

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์

DEVELOPMENT OF SILICON PLANAR P-I-N PHOTODIODE



กงศักดิ์ อิมูไร

KONGSAK AIMURAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2549

ISBN 974-15-2836-1

DEVELOPMENT OF SILICON PLANAR PIN PHOTODIODE

KONGSAK AIMURAI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2006

ISBN 974-15-2836-1

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

| | |
|-----------------------------|--|
| หัวข้อวิทยานิพนธ์ | การพัฒนาซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ |
| นักศึกษา | นายคงศักดิ์ อิมอุไร |
| รหัสนักศึกษา | 46064702 |
| ปริญญา | วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต |
| สาขาวิชา | วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ |
| พ.ศ. | 2549 |
| อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ | รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช |

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้เสนอการพัฒนาซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ ซึ่งโครงสร้างประกอบด้วยชั้น n^+ และชั้น p^+ ที่ถูกสร้างด้วยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสและโบรอนลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนชนิดอินทรินซิกสภาพความต้านทานสูง 2000 Ω -cm หนา (111) ซึ่งเป็นแผ่นฐานรองเริ่มต้น การทดลองนี้ได้ศึกษาผลของแฟลคเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และการตอบสนองทางความถี่ของโฟโต้ไดโอด เช่น ความถี่ของรอยต่อชั้นรับแสง p^+ - i พื้นที่ไวแสงประสิทธิผล ลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้า และโครงสร้างการครีกรวมถึงการประยุกต์ใช้ชั้นพอร์ซซิลิคอนแบบวิธีกัดข้อมลเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ผลการทดลองพบว่า พื้นที่ไวแสงประสิทธิผลที่ดีที่สุดคือ พื้นที่ของรอยต่อ p^+ - i โครงสร้างของการครีกรที่อยู่ระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ ช่วยลดกระแสรั่วที่ชั้นผิวสัมผัส Si/SiO₂ ได้ โดยเฉพาะตำแหน่งของการครีกรที่ใกล้ชั้น n^+ จะยิ่งช่วยลดกระแสรั่วต่ำลง นอกจากนี้ยังพบว่ากลุ่มของไดโอดที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงเมื่อนำไปทดลองตรวจจับความเข้มแสงจากหลอดฮาโลเจน กระแสแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 10-30% และกระแสแสงเพิ่มขึ้นมากกว่า 115% สำหรับตรวจจับแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยทำการตรวจวัดเปรียบเทียบกับกลุ่มของไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ผลของการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ สามารถสร้างและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไปได้

| | |
|-----------------------|--|
| Thesis Title | Development of Silicon Planar p-i-n Photodiode |
| Student | Mr. Kongsak Aimurai |
| Student ID | 46064702 |
| Degree | Master of Engineering |
| Program | Microelectronics Engineering |
| Year | 2006 |
| Thesis Advisor | Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech |

ABSTRACT

This thesis presents a development of silicon planar p-i-n photodiode. The structure consisting of the n^+ layer and the p^+ layer have been constructed by diffusing technique of phosphorus and boron on the top of intrinsic silicon wafer. The experiment investigated results of several factors of the electrical and the light current characteristics of the photodiodes such as the depth of the p^+ -i junction layer, effective-active area, the pattern of the Al-electrode, and the p^+ guard ring structure. It also includes applying porous silicon layer by stain etching as an antireflective layer on the surface of silicon photodiode. The results found that, the effective-active area is the p^+ -i junction area, the guard ring can reduce leakage current at the Si/SiO₂ interface, especially as the position of the p^+ -ring nears the n^+ layer can reduce leakage current as well. Furthermore, a group of the photodiodes fabricated with the porous silicon layer as an antireflective layer, then testing the light source from Halogen lamp, the photocurrent can increase to be about 10-30% and increase more than 115% for testing UV light source. Which compared with a group of the photodiodes that have the SiO₂ as an antireflective layer. The result of this experiment indicates that a silicon planar p-i-n photodiode is possible and it will be able to improve on the next.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ รศ. ดร. สมเกียรติ สุขเกษ ที่ให้คำชี้แนะช่วยแก้ปัญหา ตลอดจนวางแนวทางทำให้งานวิจัยนี้บรรลุเป้าหมาย และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ฐิตรุ่งเรือง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ กรรมการพิจารณาหัวข้อ และเค้าโครงวิทยานิพนธ์ที่ให้คำชี้แนะที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2549

ขอขอบคุณ คุณอนุชา เรืองพานิช และ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่อนุเคราะห์เครื่องวัด C-V

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้องของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์ของวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

สารบัญ

| | หน้า |
|---|-------|
| บทคัดย่อภาษาไทย..... | I |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... | II |
| กิตติกรรมประกาศ..... | III |
| สารบัญ..... | IV |
| สารบัญตาราง..... | VIII |
| สารบัญรูป..... | IX |
| รายการคำย่อ..... | XV |
| รายการสัญลักษณ์..... | XVI |
| รายการคำศัพท์เทคนิค..... | XVIII |
| บทที่ 1 บทนำ..... | 1 |
| 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... | 1 |
| 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา..... | 1 |
| 1.3 สมมติฐานของการศึกษา..... | 2 |
| 1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย..... | 2 |
| 1.5 การเปรียบเทียบกับหลักการที่นำเสนอและหลักการเดิม..... | 2 |
| 1.6 ขอบเขตการวิจัย..... | 3 |
| 1.7 ขั้นตอนการศึกษา..... | 5 |
| บทที่ 2 ทฤษฎี..... | 6 |
| 2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ..... | 6 |
| 2.1.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรงดูดกลืนแสงในสาร กึ่งตัวนำ..... | 6 |
| 2.1.2 รูปแบบของคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวใหม่..... | 7 |
| 2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ..... | 9 |
| 2.1.3.1 การดูดกลืนแสงพื้นฐาน..... | 9 |
| 2.1.3.2 การดูดกลืนแสงในระดับพลังงานของอะตอมสารเจือ..... | 10 |
| 2.1.3.3 การดูดกลืนแสงด้วยเอกซิตอน..... | 11 |
| 2.1.3.4 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ..... | 11 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 2.2 คุณสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสง..... | 12 |
| 2.2.1 ประสิทธิภาพควอนตัม..... | 12 |
| 2.2.2 สภาพการตอบสนอง..... | 14 |
| 2.2.3 ความเร็วในการตอบสนอง..... | 15 |
| 2.3 โฟโอดีไดโอด..... | 15 |
| 2.3.1 พื้นฐานของโฟโอดีไดโอด..... | 16 |
| 2.3.1.1 ปฏิกิริยาของโฟโอดีไดโอดและลักษณะสมบัติของ กระแสและแรงดัน..... | 17 |
| 2.3.1.2 รอยต่อพีเอ็น ภายใต้แรงดันย้อนกลับและกระแสมีด..... | 17 |
| 2.4 พินโฟโอดีไดโอด..... | 18 |
| 2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน..... | 19 |
| 2.4.2 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของกระแสและแรงดัน..... | 22 |
| 2.4.2.1 กระแสแสงและกระแสมีด..... | 22 |
| 2.4.2.2 กระแสครีพท์และกระแสแพร่..... | 23 |
| 2.4.3 การตอบสนองทางความถี่..... | 24 |
| 2.4.3.1 ค่าเวลาคงที่ CR..... | 24 |
| 2.4.3.2 เวลาส่งผ่านภายในชั้นปลอดพาหะ..... | 24 |
| 2.4.4 สัญญาณรบกวนในพินโฟโอดีไดโอด..... | 25 |
| 2.5 พอร์สซิลิคอน..... | 27 |
| 2.5.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน..... | 27 |
| 2.5.2 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน..... | 28 |
| 2.5.3 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิคอน..... | 29 |
| 2.5.4 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน..... | 32 |
| 2.5.5 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน..... | 34 |
| 2.5.6 วิธีการสร้างพอร์สซิลิคอน..... | 35 |
| 2.5.6.1 วิธีการกัดข้อมสี่..... | 36 |
| 2.5.6.2 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี..... | 36 |
| 2.5.7 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน..... | 38 |
| 2.6 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอนที่เหมาะสมในการประยุกต์ในโฟโอดีไดโอด..... | 38 |

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

| | |
|---|----|
| 2.7 แนวทางการพัฒนาซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์..... | 39 |
| 2.7.1 ลักษณะของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์..... | 40 |
| 2.7.2 พอร์ตซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในโฟโตไดโอด..... | 42 |
| ชนิด p-i-n แบบพลาแนร์..... | 42 |
| | |
| บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง..... | |
| 3.1 การออกแบบ..... | 44 |
| 3.1.1 การออกแบบมาส์คด้วยโปรแกรม CorelDraw..... | 44 |
| 3.1.2 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ รูปแบบที่หนึ่ง..... | 47 |
| 3.1.3 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ รูปแบบที่สอง..... | 50 |
| 3.2 กระบวนการสร้าง..... | 55 |
| 3.2.1 ขั้นตอนการสร้างรูปแบบที่หนึ่ง..... | 56 |
| 3.2.2 ขั้นตอนการสร้างรูปแบบที่สอง..... | 58 |
| 3.2.3 ขั้นตอนการสร้างพอร์ตซิลิคอน..... | 61 |
| | |
| บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง..... | 64 |
| 4.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง..... | 64 |
| 4.2 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ รูปแบบที่หนึ่ง..... | 65 |
| 4.2.1 ความลึกของรอยต่อชั้นรับแสง..... | 65 |
| 4.2.2 พื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพ..... | 68 |
| 2.2.2.1 พื้นที่รับแสงรอยต่อ $p^+ - i$ | 68 |
| 2.2.2.2 พื้นที่ชั้น i | 75 |
| 2.2.2.3 ผลการทดลองของชั้นรับแสง p^+ และชั้นรับแสง n^+ | 78 |
| 4.2.3 การตอบสนองทางความถี่..... | 80 |
| 4.3 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ รูปแบบที่สอง..... | 82 |
| 4.3.1 พื้นที่รับแสง (active area)..... | 82 |
| 4.3.1 ผลการทดลองของลวดลายขั้วโลหะ..... | 83 |
| 4.3.1 ผลการทดลองของโครงสร้าง Guard ring..... | 84 |
| 4.4 พอร์ตซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง..... | 88 |

สารบัญ (ต่อ)

| | หน้า |
|--|------|
| 4.4.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิคอน..... | 88 |
| 4.4.2 การทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนบนไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ | 90 |
| 4.4.3 การทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนบนไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ | 94 |
| | |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง..... | 95 |
| | |
| เอกสารอ้างอิง..... | 98 |
| ภาคผนวก..... | 101 |
| ภาคผนวก ก. | |
| ขั้นตอนการสร้างซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมา..... | 102 |
| ภาคผนวก ข. | |
| ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่..... | 111 |
| | |
| ประวัติผู้เขียน..... | 128 |

สารบัญตาราง

| ตารางที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.1 ขนาดของพื้นที่รับแสง ขนาด i และพื้นที่ในส่วนอื่น..... | 49 |
| 3.2 ขนาดของพื้นที่รับแสง p^+ (p^+ active area) ในส่วนที่ ส่วน i และส่วนอื่น..... | 52 |
| 3.3 ขนาดต่างๆ ในส่วนพื้นที่รับแสง p^+ ชั้น i และชั้น n^+ | 53 |

สารบัญรูป

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 1.1 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์..... | 3 |
| 1.2 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ ที่มีกั้วครึ่งระหว่างชั้น p^+ และ n^+ | 4 |
| 2.1 ลักษณะของแถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์ในฟังก์ชันของเลขคลื่น k แบบช่องแถบตรง และ (ข) แบบช่องแถบไม่ตรง..... | 6 |
| 2.2 กระบวนการการรวมตัวใหม่ระหว่างแถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์ (ก) แบบช่องแถบตรง และ (ข) แบบช่องแถบไม่ตรง..... | 9 |
| 2.3 ลักษณะของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ..... | 11 |
| 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและความยาวคลื่นแสง..... | 12 |
| 2.5 การดูดกลืนแสงและการสะท้อนของพลังงานแสงที่ตกกระทบ..... | 13 |
| 2.6 สเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ..... | 14 |
| 2.7 สภาพการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงในอุดมคติและในช่วงใช้งาน..... | 15 |
| 2.8 โฟโอดีไดโอด (ก) วงจรไบอัส และ (ข) โหมดการทำงาน..... | 17 |
| 2.9 กระแสมืดที่เกิดขึ้นในโฟโอดีไดโอด ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ..... | 18 |
| 2.10 สเปกตรัมผลตอบสนองของพินโฟโอดีไดโอดที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่างๆ..... | 19 |
| 2.11 ลักษณะแถบพลังงานของพินโฟโอดีไดโอด..... | 21 |
| 2.12 วงจรสมมูลของพินโฟโอดีไดโอด..... | 22 |
| 2.13 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดัน ขณะที่ได้รับพลังงานแสงเพิ่มขึ้น..... | 23 |
| 2.14 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน..... | 28 |
| 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิคอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิคอน..... | 29 |
| 2.16 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ..... | 29 |
| 2.17 ประเภทของพอร์สซิลิคอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน..... | 30 |
| (ก) ลักษณะหลุมตัน..... | 30 |
| (ข) ลักษณะถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน..... | 30 |
| (ง) ลักษณะโพรงปิด..... | 30 |
| (จ) ลักษณะทะเล..... | 30 |
| 2.18 ประเภทของพอร์สซิลิคอนแบ่งตามรูปทรงของรูพรุน..... | 31 |
| (ก) ทรงกระบอก..... | 31 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| (ข) ทรงขวดหมึก(ค)ทรงกรวย | 31 |
| (ง) ทรงลูกบาศก์ | 31 |
| (จ) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด..... | 31 |
| 2.19 ประเภทของพอร์สซilikอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน..... | 31 |
| 2.20 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ..... | 32 |
| 2.21 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซilikอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิกอน..... | 34 |
| 2.22 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซilikอนเพื่ออธิบาย คุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์..... | 35 |
| 2.23 การสร้างพอร์สซilikอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่ และ ตัวอย่างของพอร์สซilikอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี่..... | 36 |
| 2.24 ลักษณะโครงสร้างของซิลิกอนโฟโวลูมิเนสเซนซ์ชนิด p-i-n แบบพลานาร์..... | 40 |
| 2.25 ลักษณะแถบพลังงาน ขณะได้รับ โปสิตรอนกลับ..... | 40 |
| 2.26 ลักษณะของโฟโวลูมิเนสเซนซ์ชนิด p-i-n แบบพลานาร์ที่มีชั้นพอร์สซilikอนเป็นชั้นลดการ สะท้อนแสง..... | 42 |
| 3.1 ลักษณะของ screen หน้าจอโปรแกรม CorelDraw..... | 45 |
| 3.2 ลักษณะของ Dynamic Guides..... | 46 |
| 3.3 ลักษณะของ Snap to Objects..... | 46 |
| 3.4 โครงสร้าง p-i-n แบบพลานาร์ รูปแบบที่หนึ่ง..... | 48 |
| 3.5 ลวดลายต้นแบบลักษณะที่หนึ่ง..... | 48 |
| 3.6 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาดพื้นที่รับแสงต่างกัน 4 ค่า..... | 49 |
| 3.7 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาด i ต่างกัน 4 ค่า..... | 49 |
| 3.8 โครงสร้าง p-i-n แบบพลานาร์ รูปแบบที่สอง..... | 50 |
| 3.9 ลวดลายต้นแบบลักษณะที่สอง..... | 51 |
| 3.10 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาดพื้นที่รับแสงต่างกัน..... | 51 |
| 3.11 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาด i ต่างกัน..... | 52 |
| 3.12 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขั้วไฟฟ้าของพื้นที่รับแสงต่างกัน..... | 53 |
| 3.13 แสดงแบบลวดลายและภาพตัดขวางของ p-i-n แบบพลานาร์ ที่มี p ⁺ -ring..... | 54 |
| 3.14 ลวดลายต้นแบบ ที่มีระยะของ p ⁺ -ring ต่างกัน..... | 54 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|---|------|
| 3.15 แผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..... | 56 |
| 3.16 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัสของมาส์ค 1..... | 56 |
| 3.17 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอนของมาส์ค 2..... | 56 |
| 3.18 การเปิดช่องขั้วสัมผัสของมาส์ค 3..... | 57 |
| 3.19 การสร้างขั้วโลหะของมาส์ค 4..... | 57 |
| 3.20 โฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ ของลวดลายรูปแบบที่หนึ่ง ที่สร้างเสร็จบนแผ่น ผลึกซิลิคอน..... | 57 |
| (ก) ที่เวลาแพร่ 15 นาที..... | 57 |
| (ข) ที่เวลาแพร่ 25 นาที..... | 57 |
| (ค) ที่เวลาแพร่ 35 นาที..... | 57 |
| (ง) ที่เวลาแพร่ 45 นาที..... | 57 |
| 3.21 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..... | 58 |
| 3.22 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัสของมาส์ค 1..... | 58 |
| 3.23 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอนของมาส์ค 2..... | 59 |
| 3.24 การเปิดช่องขั้วสัมผัสของมาส์ค 3..... | 59 |
| 3.25 การสร้างขั้วโลหะของมาส์ค 4..... | 59 |
| 3.26 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..... | 59 |
| 3.27 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอนของมาส์ค 1..... | 60 |
| 3.28 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัสของมาส์ค 2..... | 60 |
| 3.29 การเปิดช่องขั้วสัมผัสของมาส์ค 3..... | 60 |
| 3.30 การสร้างขั้วโลหะของมาส์ค 4..... | 60 |
| 3.31 การเปิดช่องขั้วสัมผัสและช่องสำหรับสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนของมาส์ค 3..... | 61 |
| 3.32 การเคลือบอะลูมิเนียมสำหรับสร้างเป็นขั้วโลหะไฟฟ้า..... | 61 |
| 3.33 การสร้างลวดลายขั้วโลหะของมาส์ค 4..... | 62 |
| 3.34 โฟโตไดโอดที่ผ่านขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนของมาส์ค 5..... | 62 |
| 3.35 โฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ ของลวดลายรูปแบบที่สอง ที่สร้างเสร็จบนแผ่น ผลึกซิลิคอน..... | 62 |
| (ก) โฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง..... | 62 |

สารบัญญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| (ข) และ (ค) ลักษณะของโฟโตรีโอดในรูปแบบต่างๆ ที่มีชั้นชิลิกอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง..... | 62 |
| 3.36 โฟโตรีโอดที่ติดตั้งลงบนตัวถังแบบกระป๋อง..... | 63 |
| (ก) กลุ่มของไดโอดที่ยังไม่มีชั้นเรซินป้องกันรอยขีดข่วนและความชื้น..... | 63 |
| (ข) กลุ่มของไดโอดที่มีชั้นเรซินเพื่อป้องกันการขีดข่วนและความชื้น..... | 63 |
| 4.1 ลักษณะของอุปกรณ์ในการทดลองวัดลักษณะสมบัติของไดโอด..... | 64 |
| 4.2 กราฟแสดงความลึกของรอยต่อ (x_j) ที่เวลา 45 นาที..... | 65 |
| (ก) แสดงค่าความต้านทาน (Resistance) ในเนื้อสารชิลิกอน..... | 65 |
| (ข) ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ..... | 65 |
| 4.3 ลักษณะของกระแสแสงและความลึกของรอยต่อ $p^+ - i$ ขณะได้รับความเข้มแสงคงที่ 3000 lx พื้นที่รับแสง 1.2 mm ² | 67 |
| 4.4 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน..... | 68 |
| 4.5 ลักษณะของกระแสและแรงดัน ขณะไม่ได้รับแสง..... | 69 |
| 4.6 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสมีดและรอยต่อ $p^+ - i$ | 70 |
| 4.7 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและแรงดันไบอัส..... | 70 |
| 4.8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับแสงตกกระทบ..... | 71 |
| (ก) ความเข้มแสงน้อย..... | 71 |
| (ข) ความเข้มแสงมาก..... | 71 |
| 4.9 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและพื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ | 72 |
| 4.10 ลักษณะการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ภายในพื้นที่บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ $p^+ - i$ | 73 |
| (ก) พื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ น้อย..... | 73 |
| (ข) พื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ มาก..... | 73 |
| 4.11 ลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าและแรงดัน..... | 73 |
| 4.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและแรงดันย้อนกลับ..... | 74 |
| 4.13 ลักษณะความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและพื้นที่รอยต่อ ที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ..... | 74 |
| 4.14 ลักษณะของกระแสมีดและความกว้างของชั้น i | 76 |
| 4.15 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและความกว้างของชั้น i | 76 |
| 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างบริเวณปลอดพาหะและแรงดันไบอัสย้อนกลับ..... | 77 |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| 4.17 ลักษณะของบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล..... | 78 |
| 4.18 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและความเข้มแสงของโฟโตรีโอดีโอด..... | 78 |
| 4.19 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ $p^+ - n^-$ และรอยต่อ $n^+ - n^-$ | |
| (ก) ชั้นรับแสง p^+ | 79 |
| (ข) ชั้นรับแสง n^+ | 79 |
| 4.20 ลักษณะของวงจรการทดลองการตอบสนองทางความถี่..... | 80 |
| 4.21 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณแสงทางความถี่ของโฟโตรีโอดีโอดชนิด p-i-n | |
| แบบพลาเนอร์..... | 81 |
| 4.22 ลักษณะของกระแสมืดและพื้นที่รอยต่อ ขณะไม่ได้รับแสง..... | 83 |
| 4.23 ลักษณะของกระแสแสงและจำนวนกริด..... | 84 |
| 4.24 ลักษณะของกระแสมืดแรงดันไบอัสย้อนกลับของโฟโตรีโอดีโอดที่มีชั้นกักร์ดริง p^+ | |
| ล้อมรอบและอยู่ห่างจากชั้นรับแสงเป็นระยะต่างๆ..... | 85 |
| 4.25 ลักษณะของกระแสมืดและระยะห่างของ p^+ - ring ที่แรงดันไบอัส -1 V และ -3 V..... | 85 |
| 4.26 ลักษณะของการเกิดกระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์..... | 86 |
| (ก) เกิดกระแสรั่วสูง ขณะไม่มี p^+ - ring..... | 86 |
| (ข) กระแสรั่วลดลง เมื่อมี p^+ - ring..... | 86 |
| (ค) กระแสรั่วต่ำสุด เมื่อ p^+ - ring เข้าใกล้ ชั้น n^+ | 86 |
| 4.27 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป | |
| ที่เวลาต่างๆ 35 วินาที 40 วินาที 45 วินาที และ 45 วินาที..... | 89 |
| 4.28 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ | |
| จากการกัดย้อมสีที่เวลาต่างๆ กัน..... | 89 |
| 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องไมโครสโคป..... | 90 |
| (ก) โฟโตรีโอดีโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน..... | 90 |
| (ข) โฟโตรีโอดีโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..... | 90 |
| 4.30 ลักษณะของกระแสมืดและพื้นที่รอยต่อ ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงเป็น | |
| ซิลิคอนไดออกไซด์และพอร์สซิลิคอน ขณะไม่ได้รับแสง..... | 91 |
| 4.31 ลักษณะของกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของไดโอด ที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ เปรียบเทียบ | |
| ระหว่างชั้นพอร์สซิลิคอน (PS) และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) | |

สารบัญรูป(ต่อ)

| รูปที่ | หน้า |
|--|------|
| ขณะได้รับแสงฮาโลเจน..... | 92 |
| 4.32 ลักษณะของกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของไดโอด ที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ เปรียบเทียบระหว่างชั้นพอร์สซิลิคอน(PS) และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ขณะได้รับแสงอัลตราไวโอเลต(UVC)..... | 92 |
| 4.33 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอน(PS) และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ..... | 93 |
| 4.34 ลักษณะของกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของไดโอด ที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ เปรียบเทียบระหว่างชั้นพอร์สซิลิคอน (PS) และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)..... | 94 |

รายการคำย่อ

| อักษรย่อ | คำเต็มภาษาอังกฤษ | คำแปลภาษาไทย |
|------------------|----------------------------|------------------------------|
| Al | Aluminium | อะลูมิเนียม |
| AlGaAs | Aluminium Gallium Arsenide | อะลูมิเนียมแกเลียมอาร์เซไนด์ |
| APD | Avalanche Photodiode | อะวะลันซ์โฟโตไดโอด |
| ARC | Anti-Reflection Coating | ชั้นลดการสะท้อนแสง |
| DI | De-ionization water | น้ำบริสุทธิ์ |
| HF | Hydrofluoric acid | กรดไฮโดรฟลูออริก |
| HNO ₃ | Nitric acid | กรดไนตริก |
| GaAs | Gallium Arsenide | แกเลียมอะไซไนด์ |
| GaN | Gallium Nitride | แกเลียมไนไตรด์ |
| Ge | Germanium | เยอรมันเนียม |
| I | Intrinsic | อินทรินซิก |
| InGaAs | Indium Gallium Arsenide | อินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์ |
| InP | Indium Phosphide | อินเดียมฟอสไฟด์ |
| PS | Porous Silicon | พอร์ซซิลิคอน |
| R-center | Recombination center | ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ |
| Si | Silicon | ซิลิคอน |
| SiO ₂ | Silicon dioxide | ซิลิคอนไดออกไซด์ |

รายการสัญลักษณ์

| สัญลักษณ์ | ความหมาย |
|---------------------|-----------------------------------|
| C_j | ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ |
| B_{bw} | แบนด์วิท |
| E_0 | ระดับสูญญากาศ |
| E_A | ระดับผู้รับ |
| E_C | ระดับพลังงานความนำ |
| E_D | ระดับผู้ให้ |
| E_F | ระดับเฟอร์มิ |
| E_g | ช่องว่างพลังงาน |
| E_{photon} | พลังงานโฟตอน |
| E_V | ระดับพลังงานวาเลนซ์ |
| E_{PS} | ช่องพลังงานของพอร์ต |
| f | ความถี่ |
| f_c | ความถี่คัทออฟ |
| I_{dr} | กระแสครีพท์ |
| I_{diff} | กระแสแพร่ |
| I_{photo} | กระแสแสง |
| I_d | กระแสมีด |
| I_{ds} | กระแสรั่วที่ผิว |
| I_{dg-r} | กระแสเนื่องจากการเกิดและการรวมตัว |
| I_{di} | กระแสทันเนล |
| I_{dd} | กระแสแพร่ |
| I_{ph} | กระแสไดโอด |
| J_{ph} | ความหนาแน่นกระแสแสง |
| J_{dr} | ความหนาแน่นกระแสครีพท์ |
| J_{diff} | ความหนาแน่นกระแสแพร่ |
| \bar{I} | กระแสสถานะนิ่ง |
| k | เลขคลื่น |

รายการสัญลักษณ์(ต่อ)

| สัญลักษณ์ | ความหมาย |
|-----------------|--|
| n^+ | สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นความเข้มสูง |
| p | โมเมนตัมของอิเล็กตรอน |
| P_{inc} | กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ |
| p^+ | สารกึ่งตัวนำชนิดพีความเข้มสูง |
| q | ประจุอิเล็กตรอน |
| R_{sh} | ความต้านทานชั้นดี |
| V_R | แรงดันไบอัสย้อนกลับ |
| V_{op} | แรงดันวงจรเปิด |
| V_{bi} | แรงดันภายใน |
| T | อุณหภูมิสัมบูรณ์ |
| t_r | ช่วงเวลาขาขึ้น |
| t_f | ช่วงเวลาขาลง |
| α | สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ |
| \mathcal{H} | สภาพการตอบสนอง |
| \mathcal{E}_s | เปอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ |
| ϵ_0 | เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ |
| η | ประสิทธิภาพควอนตัม |
| η_{ext} | ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก |
| η_{int} | ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน |
| λ | ความยาวคลื่น |
| h | ค่าค่าคงที่ของพลังค์ |
| $h\nu$ | โฟตอน หรือพลังงานของแสง |
| \hbar | ค่าคงที่ของพลังค์แบบลดค่า ($=h/2\pi$) |
| ν | ความถี่ของแสง |

รายการคำศัพท์เทคนิค

| ภาษาไทย | ภาษาอังกฤษ |
|--|---------------------------------------|
| กฎของการเลือก | selection rule |
| กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม | momentum conservative rule |
| กระบวนการรวมตัวใหม่ | recombination process |
| กระบวนการอึพีแทกซี | epitaxy process |
| กระแสครีฟท์ | drift current |
| กระแสทันเนล | tunnel-current |
| กระแสเนื่องจากการเกิดและการรวมตัว | generation-recombination current |
| กระแสแพร่ | diffusion current |
| กระแสรั่วที่ผิว | surface leakage current |
| กระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนไดออกไซด์ | Si/SiO ₂ interface leakage |
| กระแสสภาวะนิ่ง | steady-state current |
| กระแสอิ่มตัว | saturation current |
| การกัดข้อมสี่ | stain etching |
| การดูดกลืน | absorption |
| การดูดกลืนแสงพื้นฐาน | fundamental absorption |
| การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ | free electron absorption |
| การโด๊ปสารเจือปนอย่างเจือจาง | lightly doped |
| การตอบสนองทางความถี่ | frequency response |
| ควอนตัมไซส์เอฟเฟค | quantum size effect |
| ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค | quantum confinement effect |
| ควอนตัมในเชิง 1 มิติ | quantum wire |
| ควอนตัมในเชิง 2 มิติ | quantum well |
| ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ | quantum dot |
| ความต้านทานไฟฟ้า | electrical resistance |
| ความหนาแน่นกระแสแสง | photocurrent density |
| ความเร็วกระเจิงที่ถูกจำกัด | scattering-limited velocity |
| ความเร็วครีฟท์คงที่ | constant drift velocity |
| ความเร็วในการตอบสนอง | response speed |

รายการคำศัพท์เทคนิค(ต่อ)

| ภาษาไทย | ภาษาอังกฤษ |
|--------------------------|-----------------------------|
| ความไวสูง | high sensitivity |
| ค่าคงที่ของเวลา | time constant |
| ค่าคงที่เวลา CR | CR-Time constant |
| ชั้นปลอดพาหะ | depletion layer |
| ชั้นลดการสะท้อนแสง | Anti-Reflection Coating |
| ซิลิคอน | silicon |
| เซลล์แสงอาทิตย์ | Solar cell |
| แถบพลังงานแบบช่องไม่ตรง | indirect band gap |
| ประสิทธิภาพควอนตัม | quantum efficiency |
| ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก | external quantum efficiency |
| ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน | internal quantum efficiency |
| ปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก | photovoltaic effect |
| พอร์ซซิลิคอน | porous Silicon |
| โฟโตไดโอดชนิด p-i-n | p-i-n photodiode |
| พาหะส่วนเกิน | excess carriers |
| โฟตอน | photon |
| โฟนอน | phonon |
| โฟโตคอนดักชัน | photoconduction |
| โฟโตไดโอด | photodiode |
| โฟโตลูมิเนสเซนซ์ | photoluminescence |
| โฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน | internal photoelectric |
| ภาวะสมดุลความร้อน | thermal equilibrium |
| ระดับพลังงานกระตุ้น | excited state |
| ระดับพลังงานที่ผิว | surface state |
| แรงดันพังทลายสูง | high breakdown voltage |
| ลักษณะของรูพรุน | pore type |
| เลขคลื่น | wave number |
| เวลาการแพร่ | diffusion time |

รายการคำศัพท์เทคนิค(ต่อ)

| ภาษาไทย | ภาษาอังกฤษ |
|-----------------------------|---------------------------------|
| เวลาการเหนี่ยวนำ | induction time |
| เวลาส่งผ่าน | transit time |
| ศักย์ไฟฟ้าภายใน | built-in potential |
| สัญญาณรบกวน | noise |
| สัญญาณรบกวนต่ำ | low noise |
| สัญญาณรบกวนชนิดควอนตัม | quantum noise |
| สัญญาณรบกวนชนิดความร้อน | thermal noise |
| สัญญาณรบกวนชนิดจอห์นสัน | Johnson noise |
| สัญญาณรบกวนชนิดช็อต | shot noise |
| สถานะพื้น | ground state |
| สารกึ่งตัวนำแถบช่องตรง | direct band gap semiconductor |
| สารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง | indirect band gap semiconductor |
| สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก | intrinsic semiconductor |
| สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก | extrinsic semiconductor |
| อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง | optoelectronic device |
| อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ | electroluminescence |
| เอกซิตอน | exciton |

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันงานด้านอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic device) มีบทบาทอย่างกว้างขวางในระบบอุตสาหกรรมทางแสง และนับวันก็ยิ่งมีบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ เช่น ในระบบสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง ระบบเครื่องมือแพทย์ ระบบด้านความปลอดภัย หรือแม้แต่ใน ระบบทางการทหาร เป็นต้น ซึ่งล้วนแล้วมีประโยชน์ทั้งสิ้น ดังนั้นจึงเป็นสิ่งจำเป็นที่จะต้องมีการศึกษาและพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ด้านนี้ โดยเฉพาะอุปกรณ์ที่สามารถเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงให้อยู่ในรูปของพลังงานไฟฟ้าได้ ส่วนใหญ่จะใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำในลักษณะของรอยต่อพีเอ็น เช่น โฟโตไดโอด พินโฟโตไดโอด และอะวาลานซ์โฟโตไดโอด เป็นต้น ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ สนใจนำพินโฟโตไดโอดมาทำการศึกษา วิจัย และพัฒนา เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิดนี้ มีลักษณะเด่นกว่าโฟโตชนิดอื่นๆ อยู่หลายประการ ถึงแม้ว่าในการสร้างโฟโตไดโอดชนิดนี้ จะสร้างได้ด้วยเทคโนโลยีขั้นพื้นฐานด้วยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือในเตาที่มีอุณหภูมิสูง และในห้องปฏิบัติการที่อยู่ในระดับต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน แต่การทดลองและผลการทดลองในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์และเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังการศึกษา วิจัย และพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ โดยมีวัตถุประสงค์หลัก ดังนี้

1. เพื่อศึกษาผลความลึกของรอยต่อด้านรับแสง (xj)
2. เพื่อศึกษาผลของพื้นที่ไวแสงประสิทธิผล
3. เพื่อศึกษาผลของลวดลายขั้วโลหะชั้นรับแสง
4. เพื่อศึกษาผลของการโค้ง
5. เพื่อศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

ในการพัฒนานี้จะมุ่งเน้นให้ไดโอดมีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้น ที่เกิดจากการปรับปรุงโครงสร้างในลักษณะรูปแบบต่างๆ การหาพื้นที่ไวแสงประสิทธิผล และการสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงจากชั้นพอร์สซิลิคอน

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

พินโฟโต้ไดโอดมีลักษณะเด่นอยู่หลายประการ เช่น มีกระแสมืดต่ำ มีแรงดันพังทลายสูง มีความไว และความรวดเร็วในการทำงานสูง อย่างไรก็ตาม การศึกษา วิจัย และพัฒนา เพื่อเพิ่มสมรรถนะให้สูงขึ้นนั้นก็ยังเป็นสิ่งจำเป็นอยู่ ดังนั้น ในการศึกษาครั้งนี้ ได้ตั้งสมมติฐานไว้ 2 กรณี คือ

1. ทำการออกแบบและสร้างพินโฟโต้ไดโอดให้มีลักษณะของโครงสร้างในรูปแบบต่างๆ เพื่อศึกษาผลของพื้นที่ไวแสงประสิทธิผล เช่น พื้นที่รับแสงประสิทธิผล รูปแบบลวดลายของขั้วโลหะด้านรับแสง รวมทั้งโครงสร้างของโฟโต้ไดโอดที่มี Guard ring ในลักษณะต่างๆ สำหรับลดกระแสรั่วที่เกิดขึ้นที่ผิวระหว่างซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และซิลิคอน (Si) ซึ่งจะทำให้โฟโต้ไดโอดชนิดนี้มีประสิทธิภาพที่ดีขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานได้อย่างเหมาะสม
2. ศึกษาผลของชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เนื่องจากชั้นพอร์ซซิลิคอนหักเหของแสงต่ำกว่าซิลิคอน จึงทำให้มีการสะท้อนแสงที่ผิวต่ำ อีกทั้งยังเป็นชั้นดักจับแสงได้ดีอีกด้วย ดังนั้น จะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มกระแสแสงของโฟโต้ไดโอด

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

การพัฒนาพินโฟโต้ไดโอด สิ่งสำคัญอย่างหนึ่ง คือ การเข้าใจถึงโครงสร้างภายในของตัวอุปกรณ์ เช่น ลักษณะของการเกิดกระแสมืด กระแสแสง และความเร็วในการตอบสนอง เป็นต้น ลักษณะต่างๆ เหล่านี้ เกิดขึ้นเนื่องจากสาเหตุใด และสามารถทำให้ลดลงหรือเพิ่มขึ้นได้อย่างไร แล้วนำหลักการดังกล่าวไปออกแบบวิเคราะห์ และพัฒนา ซึ่งในการวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาถึงลักษณะของโครงสร้างในรูปแบบต่างๆ เช่น ลักษณะของโครงสร้างที่มี Guard ring ที่จะช่วยลดกระแสมืดได้ ลักษณะของลวดลายของขั้วโลหะ และ ลักษณะของพื้นที่รับแสง ที่จะช่วยเพิ่มกระแสแสงให้สูงขึ้น

นอกจากนี้ ศึกษาชั้นพอร์ซซิลิคอน ซึ่งสร้างได้หลายวิธีแต่ที่ง่ายและประหยัดที่สุดคือวิธีการกัดข้อมสี่ ซึ่งเนื้อซิลิคอนบางส่วนจะถูกละลายออกไปด้วยปฏิกิริยาเคมีของสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดไนตริก (HNO_3) ทำให้มีรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดขึ้นมากมาย กลายเป็นชั้นพอร์ซซิลิคอน ที่ทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในพินโฟโต้ไดโอด

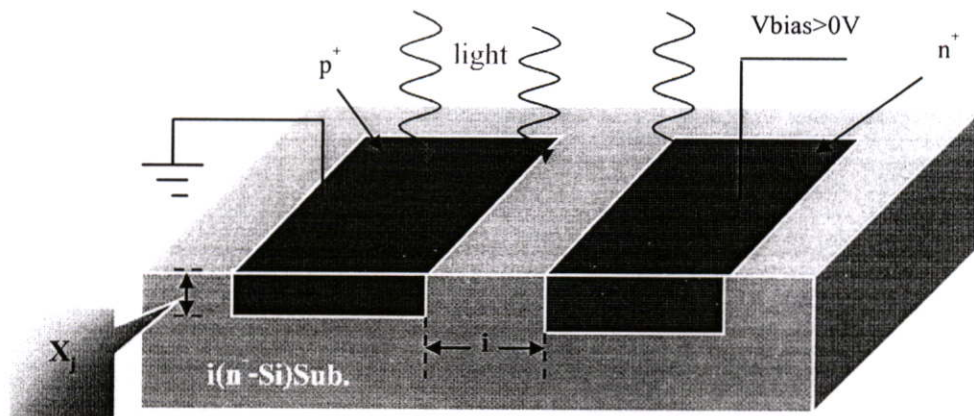
1.5 การเปรียบเทียบกับหลักการที่นำเสนอและหลักการเดิม

สำหรับโฟโต้ไดโอด ชั้นลดการสะท้อนแสง (anti-reflection layer) นั้นมีบทบาทอย่างมากในการเพิ่มประสิทธิภาพให้สูงขึ้น และยังเป็นชั้นที่สามารถเปลี่ยนแปลงย่านความถี่ของแสงได้อีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วจะเป็นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ถูกสร้างจากกระบวนการออกซิเดชันด้วย

ความร้อนและต้องใช้อุณหภูมิสูงประมาณ $1,000^{\circ}\text{C}$ เป็นระยะเวลานาน ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างของผลึกและความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้านรับแสง หรือกระบวนการออกซิเดชันแบบซีวีดี ต้องใช้ก๊าซไฮโดรเจน (SiH_4) ซึ่งอันตราย และราคาแพงทำให้มีต้นทุนในการผลิตสูง ในขณะที่การใช้ชั้นพอร์ซซิลิคอนจากวิธีการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง สามารถสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว ในสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งไม่ส่งผลกระทบต่อโครงสร้างของผลึกเนื่องจากความร้อนที่สูงและความลึกของรอยต่อ ทำให้ประหยัดค่าใช้จ่ายลง

อีกประการหนึ่งคือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้าของโพลีไดโอดจะช่วยลดการสะท้อนแสงเพียงอย่างเดียว และยังส่งผลให้เกิดกระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนไดออกไซด์ (Si/SiO_2 , interface leakage) ในขณะที่ชั้นพอร์ซซิลิคอนจะช่วยลดการสะท้อนแสง (anti-reflection) ยังมีคุณสมบัติในการดักจับแสง (light trapping) และไม่ทำให้เกิดกระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนไดออกไซด์ อีกด้วย

