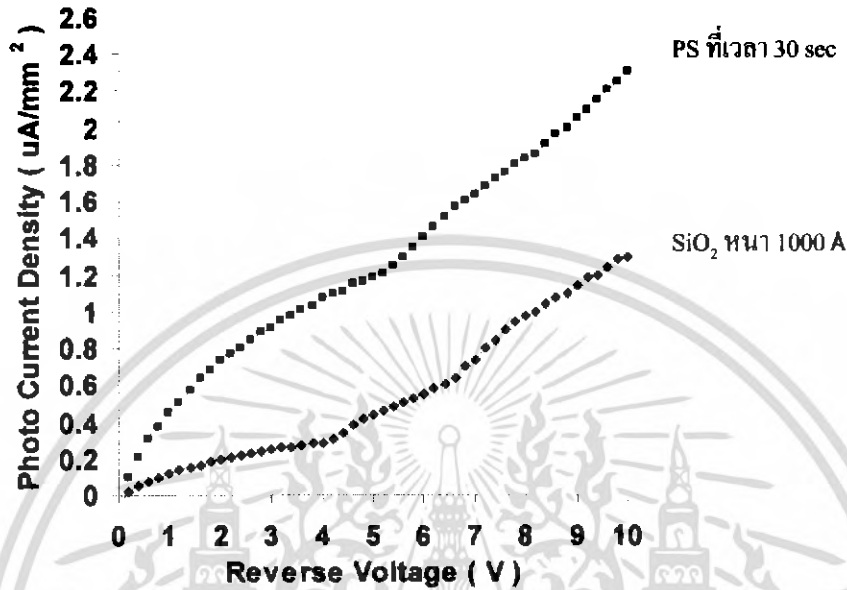


รูปที่ 4.17 ค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยกำหนดให้มีค่าความเข้มแสง 8000 lx

จากรูปที่ 4.17 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยกำหนดให้มีค่าความเข้มแสง 8000 lx จะพบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V จะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ 15.02 uA/mm<sup>2</sup> ที่โฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และที่ชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ 23.68 uA/mm<sup>2</sup> จะพบว่าชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงที่มากกว่าชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อนำค่ามาคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสแสงมีค่า 57.5 %

ต่อไปจะทำการศึกษาว่าถ้ามีการได้รับแสงแล้วค่าความหนาแน่นกระแสแสงจะมีค่าเท่าไร โดยให้แหล่งมีจ่ายแสงเป็นแสง UV

#### 4.6.2 ศึกษากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และมีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง UV



รูปที่ 4.18 ค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่มีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง UV

จากรูปที่ 4.18 แสดงค่าความหนาแน่นกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และชั้นพอร์สซิลิคอน เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่มีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง UV จะพบว่าเมื่อพิจารณาที่แรงดันเท่ากับ 10 V ของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ 1.33 uA/mm<sup>2</sup> และที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงเท่ากับ 2.3 uA/mm<sup>2</sup> จะเห็นว่าที่ชั้นพอร์สซิลิคอนให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงมากกว่าที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นกระแสแสงแล้วจะได้เท่ากับ 72.93 %

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้จะได้นำเสนอ การทดลองและผลการทดลอง สร้างซิลิกอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ซึ่งมีชั้นพอร์ซิลิกอนที่ได้จากการกัดทางเคมีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่สร้างมีขนาดพื้นที่รับแสง  $4.84 \text{ mm}^2$  แต่เงื่อนไขที่พิจารณาคือ ค่าความถี่รอยต่อ โดยมีเงื่อนไขดังนี้คือ  $X_j = 0.425, 0.596, 0.726$  และ  $0.835 \text{ }\mu\text{m}$  ในงานวิจัยได้ใช้แหล่งจ่ายแสง Halogen และ UV มาทำการศึกษา โดยที่แหล่งจ่ายแสงทั้งสองมีค่าความยาวคลื่นที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N จะมีการตอบสนองต่อแสง UV ได้ดีเมื่อความถี่รอยต่อมีความบาง คือที่  $X_j = 0.425 \text{ }\mu\text{m}$  ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง  $1.33 \text{ uA/mm}^2$  แต่เมื่อความถี่รอยต่อเพิ่มขึ้นคือ  $X_j = 0.835 \text{ }\mu\text{m}$  จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง  $0.58 \text{ uA/mm}^2$  และเมื่อให้แหล่งจ่ายแสงเป็น Halogen ที่ความถี่รอยต่อ  $0.425 \text{ }\mu\text{m}$  จะได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง  $15.02 \text{ uA/mm}^2$  และเมื่อความถี่รอยต่อเพิ่มขึ้นเป็น  $0.835 \text{ }\mu\text{m}$  ทำให้ได้ค่าความหนาแน่นกระแสแสง  $25.61 \text{ uA/mm}^2$  แสดงได้ว่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N จะตอบสนองต่อแสง Halogen ได้ดีถ้าความถี่รอยต่อมีความหนา

จากการทดลอง ได้นำชั้นพอร์ซิลิกอนมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของโฟโตไดโอดแบบ P-I-N เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการให้กระแสแสงที่เพิ่มขึ้น โดยทำการเปรียบเทียบกับชั้นลดการสะท้อนแสงที่สร้างจาก  $\text{SiO}_2$  จากการศึกษาพบว่าชั้นพอร์สที่ใช้เวลาในการกัด 30 วินาที มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง 19.16 % ส่วนชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 1000 Å มีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง 20.9 % และเมื่อนำโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงทั้งสองแบบมาทำการศึกษา โดยมีแหล่งจ่ายแสงเป็นแสง Halogen พบว่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์สเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงมากกว่า 57.5 % และเมื่อให้แหล่งจ่ายแสงเป็นแสง UV พบว่าโฟโตไดโอดแบบ P-I-N ที่มีชั้นพอร์สเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้ค่าความหนาแน่นกระแสแสงมากกว่า 72.93 %

## เอกสารอ้างอิง

รศ.ดร.สมเกียรติ สุกเดช. “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”. แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545

จิรวัดน์ ปรายเขต และ วสุ สังข์ทอง. “ศึกษากระบวนการสร้างและโครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n”. ปริญญานิพนธ์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547

นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. “การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิคอน”. วิทยานิพนธ์. สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้