1.6 ขอบเขตของการวิจัย



รูปที่ 1.1 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์

การสร้างโพลีไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ โดยทำการศึกษาผลของแฟลคเตอร์ต่างๆ ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และการตอบสนองสัญญาณแสงทางความถี่ ดังต่อไปนี้

1. ศึกษาความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้านรับแสง โดยทำการแบ่งกลุ่มโพลีไดโอดออกเป็น 4 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มจะมีขนาดความลึกของรอยต่อ ตามเวลาในการขับลึก (drive-in) คือ 15 นาที 25 นาที 35 นาที และ 45 นาที แสดงโครงสร้างในรูปที่ 1.1
2. ศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิผล ดังแสดงในรูปที่ 1.1 ทั้งพื้นที่รอยต่อ $p^+ - i$ ความกว้างของชั้น i หรือพื้นที่ระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ และพื้นที่ของรอยต่อ $n^+ - i$ โดยทำการ

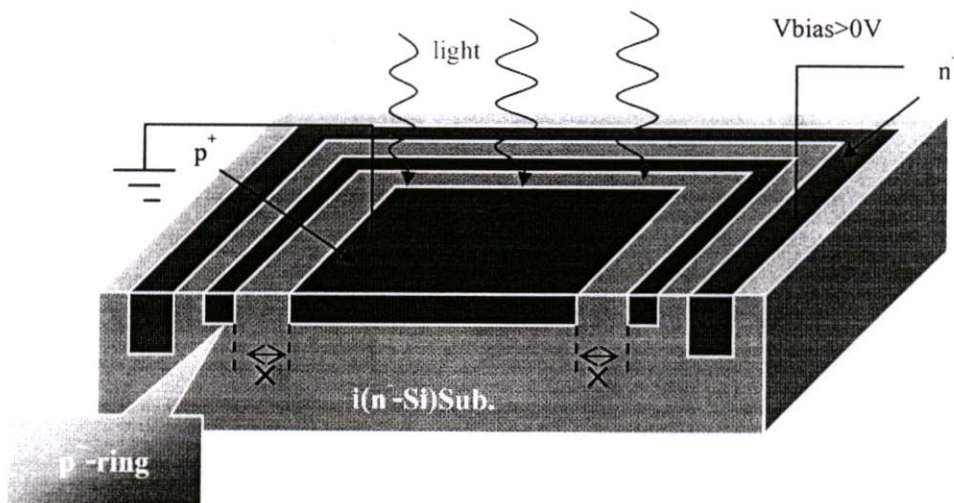
แบ่งกลุ่มโฟโตนิกไดโอดออกเป็น 3 กลุ่ม ซึ่งแต่ละกลุ่มกำหนดให้พื้นที่รับแสงมีขนาดต่างๆ กัน ดังนี้

กลุ่มที่ 1 กำหนดให้พื้นที่รับแสงเป็นชั้นพีหรือก็คือพื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ โดยมีขนาด 0.8 mm^2 , 1.2 mm^2 , 1.6 mm^2 และ 2.0 mm^2 ส่วนความกว้างชั้น i และพื้นที่ของรอยต่อ $n^+ - i$ มีขนาดคงที่ $100 \text{ }\mu\text{m}$ และ 0.66 mm^2 ตามลำดับ

กลุ่มที่ 2 กำหนดให้พื้นที่รับแสงเป็นชั้น i โดยมีขนาดความกว้าง $100 \text{ }\mu\text{m}$, $200 \text{ }\mu\text{m}$, $400 \text{ }\mu\text{m}$ และ $600 \text{ }\mu\text{m}$ ส่วนพื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ และพื้นที่ของรอยต่อ $n^+ - i$ มีขนาดคงที่ 0.8 mm^2 และ 0.66 mm^2 ตามลำดับ

กลุ่มที่ 3 กำหนดให้พื้นที่รับแสงเป็นชั้นเอ็นหรือก็คือพื้นที่ของรอยต่อ $n^+ - i$ โดยมีขนาด 0.8 mm^2 , 1.2 mm^2 , 1.6 mm^2 และ 2.0 mm^2 ส่วนความกว้างชั้น i และพื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ มีขนาดคงที่ $100 \text{ }\mu\text{m}$ และ 0.66 mm^2 ตามลำดับ

- ศึกษาผลของจำนวนเส้นกริดเพิ่มขึ้น 2 กริด 4 กริด 6 กริด 8 กริด 10 กริด 12 กริด และ 14 กริด และมีพื้นที่รับแสงคงที่ 4.0 mm^2
- ศึกษาการครีกร โดยกำหนดให้ การครีกรหรือ $p^+ - \text{ring}$ มีลักษณะเป็นวงแหวนอยู่ระหว่างรอยต่อ $p^+ - i$ และรอยต่อ $n^+ - i$ และทำการแบ่งกลุ่มโฟโตนิกไดโอดออกเป็น 4 กลุ่ม แต่ละกลุ่มจะมีตำแหน่งของการครีกรตามขนาดของค่า \times คือ $50 \text{ }\mu\text{m}$, $130 \text{ }\mu\text{m}$, $210 \text{ }\mu\text{m}$ และ $290 \text{ }\mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ ที่มีกริดระหว่างชั้น p^+ และ n^+

- ศึกษาชั้นพอร์ซิลิคอน (Porous Silicon) เพื่อประยุกต์สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในโฟโตนิกไดโอด การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนจากวิธีการกัดข้อมีส (Stain etching) โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 และควบคุมความพรุน

ของพอร์สซิลิคอนด้วยช่วงเวลาที่ใช้ในการกัดข้อมสี่ 35 วินาที 40 วินาที 45 วินาที และ 50 วินาที ซึ่งทดลองกับแผ่นทดสอบ (monitoring wafer) และนำไปทดสอบ เปรอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงกับช่วงความยาวคลื่นต่างๆ และนำค่าที่ดีที่สุด มาทำการ สร้างจริงบนโฟโต้ไดโอด ซึ่งลักษณะสมบัติของโฟโต้ไดโอดแบบซิลิคอนที่มีชั้น พอร์สซิลิคอนจากการกัดข้อมสี่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงได้ถูกศึกษาและเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อน แสง

1.7 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาผลความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้านรับแสง
2. ศึกษาผลของพื้นที่ไวแสงประสิทธิผล
 - 2.1 พื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$
 - 2.2 พื้นที่ของชั้น i หรือพื้นที่ระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+
 - 2.3 พื้นที่ของรอยต่อ $n^+ - i$
3. ศึกษาผลของลวดลายขั้วโลหะ
4. ศึกษาผลของ Guard ring
5. ศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของปัญหา วัตถุประสงค์ สมมติฐาน แนวคิด ที่ใช้ ขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมทั้งหมดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ทฤษฎี กล่าวถึงกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ คุณสมบัติสำคัญของตัว ตรวจวัดแสง

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง กล่าวถึง การออกแบบมาส์คด้วยโปรแกรม CorelDraw โครงสร้างรูปแบบต่างๆ และขั้นตอนการสร้างพินโฟโต้ไดโอดรวมถึงการสร้างชั้น พอร์สซิลิคอน

บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง กล่าวถึง การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า การ ทดลองศึกษา ความลึกของรอยต่อด้านรับแสง พื้นที่ไวแสงประสิทธิผล โครงสร้างมี Guard ring ลวดลายขั้วโลหะ และการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

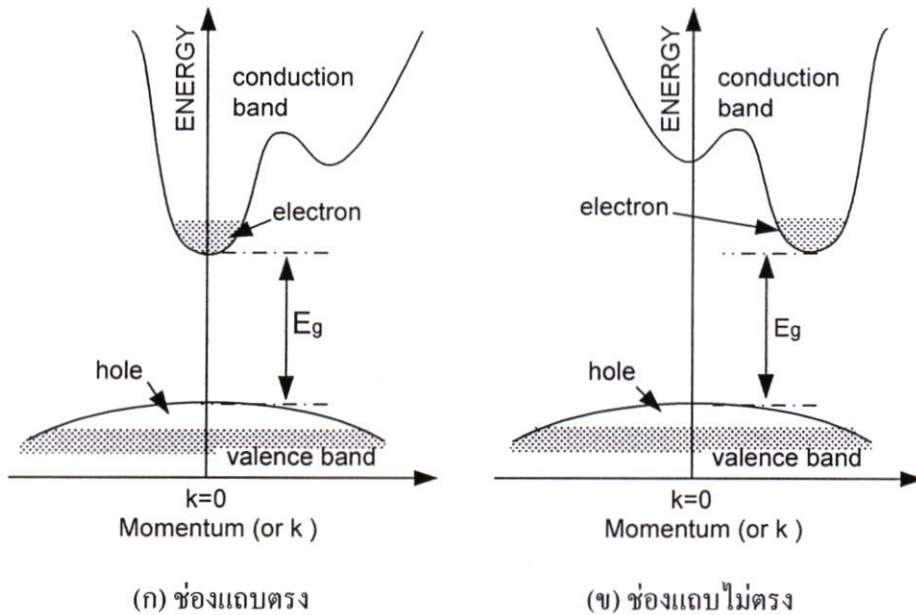
บทที่ 2 ทฤษฎี

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

2.1.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำ ตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือก็คือจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์ หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ในสารกึ่งตัวนำบางชนิด ตำแหน่งทั้งสองนี้จะอยู่ตรงกัน เช่น GaAs InP และ InGaAs เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) สารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะของแถบพลังงานเช่นนี้ จะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำแถบช่องตรง (direct band gap semiconductor)

สารกึ่งตัวนำที่มีตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) เช่น Si Ge และ GaP เป็นต้น ลักษณะของแถบพลังงาน เช่นนี้ จะเรียกว่า สารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง (indirect band gap semiconductor)



รูปที่ 2.1 ลักษณะของแถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์ในฟังก์ชันของเลขคลื่น k
(ก) แบบช่องแถบตรง และ (ข) แบบช่องแถบไม่ตรง

โดยทั่วไปจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะอยู่ที่ตำแหน่งที่ค่า $k = 0$ พอดี แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า จะอยู่ไม่ตรงตำแหน่งนี้ หรือจุดทั้งสองมีค่า k ที่ต่างกัน นั่นคือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกันนั่นเอง ดังนั้นคุณสมบัติทางแสงจะแตกต่างกัน กล่าวคือ ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแถบช่องตรง พลังงานของโฟตอน (Photon) จากแสงมีค่าเท่ากับ $h\nu$ สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า สามารถตกลงมายังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เช่นเดียวกัน โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืน หรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงนิยมนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (Optical device) เช่น ไดโอดเปล่งแสง (Light Emitting Diode: LED) และ เลเซอร์ไดโอด เป็นต้น ในกรณีสารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้า ไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อน จึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น ในทำนองเดียวกัน พลังงานโฟตอนจากแสง ก็ไม่สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่าย แต่อย่างไรก็ดี การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า ในกรณีนี้จะเกิดได้ดีขึ้น ถ้าหากในช่องว่างพลังงานนั้นมีระดับพลังงาน หรือสถานะพลังงานใดๆ ปรากฏอยู่ ซึ่งจะช่วยให้โอกาสที่จะเกิดกระบวนการนี้เป็นไปได้มากขึ้น

2.1.2 รูปแบบของคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวใหม่

รูปแบบของคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดจากอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์เคลื่อนที่ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และในขณะเดียวกันจะเกิดโฮลในแถบวาเลนซ์ กล่าวคือ เมื่อมีพลังงานมาปรากฏบนสารกึ่งตัวนำ พลังงานที่ว่่านี้อาจเป็นพลังงานแสง หรือพลังงานความร้อน และสามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากกระบวนการดูดกลืนแสง และถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอน ในแถบวาเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ เราเรียกกระบวนการนี้ว่า การดูดกลืน (absorption) ในขณะเดียวกันกับที่เกิดพาหะอิสระขึ้นนั้น ก็จะมีปรากฏการณ์รวมตัวใหม่ (Recombination)[1] ของอิเล็กตรอนและโฮลเกิดขึ้นด้วย คือ จะมีอิเล็กตรอนบางส่วนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ทำให้อิเล็กตรอนและโฮลมีจำนวนลดลง การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลอย่างต่อเนื่องในสารกึ่งตัวนำ เกิดขึ้นในกรณีที่มีการกระตุ้นด้วยพลังงานจากภายนอก และคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้ เป็นความหนาแน่นของพาหะส่วนเกิน (excess carriers : $\Delta n = \Delta p$) และขึ้นอยู่กับระดับของการฉีดพาหะ ในกรณีที่ไม่มีกระตุ้นพลังงานจาก

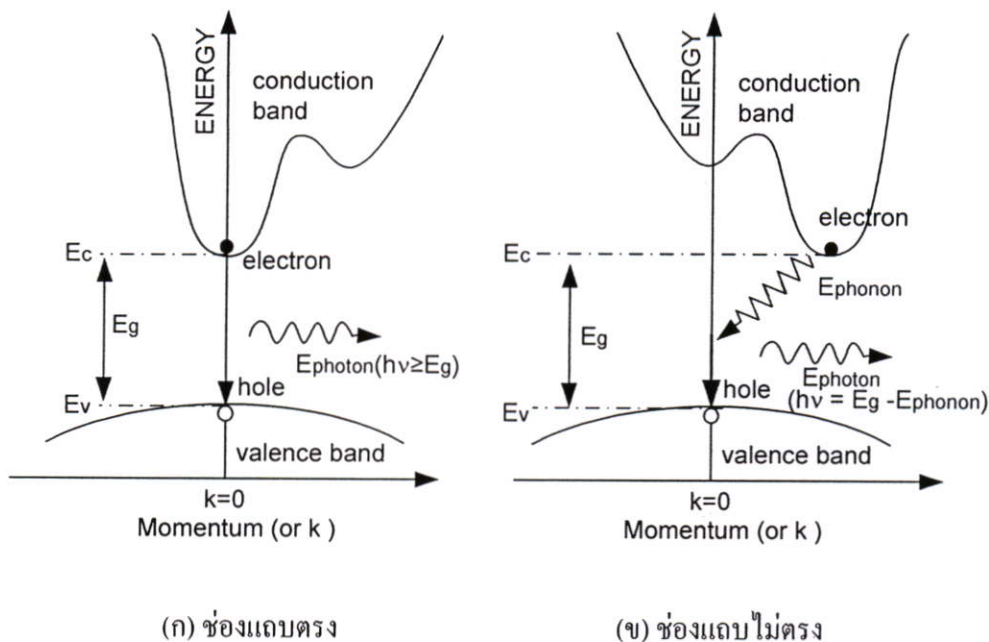
ภายนอก ความหนาแน่นของพาหะส่วนเกินจะลดลงเข้าสู่สภาวะสมดุลของอิเล็กตรอนและโฮล ซึ่งมีค่าเป็น n_0 และ p_0 ตามลำดับ [2]

กระบวนการรวมตัวใหม่สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 แบบ คือ 1. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) หรือแบบแถบถึงแถบ (band to band recombination process) และ 2. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) หรือแบบไม่เปล่งแสง (nonradiative recombination process) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง คือ กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง อิเล็กตรอนในระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าลดระดับไปรวมตัวกับโฮลในระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ซึ่งทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอนได้ง่าย

2. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม คือ กระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง ซึ่งตำแหน่งของพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าจะไม่ตรงกับตำแหน่งของพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าจะไม่สามารถลดระดับลงมายังแถบวาเลนซ์ได้ กรณีที่โมเมนตัมของอิเล็กตรอนยังคงเดิม การรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อมนี้ จะเกิดขึ้นกรณีที่อิเล็กตรอนเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เนื่องจากมีอันตรกิริยากับโครงผลึก (lattice) และลดระดับพลังงานลงมายังพลังงานหนึ่งในช่องว่างแถบพลังงานก่อนที่จะลดระดับไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข) ระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดจากความเสียหายของโครงร่างผลึก จึงเรียกการรวมตัวใหม่แบบนี้เป็น ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ ซึ่งในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ จะมีการปลดปล่อยพลังงานความร้อนออกมาและมีผลทำให้เกิดการสั่นตัวของโครงร่างผลึกขึ้น และการสั่นตัวนี้จะปลดปล่อยพลังงานที่เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

โดยทั่วไปแล้วสถานะพลังงานที่ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ได้ดี มักจะปรากฏอยู่ที่ระดับใกล้เคียงกึ่งกลางของช่องว่างแถบพลังงาน ทั้งนี้เนื่องจาก โอกาสของการรวมตัวใหม่จะมีค่าสูงสุดในตำแหน่งกึ่งกลางของช่องว่างพลังงานพอดี ในทางปฏิบัติ มีการเติมอะตอมของธาตุบางชนิดลงไปในสารกึ่งตัวนำ เพื่อให้เกิดระดับแทรก ซึ่งใช้ช่วยควบคุมและ ทำให้ อายุของพาหะส่วนน้อยในสารกึ่งตัวนำมีค่าลดลง



รูปที่ 2.2 กระบวนการการรวมตัวใหม่ระหว่างแถบนำไฟฟ้าและแถบวาเลนซ์

(ก) แบบช่องแถบตรง และ (ข) แบบช่องแถบไม่ตรง

2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

2.1.3.1 การดูดกลืนแสงพื้นฐาน

การดูดกลืนแสงที่เกิดจากการเปลี่ยนสถานะของอิเล็กตรอนจากยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปสู่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (fundamental absorption) และเรียกตำแหน่งหรือความยาวคลื่นแสงของสเปกตรัมมีการดูดกลืนแสงนี้ว่า ขอบของการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำมาก ในบางครั้งเราจำเป็นต้องแสดงลักษณะแถบพลังงานโดยให้เป็นฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number: k) ของอิเล็กตรอน (ซึ่งก็คือโมเมนตัมนั่นเอง เพราะว่าโมเมนตัมของอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $p = \hbar k$) เมื่อเขียนลักษณะของแถบพลังงานในรูปฟังก์ชันของ k เราจะได้แถบพลังงานที่มีรูปร่างสูงเป็นเส้นโค้งต่างๆ ไม่ได้เป็นเส้นตรงเสมอไป ในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าที่ตำแหน่งของ $k = 0$ พอดี เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะแถบพลังงานเช่นนี้ว่ามีแถบพลังงานแบบช่องตรง (direct band gap) ส่วนในกรณีที่ยอดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ในตำแหน่งที่ไม่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า เราเรียกสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะ

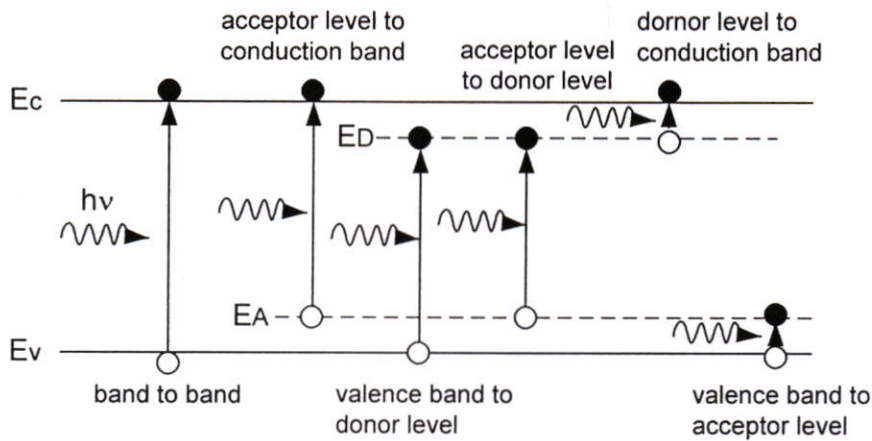
แถบพลังงานเช่นนี้ว่ามีแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรง (indirect band gap) ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.1

ในการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้นมีกฎอยู่ข้อหนึ่งเรียกว่า กฎของการเลือก (selection rule) หรือบางครั้งเรียกว่า กฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม (momentum conservative rule) ซึ่งมีใจความสำคัญว่า ในการเปลี่ยนสถานะพลังงานของอิเล็กตรอนนั้น โดยลำพังแล้วอิเล็กตรอนจะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม (นั่นคือ ค่า k ต้องไม่เปลี่ยน) ดังนั้นการดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบตรงจึงอยู่ในแนวตั้งและเป็นการรักษาโมเมนตัมโดยปริยาย

แต่การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรงนั้น เนื่องจากจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าไม่ได้อยู่ในแนวตั้งกับจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จึงไม่มีสถานะพลังงานใดๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะกระโดดขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ก็ต่อเมื่ออิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปแล้วเปลี่ยนค่าโมเมนตัมโดยการมีอันตรกิริยากับโครงผลึก (lattice) ซึ่งได้แก่การรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับโครงผลึกที่กำลังสั่นอยู่นั่นเอง ในปรากฏการณ์นี้ ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังคงถูกรักษาให้คงที่ไว้ได้ จึงทำให้การดูดกลืนแสงในแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรงเกิดขึ้นได้

2.1.3.2 การดูดกลืนแสงในระดับพลังงานของอะตอมสารเจือ[2]

การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) นอกจากจะเกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้าแล้ว ยังมีการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบพลังงานไปสู่ระดับพลังงานของอะตอมสารเจืออีกด้วย เช่น การเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าไปสู่ระดับพลังงานผู้รับ (conduction band to acceptor level) ระดับพลังงานผู้ให้ไปสู่แถบวาเลนซ์ (donor level to valence band) และเปลี่ยนแปลงสถานะระหว่างระดับพลังงานอะตอมสารเจือด้วยกัน (impurity level to impurity level) ดังแสดงในรูปที่ 2.3 นอกจากนี้ การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำยังเกิดขึ้นในระดับพลังงานผู้ให้ไปสู่แถบนำไฟฟ้า (donor level to conduction band) และ แถบวาเลนซ์ไปสู่ระดับพลังงานผู้รับ (valence band to acceptor level) อีกด้วย



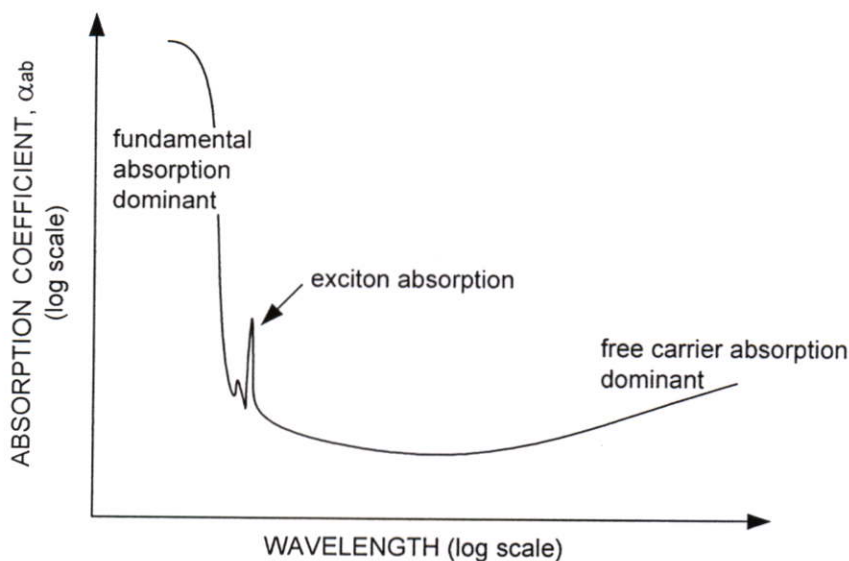
รูปที่ 2.3 ลักษณะของการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

2.1.3.3 การดูดกลืนแสงด้วยเอกซิตอน

ในสารกึ่งตัวนำ การกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าและเหลือโฮลไว้ในแถบวาเลนซ์นั้น บางครั้งถ้าการกระตุ้นมีพลังงานไม่เพียงพอ อาจทำให้อิเล็กตรอนและโฮลนั้นยังคงมีแรงคูลอมบ์ดึงดูดซึ่งกันและกันให้เป็นคู่อยู่เรียกว่า เอกซิตอน (exciton) เอกซิตอนเป็นคู่ของอิเล็กตรอนและโฮลที่ยังไม่เป็นอิสระแต่อยู่ในสภาพจับคู่กัน เกิดขึ้นเพราะพลังงานโฟตอนของแสงไม่สูงพอที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนและโฮลเป็นอิสระต่อกัน การดูดกลืนแสงด้วยเอกซิตอนนั้นจะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์มากๆ ในอุณหภูมิต่ำ และเกิดในกรณีที่โฟตอนมีพลังงานต่ำกว่าพลังงานช่องว่างในสารกึ่งตัวนำ

2.1.3.4 การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ

อิเล็กตรอนอิสระที่อยู่ในแถบนำไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับพลังงานหรือสนามไฟฟ้าจากแสงจะถูกเร่งให้โมเมนตัมมีค่าเพิ่มขึ้น จึงเกิดการดูดกลืนแสงและอิเล็กตรอนก็มีพลังงานเพิ่มขึ้น เราเรียกการดูดกลืนแสงชนิดนี้ว่า การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระ (free electron absorption หรือ free carriers absorption) การดูดกลืนแสงด้วยอิเล็กตรอนอิสระเกิดขึ้นที่ความยาวคลื่นแสงที่ยาวมาก ๆ และสัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงจะเพิ่มตามความยาวคลื่นแสงยกกำลังสอง ในรูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของอิเล็กตรอนอิสระในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.4 ความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์การดูดกลืนและความยาวคลื่นแสง

2.2 คุณสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสง

2.2.1 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : η) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างจำนวนของพาหะ (คู่อิเล็กตรอน-โฮล) ที่ทำให้เกิดเป็นกระแสแสง I_{ph} (Photocurrent) ต่อจำนวนของโฟตอนที่ตกกระทบ [3]

$$\eta_{ext} = \frac{I_{ph} / q}{P_{inc} / hv} = \frac{I_{ph}}{q} \cdot \frac{hv}{P_{inc}} \quad (2.1)$$

โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

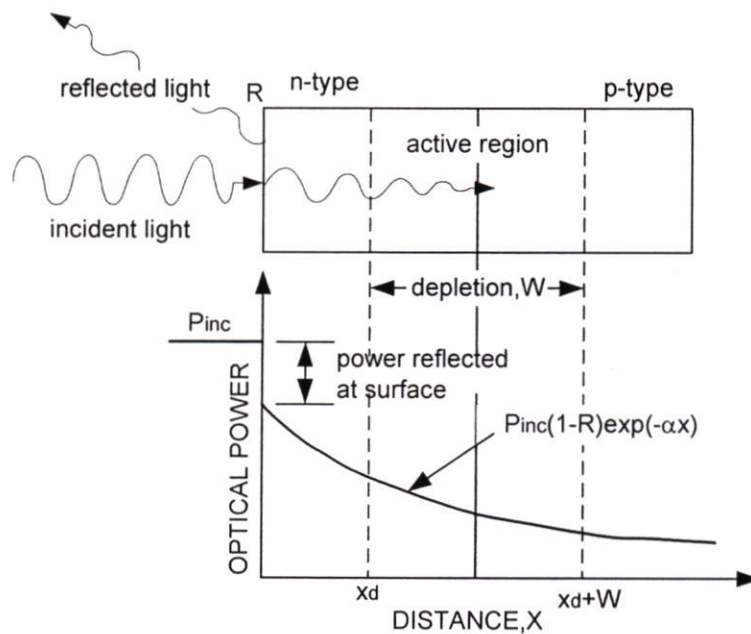
ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ สำหรับสมการที่ (2.1) ได้ถูกนิยามว่าเป็นประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency: η_{ext}) ซึ่งประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ และความหนาของชั้นดูดกลืนแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และ รูปที่ 2.6 และสามารถแสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\eta_{ext} \propto (1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.2)$$

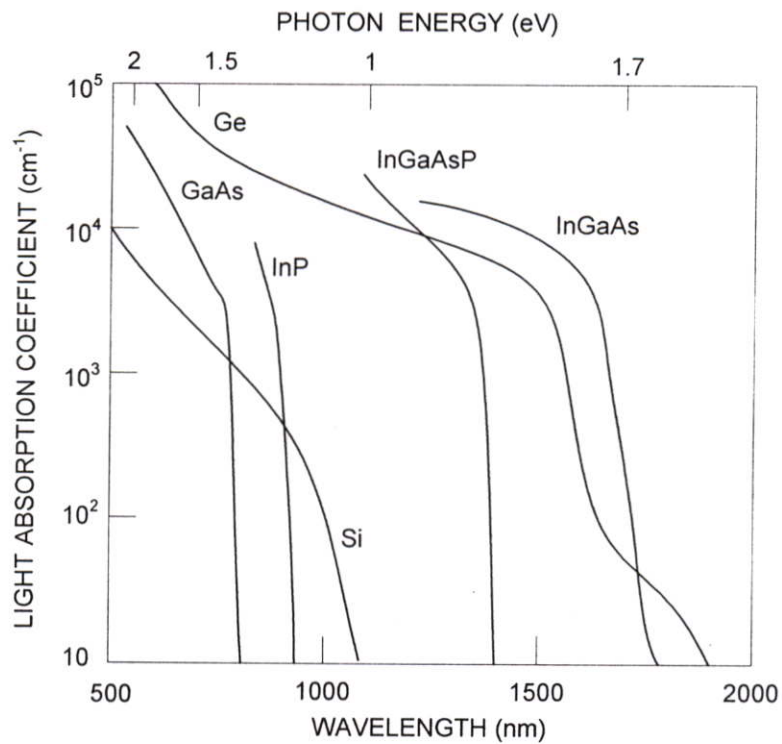
โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

x คือความหนาของชั้นดูดกลืนแสง (active region)

จากสมการ (2.2) แสดงให้เห็นว่า ประสิทธิภาพควอนตัมเป็นฟังก์ชันของความยาวคลื่นแสง ถ้าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกมีค่าสูง การเกิดพาหะแสงจะมาก ซึ่งทำให้ตัวตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 70-80 เปอร์เซ็นต์ เพราะว่าแสงส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกไป ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency : η_{int}) คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนพาหะที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนภายในสารกึ่งตัวนำ โดยปกติจะมีค่าสูงมากเกือบหนึ่ง ในกรณีที่สารกึ่งตัวนำนั้นเป็นแบบแถบช่องตรงและผลึกมีคุณภาพดี



รูปที่ 2.5 การดูดกลืนแสงและการสะท้อนของพลังงานแสงที่ตกกระทบ



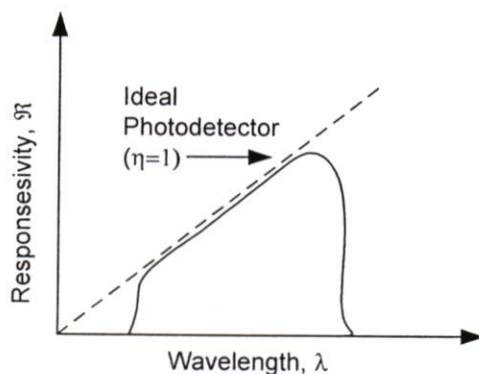
รูปที่ 2.6 สเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

2.2.2 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (responsivity: \mathcal{R}) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกระแสแสง I_{ph} ที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบ [4] นั่นคือ

$$\mathcal{R} = \frac{I_{ph}}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda (\mu m)}{1.24} (A/W) \quad (2.3)$$

จากสมการที่(2.3) ถ้า η มีค่าเท่ากับ 1 แล้ว ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นแสง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจวัดแสง อย่างไรก็ตามในช่วงการใช้งานนั้น η จะมีค่าขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง α ซึ่งแปรผันโดยตรงกับความยาวคลื่นแสง λ ดังนั้นในกรณีที่แสงมีความยาวคลื่นแสงยาวมากๆ จะเกิดการคัทออฟเช่นเดียวกันกับกรณีที่แสงมีความยาวคลื่นสั้นมากๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 สภาพการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงในอุดมคติและในช่วงใช้งาน

2.2.3 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนอง (response speed) หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่ การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาขาลง (t_f)

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ต่อไปนี้

- 1) เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ
- 2) เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ
- 3) ค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับค่าความต้านทานของโหลด

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆ จะต้องพิจารณาถึงแฟกเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย เช่น ออกแบบให้โฟโตมิขนาดเล็กลง เพื่อลดขนาดของค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ เป็นต้น

2.3 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด (Photodiode) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (internal photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ p-n เมื่อมีแสงตกกระทบบที่รอยต่อ p-n จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆ แล้วอาจรวมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง ปัจจุบันโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ p-n มีราคาไม่แพงและมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และมีการผลิตโฟโตไดโอดจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น Si, GaAs,

GaAsP และ GaP ซึ่งไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆ กันสำหรับในระบบการสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโอดีไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานได้รวดเร็วมาก คือ พินโฟโอดีไดโอด (pin photodiode) ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป

โฟโอดีไดโอดมีคุณสมบัติเด่นดังนี้ คือ[5]

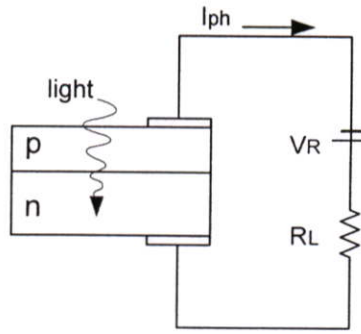
- สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอินพุตแบบเชิงเส้นได้ดี (excellent linearity)
- มีสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise)
- ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้าง (wide spectral response)
- มีความคงทนทางกลศาสตร์ (mechanical ruggedness)
- มีขนาดกะทัดรัดและเบา (compact & light weight)
- มีอายุการใช้งานยาวนาน (long life time)

2.3.1 พื้นฐานของโฟโอดีไดโอด

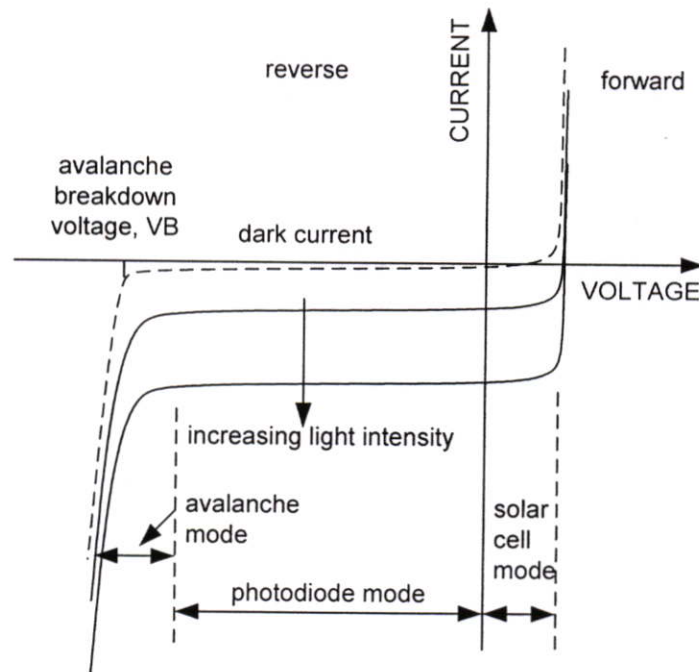
2.3.1.1 ปฏิกิริยาการโฟโอดีไดโอดและลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดัน

เมื่อสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำถูกฉายแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน E_g แสงจะถูกดูดกลืนและทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ว่่านี้เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแสง ถ้ามีการป้อนสนามไฟฟ้าจากภายนอกเพื่อให้อิเล็กตรอนอิสระวิ่งออกไปสู่วงจรมานอกและเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหล ส่วนโฮลที่เกิดในแถบเวเลนซ์ก็มีส่วนช่วยให้เกิดกระแสไฟฟ้าด้วยเช่นกัน ซึ่งลักษณะที่พาหะเคลื่อนที่ไปยังแถบนำไฟฟ้าและทำให้ความต้านทานไฟฟ้าในสารกึ่งตัวนำลดลง ลักษณะแบบนี้เรียกว่า โฟโอดีไดโอด (Photoconduction) ถ้าสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมีรอยต่อ p-n ซึ่งรอยต่อ p-n ที่ว่่านี้ จะมีศักย์ไฟฟ้าภายใน (built-in potential) เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ และศักย์ไฟฟ้าภายในจะพัดพาอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระออกไปสู่วงจรมานอกทางด้านชั้น n และ p ได้ตามลำดับ โดยไม่มีการป้อนไบอัสจากภายนอก เช่นนี้เรียกว่า ปฏิกิริยาการโฟโอดีไดโอด (Photovoltaic effect)

โดยที่โฟโอดีไดโอดนั้นจะใช้หลักการของโฟโอดีไดโอดทำหน้าที่เปลี่ยนพลังงานแสงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า วงจรพื้นฐานของโฟโอดีไดโอดและลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันแสดงในรูปที่ 2.8 เส้นปะแสดงถึงลักษณะของกระแสและแรงดันขณะไม่ได้รับแสง



(ก) วงจรไบอัส



(ข) โหมดการทำงาน

รูปที่ 2.8 โฟโตไดโอด (ก) วงจรไบอัส และ (ข) โหมดการทำงาน

2.3.1.2 รอยต่อพีเอ็น ภายใต้แรงดันย้อนกลับและกระแสมืด

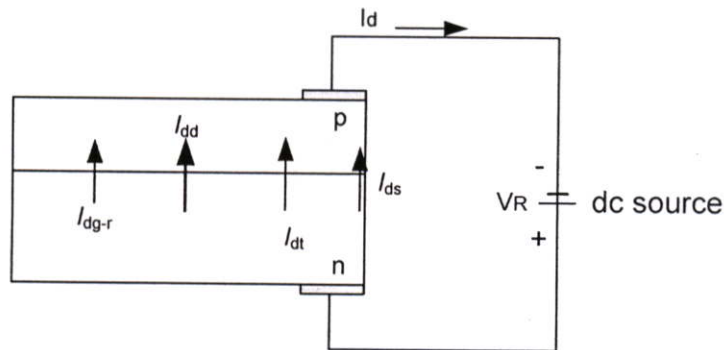
ในอุดมคติกระแสแพร่ (diffusion current) เกิดขึ้นได้ภายใต้การไบอัสย้อนกลับและไบอัสตรง และกระแสแพร่ที่เกิดขึ้นภายใต้การไบอัสย้อนกลับถูกเรียกว่ากระแสอิ่มตัว (saturation current) อย่างไรก็ตาม มีกระแสหลายชนิดไหลผ่านบริเวณรอยต่อพีเอ็น แต่ส่วนประกอบหลักของกระแสมืดในโฟโตไดโอดภายใต้การไบอัสย้อนกลับได้แก่ กระแสรั่วที่ผิว (surface leakage current, I_{ds}) กระแสเนื่องจากการเกิดและการรวมตัว (generation-recombination current, I_{dg-r})

และกระแสทันเนล (tunnel-current, I_{dt}) แสดงในรูปที่ 2.9 ดังนั้นกระแสมีด I_d ทั้งหมด จึงมีค่าโดยประมาณดังนี้[3]

$$I_d = I_{dd} + I_{ds} + I_{dg-r} + I_{dt} \quad (2.4)$$

เมื่อ I_{dd} คือกระแสแพร่ (diffusion current)

จากสมการที่ (2.4) พบว่ากระแสมีดส่วนใหญ่ในโฟโอดีโอดเกิดจากกระแสเนื่องจากการเกิดและการรวมตัว I_{dg-r} และกระแสแพร่ I_{dd} [3]

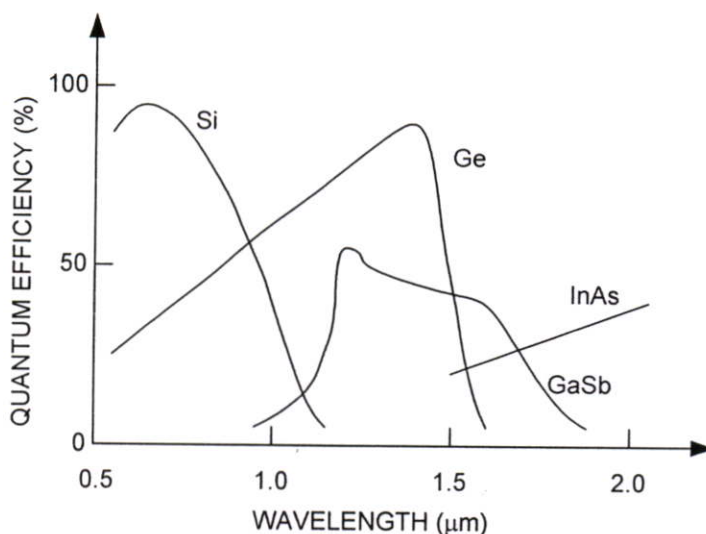


รูปที่ 2.9 กระแสมีดที่เกิดขึ้นในโฟโอดีโอด ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

2.4 พินโฟโอดีโอดชนิด

พินโฟโอดีโอด (p-i-n photodiode) คือ โฟโอดีโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างแตกต่างจากโฟโอดีโอดธรรมดาตรงที่ระหว่างชั้น p และชั้น n จะมีชั้น i คั่นอยู่ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการโด๊ปด้วยสารเจือปนด้วยปริมาณที่น้อยมาก (i-layer, n⁺=v-layer หรือ p⁺=π-layer)

วัสดุที่นิยมใช้ผลิตเป็นพินโฟโอดีโอดได้แก่ Si, Ge, GaSb และ InAs รูปที่ 2.10 แสดงสเปกตรัมตอบสนองของพินโฟโอดีโอดเหล่านี้ [5]



รูปที่ 2.10 สเปกตรัมผลตอบสนองของพินโฟโต้ไดโอดที่ผลิตจากวัสดุชนิดต่างๆ

GaAs เป็นวัสดุที่มีราคาแพงและสเปกตรัมผลตอบสนองก็สามารถครอบคลุมได้ด้วยวัสดุเหล่านี้ ดังนั้นจึงไม่ค่อยมีการผลิตพินโฟโต้ไดโอดจาก GaAs

Si เป็นวัสดุที่มีราคาถูกที่สุดและเหมาะกับแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น ตัวอย่างมีการใช้เป็นตัววัดแสงในระบบการสื่อสารด้วยเส้นใยแก้วนำแสงที่มีความยาวคลื่นย่านต่ำกว่า $0.80 \mu\text{m}$

Ge สามารถใช้วัดแสงที่มีความยาวคลื่นถึงย่านประมาณ $1.5 \mu\text{m}$

GaSb สามารถวัดแสงที่มีความยาวคลื่นได้ยาวกว่า Ge เล็กน้อย

InAs สามารถวัดแสงที่มีความยาวคลื่นได้หลายไมครอน

เนื่องจากวัสดุ Ge, GaSb และ InAs มีช่องว่างพลังงานแคบ ดังนั้นจึงมีปัญหาเกี่ยวกับกระแสมืด (Dark current) ก่อนข้างมาก กระแสมืดเหล่านี้เกิดจากกระแสนิการเกิดและการรวมตัวและชนิดที่ลดลง

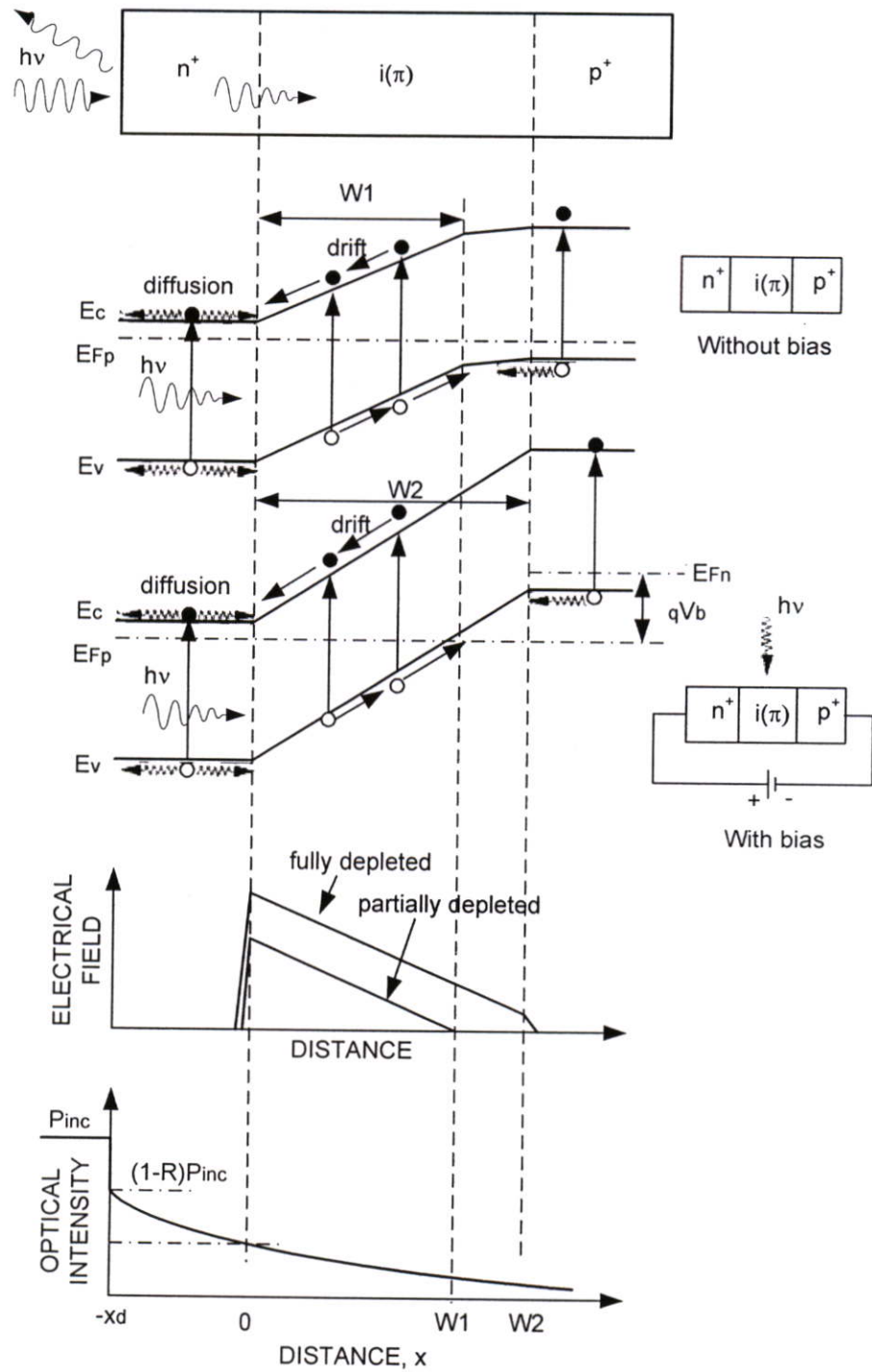
2.4.1 โครงสร้างและหลักการทำงาน

ลักษณะสมบัติของพินโฟโต้ไดโอดขึ้นอยู่กับขนาดความหนาและปริมาณการโดปสารเจือปน (doped concentration) ในชั้น i (i-layer) ชั้น i เป็นชั้นที่ไม่มีการโดปสารเจือปน (undoped) หรือชั้นที่มีการโดปสารเจือปนอย่างเจือจาง (lightly doped) หรือก็คือ ชั้น n⁻ หรือชั้น p⁻ ซึ่งมักจะถูกเรียกว่าชั้น ν และชั้น π ตามลำดับ และความหนาแน่นของสารเจือปนในชั้นเหล่านี้ปกติอยู่ระหว่าง 10^{13} และ 10^{16} cm^{-3} แถบพลังงานของโครงสร้างโฟโต้ไดโอดชนิด n⁻-i(π)-p⁺ แสดงในรูปที่ 2.11 ความหนาแน่นของสารเจือปนในชั้น n⁺ และชั้น p⁺ โดยทั่วไปมีค่าสูงกว่า

10^{18} cm^{-3} ด้วยเหตุนี้จึงทำให้รอยต่อในลักษณะเช่นนี้เป็นแบบชันบันได (abrupt step junction หรือ step junction) ซึ่งชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) จะขยายออกไปยังชั้น i ด้านเดียว (one-side abrupt junction) และเป็นรูปแบบของโครงสร้างโฟโตไดโอดชนิดนี้

กรณีที่มีการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ แรงดันเกือบทั้งหมดจะไปปรากฏตกคร่อมอยู่รอบๆ บริเวณชั้น i และทำให้เกิดชั้นปลอดพาหะขยายได้อย่างเต็มที่ (fully depleted) ในบริเวณชั้นนี้ขณะที่ได้รับไบอัสค่าต่ำ กรณีที่ไม่มีการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ลักษณะของชั้นปลอดพาหะจะขยายไม่เต็มชั้น i (partial depletion) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ขณะที่แรงดันไบอัส (V_b) เพิ่มขึ้น ความกว้างของชั้นปลอดพาหะจะเพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนต่อ $V_b^{1/2}$ และชั้นปลอดพาหะที่ขยายเข้ามาใกล้กับชั้น p^+ ถูกเรียกว่า reach-through หรือ punch-through

หลักการงานพื้นฐานของพินโฟโตไดโอดนั้นคล้ายกับกรณีของโฟโตไดโอด เพียงแต่แตกต่างกันตรงจุดที่ในโฟโตไดโอดชนิด $p-i-n$ นั้น จะมีชั้น i อยู่ระหว่างชั้น p^+ และ n^+ และสามารถสร้างชั้น i ซึ่งเป็นชั้นปลอดพาหะ (depletion layer) ให้มีความหนาต่างๆ ได้ตามความต้องการ ซึ่งในกรณีโฟโตไดโอดแบบพีเอ็นนั้น ความหนาของชั้นปลอดพาหะจะถูกกำหนดด้วยปริมาณและวิธีการโคปสารเจือปนของรอยต่อพีเอ็น เมื่อมีแสงมาตกกระทบกับตัวโฟโตไดโอดรังสีของแสงซึ่งมีอนุภาคของพลังงานเป็นองค์ประกอบที่เรียกว่า โฟตอน (Photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในชั้นต่างๆ ทั้งในชั้น p^+ ชั้น i และชั้น n^+ แต่บริเวณผิวหน้าและบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าจะเป็นพื้นที่ไวแสงที่ดี เช่น บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ p^+-i , รอยต่อ n^+-i และชั้น i โดยพาหะที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังขั้วโลหะและกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแสงที่เอาต์พุต



รูปที่ 2.11 ลักษณะแถบพลังงานของพินโฟโต้ไดโอด

2.4.2 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของกระแสและแรงดัน

2.4.2.1 กระแสแสงและกระแสมืด

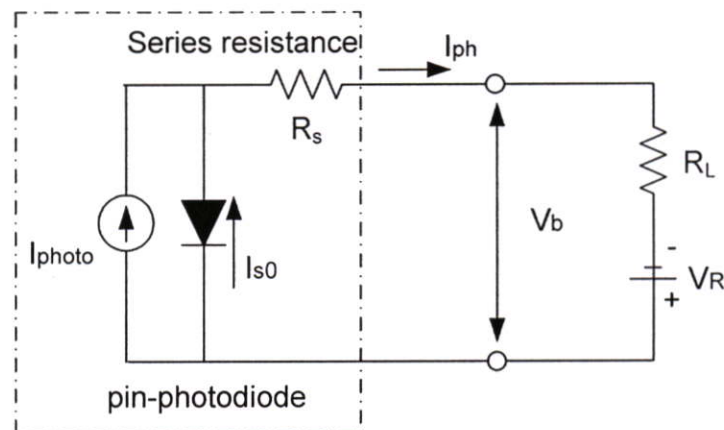
วงจรสมมูลพื้นฐานของพินโฟโตไดโอดนั้นคล้ายกับเซลล์แสงอาทิตย์ (Solar cell) อย่างไรก็ตาม ในโหมดการทำงานของโฟโตไดโอดนั้น จำเป็นต้องมีการให้ไบอัสย้อนกลับแก่ตัวโฟโตไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.12 จากวงจรไบอัสสามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$V_b = V_R - I_{ph} R_L \quad (2.6)$$

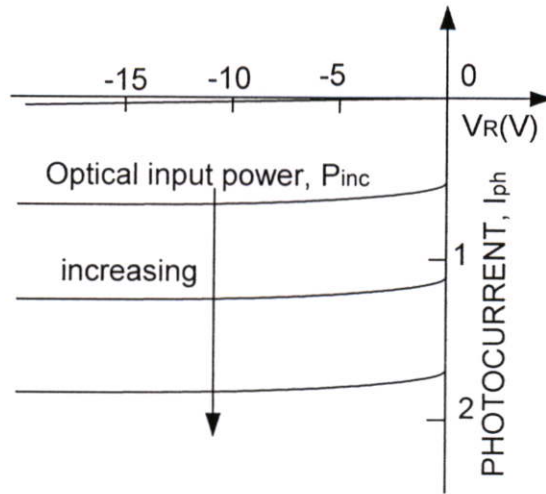
โดยทั่วไป V_b จะมีค่าเป็นลบในโหมดการทำงานของโฟโตไดโอด และกระแสแสง I_{ph} เขียนได้ดังนี้

$$I_{ph} = I_{photo} - I_{s0} \quad (2.7)$$

โดยที่ I_{ph} คือกระแสแสงที่เป็นปริมาณของกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแสงและพลังงานแสงที่ปรากฏในโหมดการทำงานของโฟโตไดโอด การเปลี่ยนแปลงของกระแสแสง I_{ph} เป็นฟังก์ชันของแรงดันย้อนกลับ V_R ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลของพินโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดัน ขณะที่ได้รับพลังงานแสงเพิ่มขึ้น

2.4.2.2 กระแสดริฟท์และกระแสแพร่

ภายใต้เงื่อนไขการทำงานปกติ กระแสแสง I_{ph} จะมีค่ามากกว่ากระแสมืด I_d จำนวนหลายเท่า ดังนั้นกระแสแสง I_{ph} จึงมีค่าใกล้เคียงกับกระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแสง I_{photo} ในสมการที่ (2.7) กระแสที่เกิดจากการเหนี่ยวนำด้วยแสง I_{photo} ประกอบด้วยกระแสดริฟท์ I_{dr} (drift current) ที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสแพร่ I_{diff} (diffusion current) ที่เกิดจากแสงเหนี่ยวนำทำให้เกิดพาหะส่วนน้อยและมีระยะการแพร่เข้าไปในชั้นปลอดพาหะ (ดูรูปที่ 2.8) และสามารถหาความหนาแน่นของกระแสได้จากการหารด้วยพื้นที่รอยต่อพีเอ็น ได้ดังนี้

$$J_{ph} = J_{dr} + J_{diff} \quad (2.8)$$

โดยที่ J_{ph} คือความหนาแน่นกระแสแสง (Photocurrent density)

J_{dr} คือความหนาแน่นกระแสดริฟท์

J_{diff} คือความหนาแน่นกระแสแพร่

จากสมการที่ (2.8) แสดงให้เห็นว่าพาหะที่เกิดขึ้นจากแสงจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้ด้วยกลไกทั้ง 2 ชนิดนี้ ซึ่งกระแสดริฟท์หรือกระแสที่เกิดจากสนามไฟฟ้าในชั้น i จะมีบทบาทกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากที่สุด

2.4.3 การตอบสนองทางความถี่

การตอบสนองทางความถี่ (Frequency response) ในพินโฟโต้ไดโอด มีข้อจำกัดด้วยสาเหตุหลักๆ 2 ประการ คือ เวลาส่งผ่าน (Transit time) และค่าคงที่เวลา CR (CR-Time constant) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.4.3.1 ค่าคงที่เวลา CR

ข้อจำกัดของการตอบสนองทางความถี่อันเนื่องมาจากค่าคงที่เวลา CR (CR-Time Constant) ซึ่งเป็นปัญหาโดยทั่วไปในโฟโต้ไดโอด พินโฟโต้ไดโอดที่มีชั้นปลอดพาหะขยายไม่เต็มชั้น i (partially depleted) (ดูรูปที่ 2.11) จะมีค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ และมีความต้านทานไฟฟ้าสูง เพราะว่าในชั้น i โดยปกติจะมีความหนาแน่นของพาหะต่ำทำให้ชั้น i เปรียบเสมือนตัวต้านทานตัวหนึ่ง ดังนั้นช่วงการตอบสนองสัญญาณทางความถี่ของพินโฟโต้ไดโอดจึงมีค่าต่ำ และในขณะที่ให้ไบอัสเพิ่มขึ้นจนมีผลทำให้ชั้นปลอดพาหะขยายได้เต็มชั้น i ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าลดลงเนื่องจากแปรผกผันกับ $|V_R|^{1/2}$ ส่วนความต้านทานไฟฟ้าในชั้น i ก็จะลดลงด้วยเช่นเดียวกัน และความกว้างของชั้นปลอดพาหะหลัง reach-through มีค่าใกล้เคียงกับความหนาของชั้น i ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ C_j จึงสามารถแสดงได้ดังนี้

$$C_j = \epsilon_s \epsilon_0 / W_i \quad (2.9)$$

โดยที่ W_i คือ ความหนาของชั้น i

จากสมการที่ (2.9) ใช้ในกรณีที่พินโฟโต้ไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับค่าสูงๆ หรือในกรณีที่บริเวณปลอดพาหะขยายได้เต็มชั้น i ซึ่งก็จะทำให้การตอบสนองทางความถี่มีค่าสูง

2.4.3.2 เวลาส่งผ่านภายในชั้นปลอดพาหะ

เวลาส่งผ่าน (เวลาที่พาหะถูกเหนี่ยวนำด้วยแสงและข้ามบริเวณปลอดพาหะ) หาได้จากความเร็วครีฟท์ (drift velocity) ของพาหะที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสง ความเร็วครีฟท์เป็นอัตราส่วนกับสภาพคล่องของพาหะและความเข้มของสนามไฟฟ้า แต่อย่างไรก็ตาม ความเร็วครีฟท์ของพาหะจะไม่ต่อเนื่องกับสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากพาหะเกิดการชนปะทะกับโครงผลึก (lattice) จึงทำให้พลังงานบางส่วนของสนามไฟฟ้าถูกถ่ายเทไปยังโครงผลึก (lattice vibration) ในระหว่างการชนปะทะนั่นเอง สุดท้ายสนามไฟฟ้าที่สูงจากการไบอัสย้อนกลับ จะทำให้ความเร็ว ครีฟท์ของพาหะทั้งอิเล็กตรอนและ โฮลมีค่าประมาณความเร็วกระเจิงที่ถูกจำกัด

(Scattering-limited velocity) และมีค่าคงที่ ความเร็ววดริฟท์คงที่ (Constant drift velocity) ถูกเรียกว่า saturation velocity ($v_{ds} \approx 10^7$ cm/sec สำหรับ Ge Si และ GaAs)

เวลาส่งผ่านในชั้นปลอดพาหะในกรณีนี้ $w \gg 1/\alpha$ สามารถแสดงได้จากสมการของความถี่คัทออฟ f_c ได้ดังนี้ [3]

$$f_c \approx 0.4/t_{tr} \quad (2.10)$$

โดยที่ t_{tr} คือ เวลาส่งผ่านในชั้นปลอดพาหะ

จากสมการที่ (2.10) แสดงให้เห็นว่า เวลาส่งผ่าน t_{tr} ของพาหะที่เกิดจากแสงในชั้นปลอดพาหะ สามารถหาได้จากความถี่คัทออฟ f_c

2.4.4 สัญญาณรบกวนในพินโฟโตไดโอด

สัญญาณรบกวน (noise) เป็นแฟคเตอร์สำคัญ ในกรณีที่พินโฟโตไดโอดถูกใช้เป็นตัวส่งผ่านสัญญาณในระบบต่างๆ เช่น ระบบสื่อสารด้วยแสง และ data links เป็นต้น สัญญาณรบกวนในพินโฟโตไดโอดเกิดจากสัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise) หรือชนิดควอนตัม (quantum noise) และ ชนิดจ้อห์นสัน (Johnson noise) หรือชนิดความร้อน (thermal noise)

สัญญาณรบกวนชนิดช็อต คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากพฤติกรรมของพาหะที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสงและโฟตอน (photon) ทำให้เกิดการแพร่หรือการรวมตัวของพาหะ

สัญญาณรบกวนชนิดจ้อห์นสัน เป็นสัญญาณที่เกิดจากการที่ประจุไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิเล็กตรอนมีการสั่นอย่างไม่เป็นระเบียบอันเนื่องมาจากความร้อนและเกิดขึ้นมากในวัสดุตัวนำไฟฟ้า ดังนั้นสัญญาณรบกวนชนิดนี้จึงเกิดขึ้นที่โหนดด้านทานที่ต่อกับโฟโตไดโอดนั่นเอง[6-7]

พินโฟโตไดโอดผลิตกระแสแสง (Photocurrent) จากพาหะที่ถูกเหนี่ยวนำด้วยแสง (photo-induced carries) อย่างสุ่มและอิสระเมื่อโฟตอนถูกดูดกลืน ด้วยเหตุนี้ความไม่แน่นอนเนื่องจากการเกิดพาหะแบบสุ่มและอิสระจึงทำให้การเคลื่อนที่ของพาหะนี้เป็นกระแสที่เรียกว่าสัญญาณรบกวนชนิดช็อต มีนสแควของกระแสรบกวนชนิดช็อตในย่านความถี่ระหว่าง f และ $(f + \Delta f)$ แสดงได้ดังสมการต่อไปนี้

$$\overline{i_{sn}^2} = 2qI\Delta f \quad (2.11)$$

โดยที่ \bar{I} คือกระแสสถานะนิ่ง (steady-state current) กระแสรบกวนชนิดรูดในพิน โฟโอดีไดโอด อาจเขียนได้ดังนี้

$$\overline{i_{sn}^2} = 2q(I_{photo} + I_d + I_{bg})B_{bw} \quad (2.12)$$

เมื่อ Δf ในสมการที่ (2.12) ถูกแทนด้วยแบนด์วิท B_{bw}

สัญญาณรบกวนชนิดจอห์นสัน (John noise) เกิดจากการเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบของพาหะด้วยค่าเฉลี่ยพลังงานความร้อน $(3/2)k_B T$ ในความต้านทานไฟฟ้า ณ อุณหภูมิ T การเคลื่อนที่อย่างไม่เป็นระเบียบนี้ทำให้เกิดกระแสรบกวนในความต้านทานโหลด มีนสแควของกระแสรบกวนชนิดจอห์นสันในช่วงแบนด์วิท B_{bw} ($= \Delta f$) แสดงได้ด้วยสมการต่อไปนี้

$$\overline{i_{Jn}^2} = 4k_B T B_{bw} / R_{eq} \quad (2.13)$$

เมื่อ R_{eq} คือความต้านทานไฟฟ้า (electrical resistance)

อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมิอิทธิพลต่อการทำงานของโฟโอดีไดโอด การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิทำให้ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงและกระแสมีดเกิดการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวดีขึ้น ในขณะที่ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นเลวลง

สำหรับกระแสมีด เนื่องจากอุณหภูมิสูงขึ้น ความน่าจะเป็นของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้ขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าจะมีค่ามากขึ้น ดังนั้นกระแสมีดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิที่สูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานชั้นดี $R_{sh} \exp(-\alpha w)$ ลดลงและสัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอลและสัญญาณรบกวนชนิดรูดเพิ่มขึ้นด้วย ส่วนค่าแรงดันวงจรเปิด V_{op} ของโฟโอดีไดโอดก็ขึ้นกับอุณหภูมิด้วย โดยที่ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น V_{op} จะลดลงอย่างเชิงเส้น

นิยามของสัมประสิทธิ์ประสิทธิภาพควอนตัม η ของพินโฟโอดีไดโอด คือ อัตราส่วนของจำนวนประจุไฟฟ้าเอาต์พุตต่อจำนวนโฟตอนอินพุตนั้นคือ

$$\eta = \frac{|J/q|}{P_{inc}/Ah\nu} = (1-R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha w}}{1 + \alpha L_h} \right) \quad (2.14)$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงในชั้น i

P_{inc} คือ กำลังของแสงอินพุต

R คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสงที่ผิวของพินโฟโอดีไดโอด

w คือ ความหนาของชั้น i

L_h คือ ระยะการแพร่ของโฮล

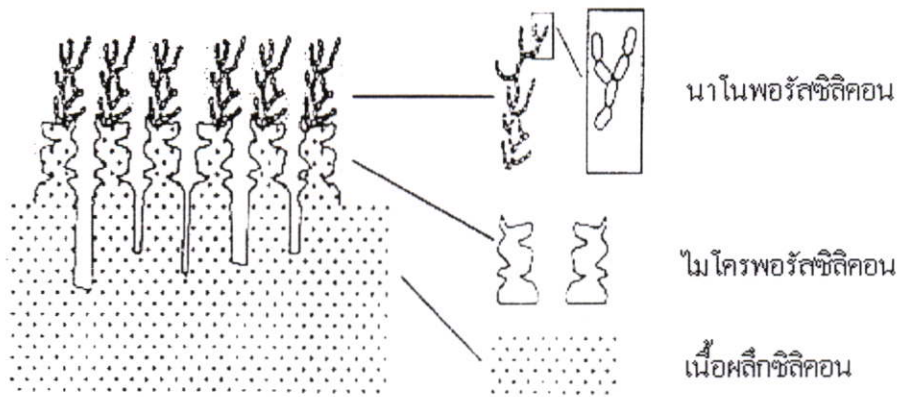
สมการนี้ทำให้เราทราบว่า การสร้างพินโฟโอดีไดโอดให้มีประสิทธิภาพสูงๆ นั้นควรลดค่า R ให้น้อยลง เช่น โดยการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนแสงที่ผิวด้านรับแสงหรือสร้างชั้นลดการสะท้อนแสงที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น เพิ่มความหนา w ของชั้น i ซึ่งจะทำให้ $\exp(-\alpha w)$ มีค่าเข้าใกล้ศูนย์ วัสดุที่มีค่า L_h สูงๆ

2.5 พอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon : PS) มาจากคำว่า พอร์ส (porous) ที่หมายถึง รูพรุน รวมกับคำว่า ซิลิคอน (silicon) ซึ่งเป็นธาตุของแข็ง ใช้อธิบายผลึกขนาดระดับนาโนเมตรของซิลิคอน (nanocrystallites silicon) ที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีลักษณะที่แข็ง และเปราะ โครงสร้างระดับนาโนนี้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยลักษณะแท่ง (columnar) หรือ ทรงกลม (dots or sphere) หรือ ลักษณะผสมของทั้งสอง ซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy skeleton) [8] จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าว จึงเรียกผลึกระดับนาโนเมตรของซิลิคอนนี้ว่า พอร์สซิลิคอน

2.5.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

ลักษณะของพอร์สซิลิคอนจะมีขนาดของโครงสร้างแตกต่างกันออกไป ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ภาพจำลองโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอน

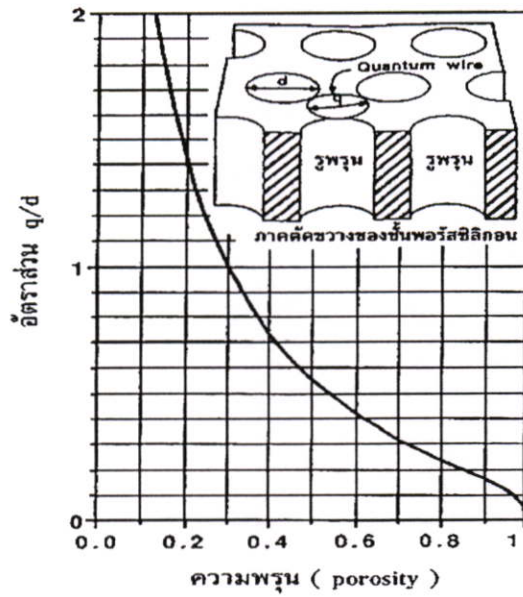
จากรูปที่ 2.11 จะเห็นได้ว่าชั้นพอร์สซิลิคอนจะประกอบไปด้วย โครงสร้างของชั้นไมโครพอร์สซิลิคอน ที่มีขนาดของโครงสร้างใหญ่กว่า 50 นาโนเมตร และโครงสร้างของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอน ที่มีขนาดของโครงสร้างอยู่ในช่วง 10 นาโนเมตร ลงไป

โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนทั้งสองนี้ เกิดขึ้นจากกระบวนการกัดเนื้อของผลึกซิลิคอนด้วยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) นอกจากนี้ จากการศึกษาค้นคว้า โครงสร้างของพอร์สซิลิคอนโดยเฉพาะในส่วนของชั้นนาโนพอร์สซิลิคอนยังพบต่อไปอีกว่า ที่บริเวณผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั้นยังประกอบไปด้วยพันธะของซิลิคอนไฮไดรด์ (Si:H) หรือซิลิคอนออกซิไฮไดรด์ (Si:O:H) ปกคลุมอยู่ที่ผิวโดยทั่วไปอีกด้วย

2.5.2 ความพรุนของพอร์สซิลิคอน

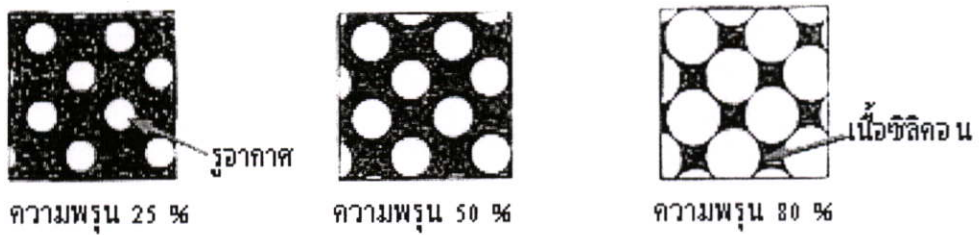
ลักษณะความพรุนนี้เป็นปริมาณที่สามารถบ่งบอกได้ถึงขนาดโครงสร้างของวัสดุได้ ซึ่งสามารถหาได้จากการเปรียบเทียบอัตราส่วนระหว่างมวล หรือปริมาตรของเนื้อวัสดุกับช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุนั้นๆ

เนื้อของผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรจะแสดงคุณสมบัติทาง Quantum size effect ในลักษณะของ Quantum wire ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างเนื้อของผลึกในระดับนาโนเมตร กับขนาดของ รูพรุน จะมีผลต่อความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนแสดงในรูปที่ 2.15[9]



รูปที่ 2.15 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) กับขนาดของรูพรุน (d) ที่มีต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน

จากรูปที่ 2.15 จะเห็นได้ว่า ทั้งขนาดของเนื้อผลึกซิลิกอน (q) และขนาดของรูพรุน (d) มีผลต่อความพรุนของพอร์สซิลิกอน โดยถ้าเนื้อของผลึกซิลิกอนถูกกัดจนมีขนาดเล็กกลง หรือขนาดของรูพรุนมีขนาดกว้างขึ้น จะมีผลทำให้พอร์สซิลิกอนนั้นมีความพรุนมากขึ้นกว่าเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 แผนภาพจำลองด้านบนของโครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่เปอร์เซ็นต์ความพรุนต่างๆ

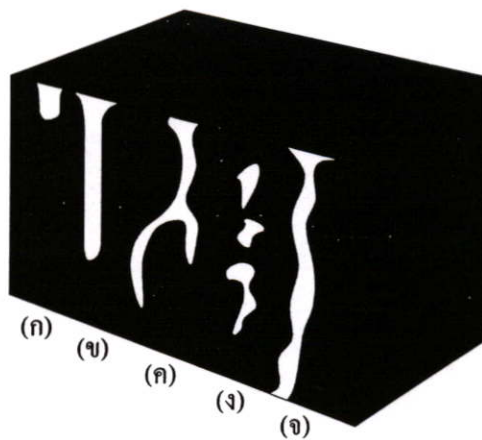
2.5.3 การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิกอน[10]

เนื่องจากโครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิกอน จะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กหลายลักษณะแทรกตัวอยู่ระหว่างเนื้อซิลิกอน ทำให้การแบ่งประเภทของพอร์สซิลิกอนสามารถแบ่งได้

3 ประเภทตามลักษณะของรูพรุน คือ แบ่งตามลักษณะของรูพรุน (pore type) แบ่งตามรูปทรงของรูพรุน (pore shape) และแบ่งตามขนาดของรูพรุน (pore size)

ประเภทของพอร์สซิติคอนเมื่อแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (pore type) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.17 คือ

1. ลักษณะหลุมตัน (blind or saccate) เกิดขึ้นในกรณีที่ชั้นพอร์สซิติคอนมีความบางมาก ๆ เหมือนเป็นฟิล์มบาง
2. ลักษณะถุง (dead-end or saccate) ลักษณะรูพรุนคล้ายถุงโดยก้นถุงจะเป็นทางตันคล้ายกับลักษณะหลุมตัน แต่จะมีความลึกที่มากกว่า
3. ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (interconnected or branched) รูพรุนมีลักษณะแตกกิ่งก้านและเชื่อมต่อกันคล้ายรากไม้ที่มีรากฝอยกระจายทั่วไป
4. ลักษณะโพรงปิด (totally isolated or close) เหมือนมีโพรงอากาศแทรกอยู่ในเนื้อซิติคอนจำนวนมาก
5. ลักษณะทะลุ (through pores) รูพรุนจะเปิดที่ปลายทั้งสองด้าน จะพบลักษณะนี้ในโครงสร้างแบบเมมเบรน (membrane) ที่มีการกัดแบบนานๆ ให้รูพรุนทะลุเนื้อซิติคอนอีกด้านหนึ่ง

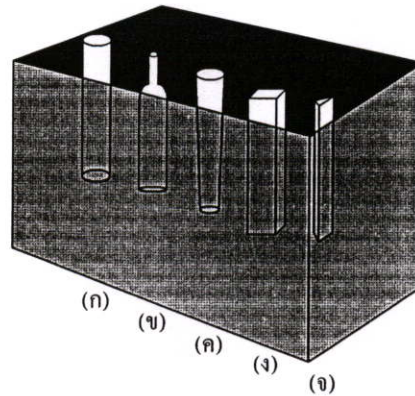


รูปที่ 2.17 ประเภทของพอร์สซิติคอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (ก) ลักษณะหลุมตัน
(ข) ลักษณะถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (ง) ลักษณะ โพรงปิด
(จ) ลักษณะทะลุ [16]

ประเภทของพอร์สซิติคอนเมื่อแบ่งตามรูปทรงของรูพรุน (pore shape) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปทรง ดังรูปที่ 2.18 คือ

1. ทรงกระบอก (cylindrical)

2. ทรงขวดหมึก (ink-bottle)
3. ทรงกรวย (funnel)
4. ทรงลูกบาศก์ (cuboid or slit)
5. ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด (triangular or pyramidal)

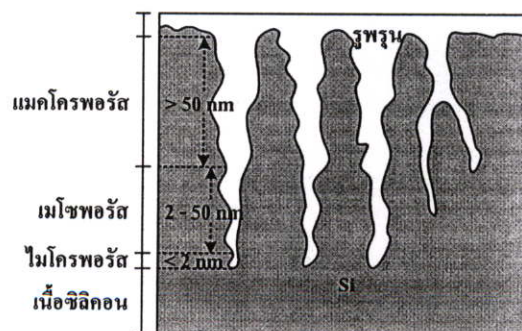


รูปที่ 2.18 ประเภทของพอร์สซิลิคอนแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก

(ข) ทรงขวดหมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (จ) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด

ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน (pore size) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด แสดงดังรูปที่ 2.19 คือ

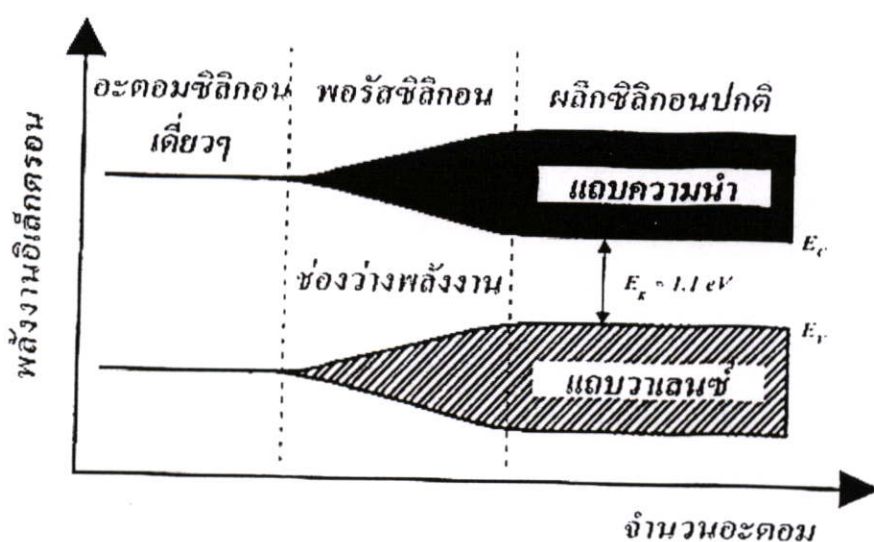
1. ไมโครพอร์ส (micro porous) มีขนาดความกว้างของหลุม (pore width) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 นาโนเมตร โดยชั้นไมโครพอร์สนี้จะมีโครงสร้างที่ติดกับเนื้อของซิลิคอน
2. เมโซพอร์ส (meso porous) มีขนาดความกว้างของหลุม (pore width) ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมคโครพอร์ส (macro porous) มีขนาดความกว้างของหลุม (pore width) มากกว่า 50 นาโนเมตร



รูปที่ 2.19 ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน

2.5.4 ลักษณะของแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

การเกิดแถบพลังงานของผลึกซิลิคอน อะตอมในผลึกซิลิคอนจะมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการดังกล่าวถ้าสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะนำไปมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนของช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิคอนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ [34]

จากรูปข้างต้น พบว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้น สามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะ โครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (quantum confinement effect)

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆ เหล่านี้ จะเสมือนถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ อย่างไรก็ตามในแบบ 3 มิติเหมือนในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

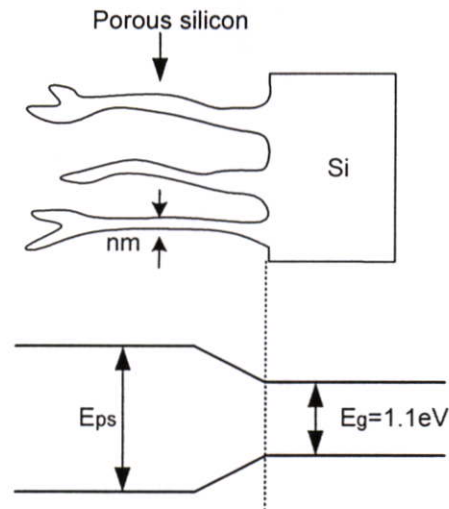
ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบ หรือบังคับด้วยลักษณะ และขนาดของโครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ ควอนตัมไซด์เอฟเฟค (quantum size effect) หรือควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (quantum confinement effect) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทด้วยกัน คือ

1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (quantum well) เกิดจากขนาดของผลึกมีลักษณะเป็นชั้นที่มีความบางอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุล เช่น 30-50 ชั้นโมเลกุล (<100 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกบีบหรือจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่ได้เพียง 2 ทิศทางเท่านั้น

2. ควอนตัมในเชิง 1 มิติ (quantum wire) เกิดจากขนาดของผลึกมีลักษณะเป็นเส้นหรือเสาแคบๆ ที่มีความหนาอยู่ในระดับของนาโนเมตร (<10 nm) พาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ สามารถเคลื่อนที่ได้เพียงทิศทางเดียวเท่านั้น

3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (quantum dot) เกิดจากขนาดของผลึกมีลักษณะเป็นจุดที่มีขนาดเล็กมากๆ (<1 nm) โดยพาหะนำกระแสที่ถูกกักขังอยู่ในโครงสร้างลักษณะเช่นนี้ จะถูกจำกัดทิศทางการเคลื่อนที่อย่างสมบูรณ์

เนื่องจากเนื้อซิลิคอนในโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นแท่ง (silicon wires) หรือลักษณะเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน จัดอยู่ในประเภท ควอนตัม 1 มิติ (quantum wire) นั่นเอง โดยจะมีลักษณะของแถบพลังงานดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิคอน



รูปที่ 2.21 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอนเปรียบเทียบกับผลึกซิลิคอน

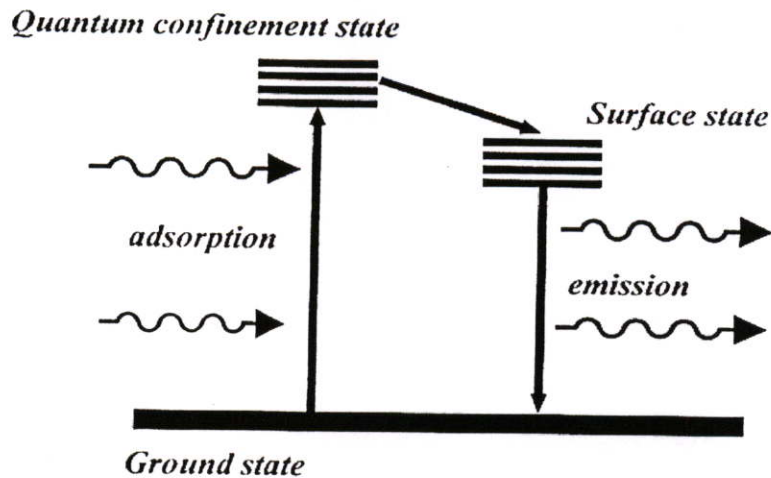
2.5.5 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

จากลักษณะโครงสร้าง และส่วนประกอบของพอร์สซิลิคอน นักวิจัยหลายกลุ่มทั่วโลก เชื่อว่า คุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนนี้น่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (quantum confinement effect) [11-12] ขึ้น ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอน ทำให้ขนาดช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิคอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (surface state) ของนาโนพอร์สซิลิคอน [13] ซึ่งเกิดขึ้น เนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั่นเอง

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการนี้เอง ทำให้เราสามารถทำการอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model) ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอนเพื่ออธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์

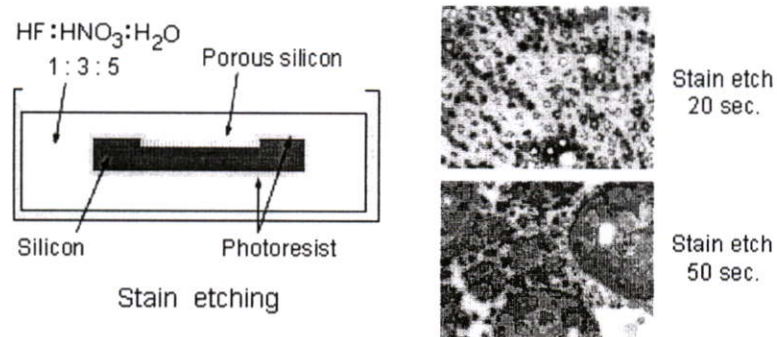
จากรูปข้างต้นจะเห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่ถึงสองระดับด้วยกัน โดยสถานะแรกนั้นจะเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟกต์ (quantum confinement effect) หรือควอนตัมเอฟเฟกต์ (quantum effect) ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิคอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสง จนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากผลของการที่ช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะที่ไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงมาสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่ (recombination) กับโฮลที่อยู่ในสถานะพื้น (ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้เองอิเล็กตรอนจะมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งจะอยู่ในรูปของโฟตอนหรือแสงนั่นเอง

2.5.6 วิธีการสร้างพอร์สซิลิคอน

การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน นั้น สามารถสร้างได้ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการสลایตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ วิธีการสลایตัวของก๊าซไซเรนด้วยแสงเลเซอร์ วิธีการจากคลื่นความถี่สูง วิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี และวิธีการกัดข้อมสิ (stain etching)[10] ซึ่งในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสิ เพราะเป็นวิธีที่สร้างได้ง่าย และประหยัดที่สุด ดังที่จะได้กล่าวต่อไป

2.5.6.1 วิธีการกัดข้อมสี

การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี (Stain etching) เริ่มมีการนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ 1960[10] โดยทั่วไปการกัดข้อมสีผลึกซิลิคอนเพื่อสร้างชั้นพอร์ส สามารถทำได้ง่ายด้วยการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายซึ่งประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ที่มีความเข้มข้น 47 wt.% กรดไนตริก (HNO_3) ที่มีความเข้มข้น 60 wt.% และน้ำบริสุทธิ์ (H_2O) ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ[14] ดังแสดงในรูปที่ 2.23

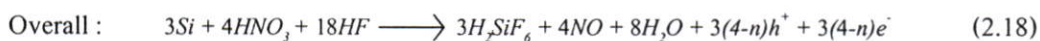
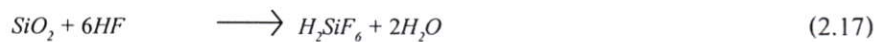
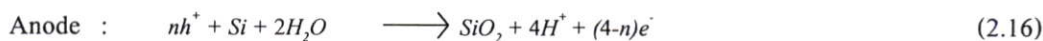
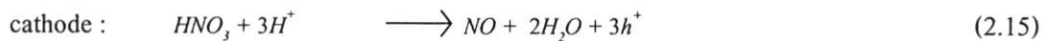


รูปที่ 2.23 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสีและ ตัวอย่างของพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการกัดแบบข้อมสี

2.5.6.2 กลไกการทำปฏิกิริยาเคมี

จุดสำคัญของการกัดแบบข้อมสี (Stain etching) ก็คือ การทำให้เกิดประจุโฮลเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาการกัดเนื้อซิลิคอน ซึ่งส่วนมากจะนิยมใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) ทำปฏิกิริยากับ กรดไนตริก (Nitric : HNO_3) เพื่อทำให้เกิดประจุโฮล ดังสมการที่ 2.15 หลังจากนั้นประจุโฮลที่เกิดขึ้นจะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation reaction) ได้ซิลิคอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 2.16 ขณะที่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันนี้เองสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกก็จะกัดเนื้อซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนออก ดังสมการที่ 2.17 ซึ่งการเกิดซิลิคอนไดออกไซด์และการถูกกัดออกของซิลิคอนไดออกไซด์จะเป็นแบบสุ่ม เนื่องจากไม่มีกลไกในการควบคุมทิศทางการทำปฏิกิริยาเหมือนอย่างกรณีการกัดด้วยไฟฟ้าเคมี (Anodic etching) ดังนั้นลักษณะ โครงสร้างที่ได้จึงมักจะไม่มีรูปแบบ (Non-uniform)

ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการกัดแบบข้อมล



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีสันเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น มีการเปลี่ยนแปลงของสีสันจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมครอน ถึงประมาณ 1.5 ไมครอน เป็นต้น

นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่าในกระบวนการกัดแบบข้อมล มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกพร้อมกับกรดไนตริกสักครู่ก่อนที่จะนำไปทำปฏิกิริยาการกัดในขั้นตอนต่อไป ทั้งนี้ก็เพื่อเป็นการเพาะฟักตัวเร่งปฏิกิริยาที่จะใช้ในกระบวนการกัดนั่นเอง เรียกว่า การบ่มสารละลาย (incubation period)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมล คือ[10]

1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อการเกิดโฮล (h^+) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์สขึ้น อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

2. ชนิดของสารเจือ และค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ส มีผลอย่างมากต่อเวลาการเหนี่ยวนำ (induction time) ให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนโดยตรง เวลาเหนี่ยวนำให้เกิดชั้นพอร์สนั้นต้องอาศัยโฮลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ซึ่งเวลาเหนี่ยวนำจะเร็วขึ้นกรณีที่ผลึกซิลิคอนมีความเข้มของอะตอมสารเจือชนิดพีสูงๆ หรือมีความหนาแน่นของโฮลมากๆ นั่นเอง ดังนั้น เวลาการเหนี่ยวนำในซิลิคอนชนิดพี จะเร็วกว่าในซิลิคอนชนิดเอ็น กรณีที่มีสภาพความต้านทานเท่ากัน

3. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน มีการทดลองกับแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยว แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป แผ่นซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส และอัลลอยด์ของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) ที่สร้างจากกระบวนการอพิแทกซี (epitaxy process) เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล พบว่า การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (UV) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกรูปเดี่ยวแผ่นซิลิคอน และ

แบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ได้ แต่พอร์สซิลิกอนที่สร้างจากแผ่นซิลิกอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะมอร์ฟัสกลับไม่แสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ส่วนกรณีอัลลอยของซิลิกอนกับเยอรมันเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) พบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของเยอรมันเนียม ($x = 0.04 - 0.41$) จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลงในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิกอนที่สัมผัสกับสารละลายเกิดการทำให้ปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิกอนที่หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิกอนที่หยากกว่าการสร้างชั้นพอร์สโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย

2.5.7 คุณสมบัติของพอร์สซิลิกอน

พอร์สซิลิกอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง คือ

1. คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์สซิลิกอน พอร์สซิลิกอนมีลักษณะที่แข็ง เปราะ มีรูพรุนมากมาย มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

2. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์สซิลิกอน พอร์สซิลิกอนมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าซิลิกอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิกอน และสามารถสร้างเป็นสารไดอิเล็กทริก (dielectric) ได้ พอร์สซิลิกอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิกอน พอร์สซิลิกอนมีคุณสมบัติอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) หรือคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence)

คุณสมบัติของพอร์สซิลิกอนเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะโครงสร้างของพอร์สซิลิกอน ซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างนั่นเอง และเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของพอร์สซิลิกอนนี้เองทำให้พอร์สซิลิกอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆมากมาย เช่น การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์ [15] อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic) [16] ชีวการแพทย์ (Biomedical) [17] เครื่องตรวจจับก๊าซ และความชื้น [18] เป็นต้น

2.6 คุณสมบัติของพอร์สซิลิกอนที่เหมาะสมในการประยุกต์ในโฟโตนิกส์

พอร์สซิลิกอนเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจในการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติทางด้านแสง เนื่องจากพอร์สซิลิกอนสามารถเรืองแสงได้ที่อุณหภูมิห้อง และจากความพรุนของชั้นพอร์สซิลิกอนที่สามารถควบคุมได้จากกระบวนการสร้าง ทำให้พอร์สซิลิกอนมีคุณสมบัติในการเรืองแสงได้ในช่วงกว้าง ทำให้สามารถควบคุมค่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาได้ และกำหนดช่วงของการเปล่งแสงได้ด้วย ซึ่งลักษณะของการเรืองแสงหรือมีคุณสมบัติเป็นโฟโตลูมิเนสเซนซ์

(Photoluminescence) แบบนี้ จะช่วยเปลี่ยนแสงคลื่นสั้นในช่วงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) และแสงสีน้ำเงิน (blue light) ให้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ดังนั้นลักษณะแบบนี้ จึงเหมาะกับการนำมาประยุกต์ในโฟโตไดโอดเพื่อเป็นชั้นที่สามารถเลือกย่านการตอบสนองทางแสงได้ตามต้องการ

โดยธรรมชาติพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าในชั้นสารซิลิคอน ดังนั้นจึงนำมาประยุกต์สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนในโฟโตไดโอด ซึ่งชั้นพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับค่าความพรุนซึ่งอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 1.25 ถึง 3 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในช่วงกว้าง อีกทั้ง ลักษณะของพอร์สที่สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนนี้ยังสามารถลดกระแสมืดที่เกิดขึ้นบริเวณที่ผิวได้อีกด้วย เนื่องจากชั้นพอร์สมีช่องว่างพลังงานที่กว้างกว่าซิลิคอนนั่นเอง

นอกจากนี้ ชั้นพอร์สซิลิคอนยังสามารถสร้างได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก และราคาถูก ด้วยวิธีการกัดแบบข้อมสี (Stain etching) ดังนั้นจึงเหมาะสมอย่างยิ่งที่จะนำไปประยุกต์ในโฟโตไดโอด

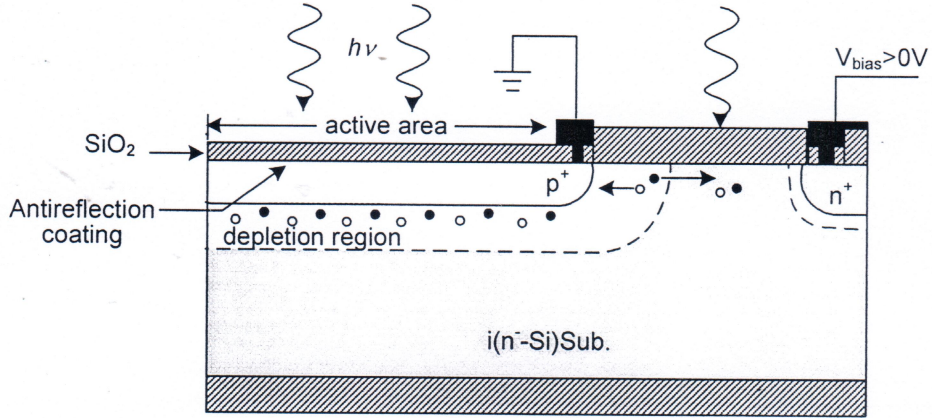
2.7 แนวทางการพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์

การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นนั้นสามารถทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึง การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ โดยการศึกษา ลักษณะโครงสร้างในรูปแบบต่างๆ ดังได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 1 มีดังต่อไปนี้

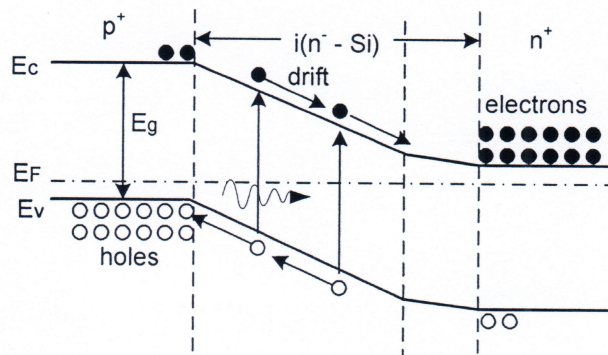
1. ศึกษาผลความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้านรับแสง ซึ่งความลึกของรอยต่อนี้จะส่งผลต่อปริมาณของการเกิดกระแสแสงในลักษณะแบบใด
2. ศึกษาผลของพื้นที่ไวแสงประสิทธิผล เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิดนี้มีชั้น p^+ และ n^+ ที่อยู่ด้านเดียวกัน ดังนั้น การหาพื้นที่สำหรับเป็นชั้นรับแสงที่เหมาะสมที่สุด จึงเป็นสิ่งจำเป็น เช่น พื้นที่รับแสงของรอยต่อ $p^+ - i$ พื้นที่รับแสงของชั้น i และ พื้นที่รับแสงของรอยต่อ $n^+ - i$
3. ศึกษาผลของสวดลายขั้วโลหะของชั้นรับแสง ซึ่งกำหนดให้สวดลายขั้วโลหะนี้มีจำนวนกริดที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ช่องรับแสงหรือพื้นที่รับแสงมีค่าเท่าเดิม
4. ศึกษาผลของการ์ดริง (Guard ring) ที่จะช่วยลดกระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอน (Si) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ได้ นอกจากนี้ ยังได้ทดลองการ์ดริง ในลักษณะต่างๆ อีกด้วย
5. ศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งชั้นพอร์สซิลิคอนนี้มีลักษณะเป็นรูพรุน สามารถสร้างได้หลายวิธี และวิธีที่ง่าย สะดวกและประหยัดที่สุดคือ แบบวิธีการกัดข้อมสี (Stain etching) และเป็นวิธีที่จะนำมาทำการทดลองในครั้งนี้

2.7.1 ลักษณะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์

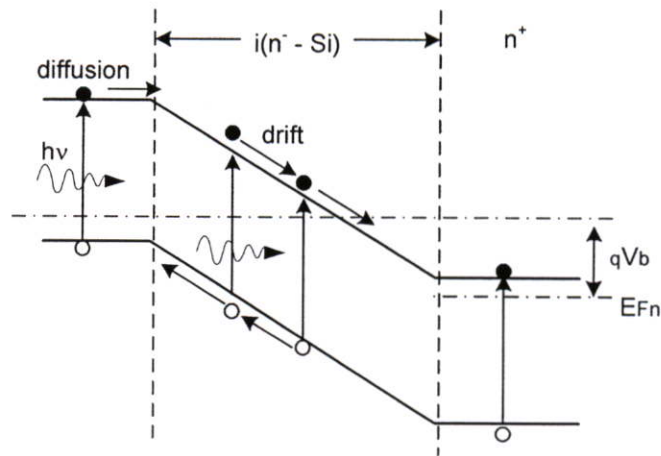
ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ มีลักษณะโครงสร้างที่ประกอบด้วยชั้นพีและชั้นเอ็นอยู่ด้านเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 ลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์



รูปที่ 2.22 ลักษณะแถบพลังงาน ในภาวะสมดุล



รูปที่ 2.25 ลักษณะแถบพลังงาน ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

จากรูปที่ 2.24 แสดงลักษณะแถบพลังงาน ในภาวะสมดุลความร้อน (Thermal equilibrium) หรือไม่มีการป้อนแรงดันไบอัสให้กับวงจร จะเห็นได้ว่าในภาวะสมดุลความร้อนนี้ ระดับพลังงานเฟอร์มีมีค่าเท่ากันพอดี และกระแสแสงสามารถเกิดขึ้นได้ภายในวงจร ถ้ามีแสงมาตกกระทบทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งการเกิดกระแสแสงในลักษณะแบบนี้จะเหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์โฟโตโวลตาอิก ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 2.3.1.1 และเมื่อมีการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ แถบพลังงานจะมีลักษณะโน้มเอียงมากยิ่งขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายได้เพิ่มขึ้น เกิดสนามไฟฟ้าภายในเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โฟโต้โอดทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ

ลักษณะเด่นของโฟโต้โอดชนิดนี้คือ

1. กระแสมืดต่ำ (low dark current) เนื่องจาก กระแสมืดส่วนใหญ่เกิดจากกระแสแพร่ของพาหะส่วนน้อยในชั้นพีและชั้นเอ็น และกระแส G-R ที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ[3] และกระแส G-R นี้จะมีค่าน้อยกว่าของรอยต่อพีเอ็นทั่วไป เพราะโฟโต้โอดชนิดนี้บริเวณปลอดพาหะจะเกิดขึ้นภายในชั้น i ซึ่งมีความบริสุทธิ์มาก ดังนั้นกระแสมืดที่เกิดขึ้นจึงมีค่าน้อย

2. ความไวสูง (high sensitivity) ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติที่สำคัญของโฟโต้โอดทุกชนิด และหมายถึงพลังงานที่น้อยที่สุดที่ตกกระทบด้านอินพุตและทำให้เกิดสัญญาณด้านเอาต์พุตหรือวัดออกมาในรูปอัตราส่วนของ signal-to-noise การที่โฟโต้โอดชนิดนี้มีความไวสูง สาเหตุอันหนึ่งมาจากการดูดกลืนแสงในชั้นปลอดพาหะได้ดี ซึ่งกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในชั้นปลอดพาหะหรือชั้น i นั่นเอง

3. แรงดันพังทลายสูง (high breakdown voltage) แรงดันพังทลายเกิดจากการป้อนไบอัสย้อนกลับค่าสูงๆ และทำให้เกิดอิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นเอ็นและชั้นพีตามลำดับ อิเล็กตรอนและโฮลที่ฉีดให้เข้ามาสู่ชั้นเอ็นและชั้นพีนี้ จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าสูงมากและวิ่งไปชนกับโครงสร้างผลึกและทำให้มีการกระตุ้นอิเล็กตรอนกระโดดขึ้นไปสู่แถบนำไฟฟ้าและมีโฮลเกิดขึ้นใหม่ในแถบวาเลนซ์และเกิดปรากฏการณ์เช่นนี้ซ้ำๆเรื่อยๆไป ตลอดการป้อนไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้มีพาหะอิสระเพิ่มขึ้นจำนวนมากมาย ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการพังทลายแบบอะวาลันช์ (avalanche breakdown) แต่เนื่องจากโฟโอดีไดโอดชนิดนี้มีลักษณะของรอยต่อเป็นแบบ รอยต่อ $p^+ - i$ และรอยต่อ $n^+ - i$ ดังนั้นแรงดันพังทลายจึงสูงกว่ากรณีไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นโดยทั่วไป

4. ความเร็วสูง (high speed response) เนื่องจากโฟโอดีไดโอดชนิดนี้มีค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อต่ำ เนื่องจากมีชั้นปลอดพาหะที่กว้าง และการที่มีสองรอยต่อนี้ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมที่รอยต่อทั้งสองมีค่าลดลงอีกด้วย ดังนั้นจึงทำให้โฟโอดีไดโอดชนิดนี้มีความเร็วในการตอบสนองสูง

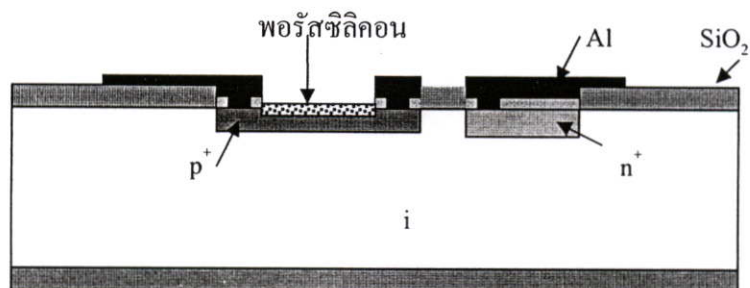
ลักษณะเด่นนี้จึงเป็นที่สนใจ นำไปสร้างเป็นโฟโอดีไดโอด เพื่อเป็นตัวตรวจวัดแสงในงานด้านต่างๆ อย่างมากมาย เช่น ในด้านระบบสื่อสารด้วยสายนำแสง ระบบ data links[19] หรือแม้แต่เป็นตัวตรวจจับรังสีที่มีอนุภาคความเข้มข้นสูงๆได้ เช่น รังสีเอ็กซ์ รังสีแกมมา[20] เป็นต้น

โฟโอดีไดโอดชนิด $p-i-n$ แบบพลาเนอร์ ส่วนที่เป็นชั้นรับแสงและพื้นที่รับแสงนั้นสำคัญอย่างยิ่งที่จำเป็นต้องมีการศึกษาและทดลอง ซึ่งในการทดลองนี้ ได้สร้างโฟโอดีไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็นทั้งชั้นพี และชั้นเอ็น และเพื่อหาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพเป็นชั้นรับแสงได้ดีที่สุด โดยได้กำหนดส่วนต่างๆ เช่น ขนาดของพื้นที่รอยต่อ $p^+ - i$ พื้นที่รอยต่อ $n^+ - i$ และชั้น i ดังจะได้กล่าวในบทต่อไป

2.7.2 พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในโฟโอดีไดโอดชนิด $p-i-n$ แบบพลาเนอร์

พอร์สซิลิคอนแบบวิธีการกัดข้อมสี (Stain etching) สามารถสร้างได้ง่าย สะดวก ประหยัด และมีประสิทธิภาพสูง ซึ่งเหมาะสำหรับเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในอุปกรณ์ตรวจรับแสงแบบสารกึ่งตัวนำที่ทำมาจากซิลิคอน และเนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติเป็นชั้นช่วยลดการสะท้อนแสง (Anti-reflection layer) และยังมีคุณสมบัติในการดักจับแสง (Light trapping)[21-22] ได้เป็นอย่างดี ดังนั้นการนำพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงให้กับโฟโอดีไดโอดชนิด $p-i-n$ แบบพลาเนอร์ จะเป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้เป็นอย่างดี

ลักษณะโครงสร้างของพินโฟโต้ไดโอดแบบพลานาร์ที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงดังในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ลักษณะของโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

บทที่ 3

การออกแบบและขั้นตอนการสร้าง

โครงสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ เป็นโครงสร้างที่สามารถออกแบบเพื่อ กำหนดขนาดของชั้น i ได้ง่าย ซึ่งชั้น i ที่อยู่ระหว่างรอยต่อของพีและเอ็นจะเป็นตัวกำหนดเวลา ในการส่งผ่านของพาหะ(transit time of carriers) ซึ่งสามารถลดได้ด้วยการกำหนดให้ชั้น i มี ขนาดแคบๆ และกระบวนการสร้างคล้ายกับเทคโนโลยีซีมอส[26]

ในบทนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและขั้นตอนการสร้าง ซึ่งในการออกแบบได้แบ่ง ออกเป็น 2 รูปแบบ คือรูปแบบที่หนึ่ง และ รูปแบบที่สอง ขั้นตอนกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด ชนิดนี้ใช้เทคโนโลยีขั้นพื้นฐานในการแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัสและโบรอนลงบนแผ่น ผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิกสภาพความต้านทานสูงประมาณ 2000 $\Omega\text{-cm}$, ระนาบ (111) ซึ่งเป็น เทคโนโลยีที่ประหยัดและสะดวกต่อการสร้างและการวิจัย

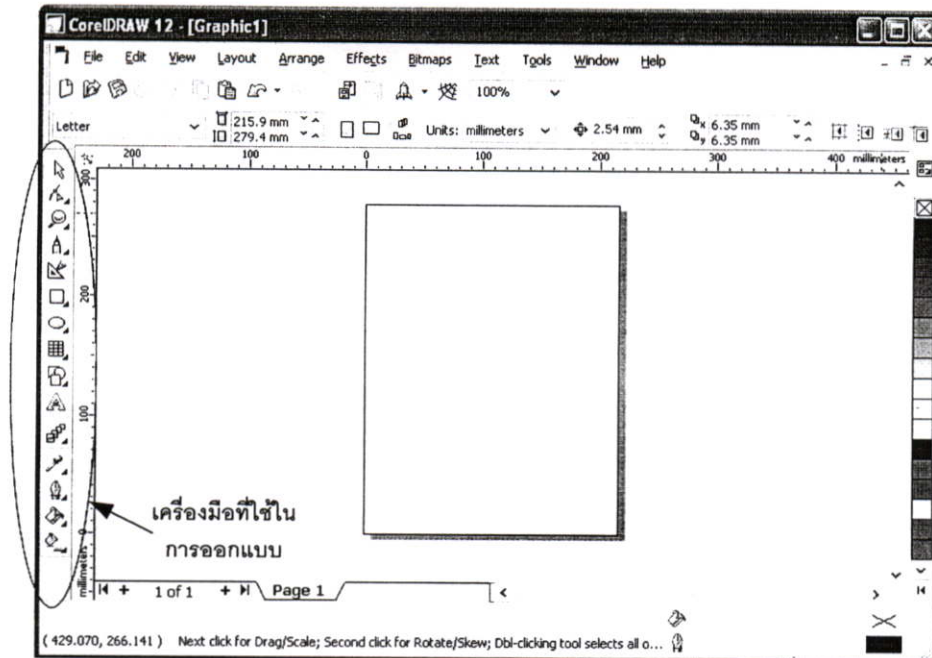
3.1 การออกแบบ

การออกแบบลวดลาย ของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ ได้ออกแบบเพื่อ ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าทางแสงและการตอบสนองสัญญาณแสงทางด้านความถี่ นอกจากนี้มีการออกแบบสำหรับสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน เพื่อศึกษาชั้นลดการสะท้อนแสง เปรียบเทียบกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โฟโตมาสก์ หรือกระจกลดความถี่แบบที่ใช้ในการสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์นี้ มีจำนวน 4 มาส์ค คือ n-region mask, p-region mask, contact window mask และ metal mask ตามลำดับ และ 5 มาส์ค สำหรับสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน คือ n-region mask, p-region mask, contact window mask, metal mask ,และ Porous mask ตามลำดับ

3.1.1 การออกแบบมาสก์ด้วยโปรแกรม CorelDraw

CorelDraw 12 เป็นโปรแกรมด้านกราฟิกที่เป็นที่นิยมใช้กันมานานสำหรับงานวาดภาพ ด้วยคอมพิวเตอร์ การออกแบบโลโก้ เครื่องหมายการค้า ตรา สัญลักษณ์ต่างๆ เป็นต้น

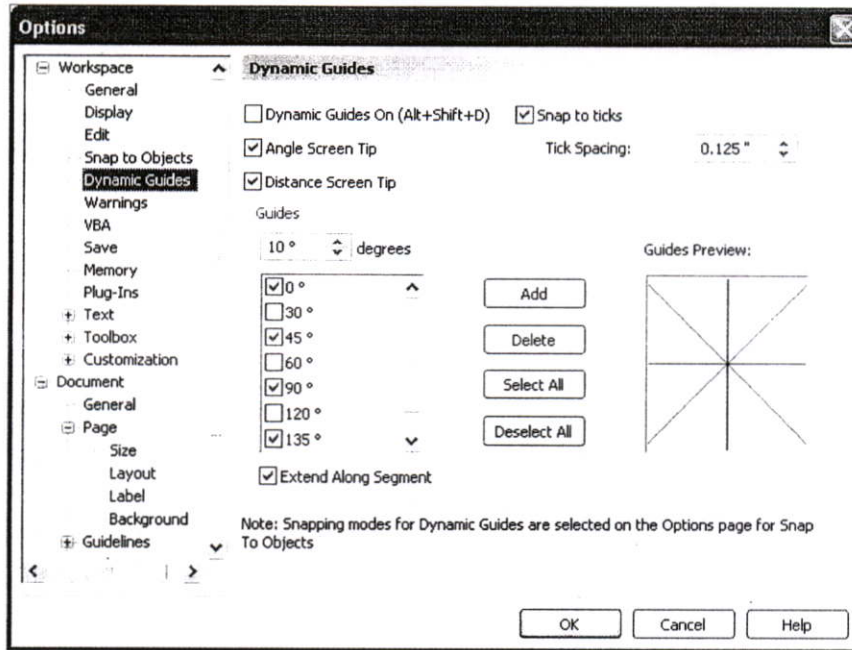
จุดเด่นของ CorelDraw ก็คือใช้งานง่าย สามารถปรับตั้งอัตราส่วนระหว่างงานแบบกับ งานจริงได้



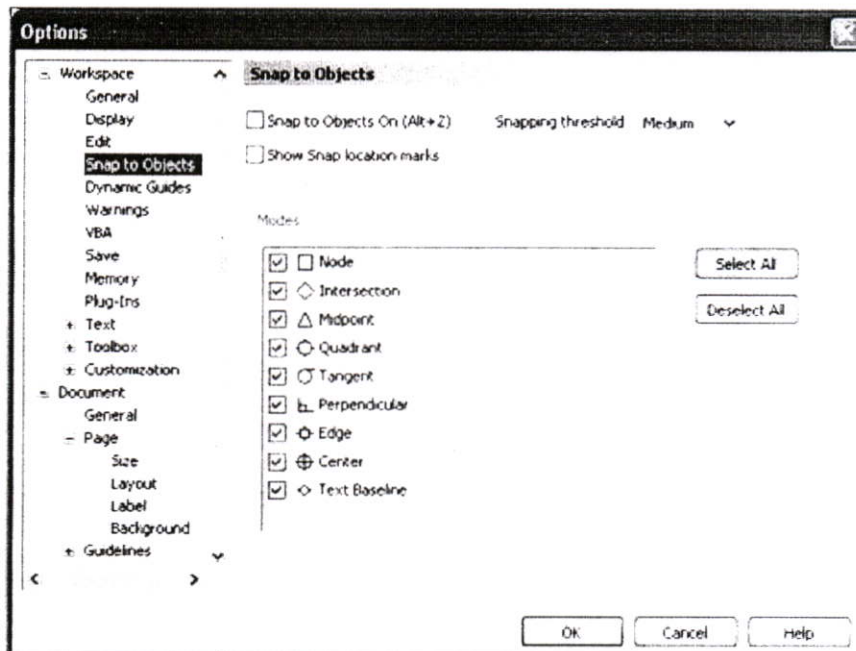
รูปที่ 3.1 ลักษณะของ screen หน้าจอโปรแกรม CoreDraw

จากรูปที่ 3.1 แสดงหน้าตาของตัวโปรแกรม ซึ่งมีเครื่องมือที่อำนวยความสะดวกในการทำงาน เช่น Dynamic Guides, Snap to Objects, Smart Drawing Tool, Polyline Tool และ 3 Point Curve Tool เป็นต้น

Dynamic Guides ช่วยให้สามารถเขียนหรือลากเส้นตรงไปเป็นมุมต่างๆได้ง่ายขึ้น โดยสามารถกำหนดมุมที่ต้องการได้ Snap to Objects ช่วยให้สามารถชี้ตำแหน่งหรือจุดที่ต้องการได้ ถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ



รูปที่ 3.2 ลักษณะของ Dynamic Guides



รูปที่ 3.3 ลักษณะของ Snap to Objects

Smart Drawing Tool ช่วยให้สามารถเขียนเส้นตรงหรือวัตถุรูปทรงต่างๆ เช่น วงกลม หรือสี่เหลี่ยม ให้ถูกต้องได้อย่างง่ายดาย โดยเครื่องมือนี้จะคาดคะเนความน่าจะเป็นจากรูปทรงที่เราวาดแล้วประมวลผลออกมาเป็นภาพที่ถูกต้อง

Polyline Tool และ 3 Point Curve Tool สำหรับ Polyline Tool นั้นเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถเขียนเส้นตรงแบบต่อเนื่องได้ ส่วน 3 Point Curve Tool นั้นเป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สามารถเขียนเส้นโค้งได้อย่างง่ายดายเพียงแค่กำหนดจุด 3 จุด

ในการออกแบบ มาส์ค ด้วยโปรแกรม CorelDraw สามารถกำหนดขนาดของลวดลายได้เท่ากับขนาดของจริง แต่อย่างไรก็ตาม มีข้อจำกัดขนาดของลวดลายบนแผ่นฟิล์ม ขนาดที่เล็กเกินไป จะทำให้ความคมชัดนั้นลดลง ซึ่งในการออกแบบ ควรมีขนาดไม่ต่ำกว่า 20 ไมครอน

เมื่อทำการออกแบบเสร็จข้อมูลที่ได้ จะนำไปสแกนด้วยเลเซอร์ (Laser scanner) ลงบนฟิล์มแล้วนำไปติดลงบนกระจกใสขนาด 3x3 ตารางนิ้ว เพื่อเป็นกระจกโฟโต้มาส์คสำหรับการทดลอง ลักษณะของลวดลายต่างๆ ที่ทำการออกแบบทดลองในครั้งนี้ ดังแสดงในหัวข้อถัดไป

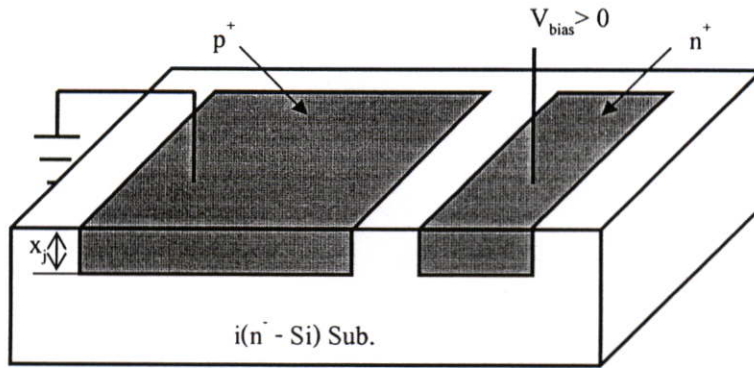
3.1.2 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ รูปแบบที่หนึ่ง

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง
2. เพื่อศึกษาความลึกของรอยต่อ (x_j) ชั้นรับแสง
3. เพื่อศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพ ($p^+ - i, n^+ - i$, และชั้น i)
4. เพื่อศึกษาความเร็วในการตอบสนอง

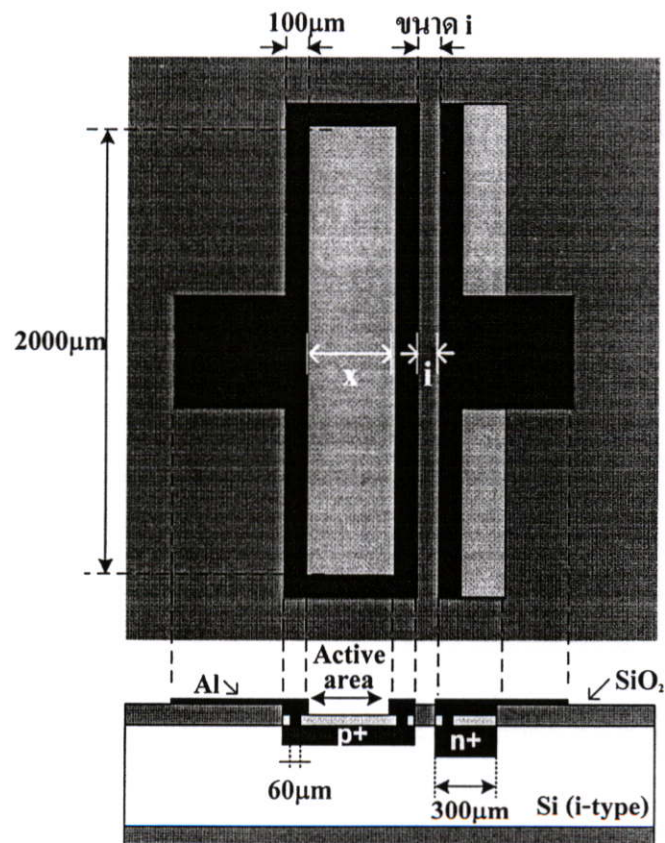
โครงสร้างในรูปแบบที่หนึ่งนี้มีลักษณะแบบง่าย ๆ วัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพื้นที่ไวแสง ประสิทธิภาพที่มีผลต่อการเกิดกระแสแสงสูงสุด ทั้งในพื้นที่ชั้นพี ชั้น i และชั้นเอ็น อีกทั้งรวมถึง การศึกษาผลความลึกรอยต่อ (x_j) ของด้านรับแสงที่ทำให้ไวต่อกระแสแสงดีที่สุด

แสดงลักษณะ โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ ประกอบด้วยชั้นเอ็นและชั้นพีที่เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือทั้งสองชนิดอยู่ทางด้านเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.4

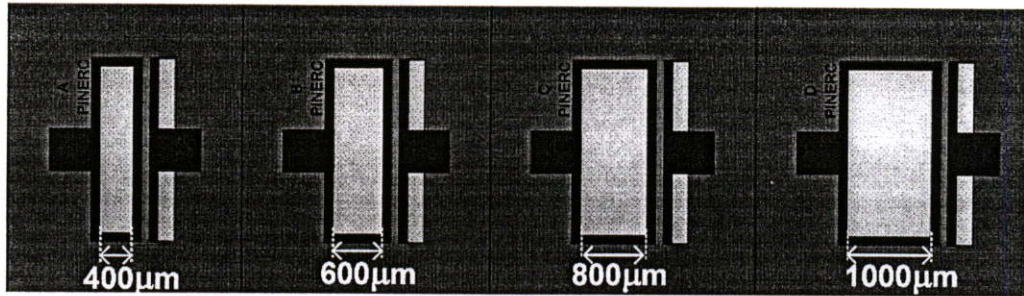


รูปที่ 3.4 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ รูปแบบที่หนึ่ง

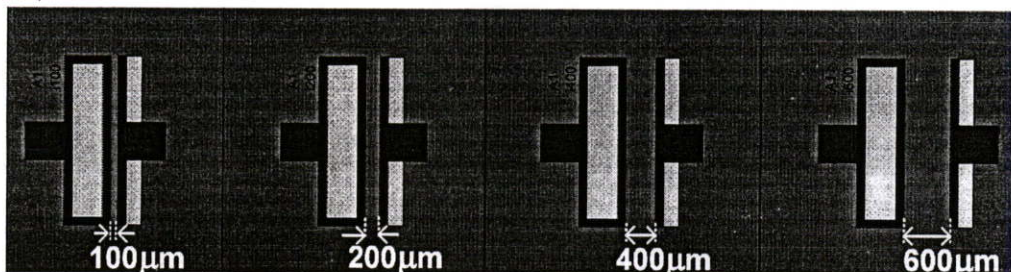
การออกแบบนี้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของพื้นที่ออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนพื้นที่พีและพื้นที่ i ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยกำหนดให้พื้นที่รับแสง (Active area) ในส่วนพีมีขนาดต่างกัน 4 ค่า คือ ที่ขนาด x เท่ากับ $400\ \mu\text{m}$, $600\ \mu\text{m}$, $800\ \mu\text{m}$ และ $1000\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 และพื้นที่ i ที่มีขนาด ต่างกันอีก 4 ค่า คือ $100\ \mu\text{m}$, $200\ \mu\text{m}$, $400\ \mu\text{m}$ และ $600\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 และแสดงขนาดต่างๆได้ในตารางที่ 3.1



รูปที่ 3.5 ลวดลายต้นแบบลักษณะที่หนึ่ง



รูปที่ 3.6 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาดพื้นที่รับแสงต่างกัน 4 ค่า



รูปที่ 3.7 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาด i ต่างกัน 4 ค่า

ตารางที่ 3.1 ขนาดของพื้นที่รับแสง ขนาด i และพื้นที่ในส่วนเอ็น

| Type No. | ขนาด X (μm) | พื้นที่รับแสง p^+ (mm^2) | ขนาด i (μm) | พื้นที่ส่วน n^+ (mm^2) |
|----------|-----------------------------|--|-------------------------------|--|
| A | 400 | 0.8 | 100 | 0.66 |
| B | 600 | 1.2 | 100 | 0.66 |
| C | 800 | 1.6 | 100 | 0.66 |
| D | 1000 | 2.0 | 100 | 0.66 |
| i100 | 400 | 0.8 | 100 | 0.66 |
| i200 | 400 | 0.8 | 200 | 0.66 |
| i400 | 400 | 0.8 | 400 | 0.66 |
| i600 | 400 | 0.8 | 600 | 0.66 |

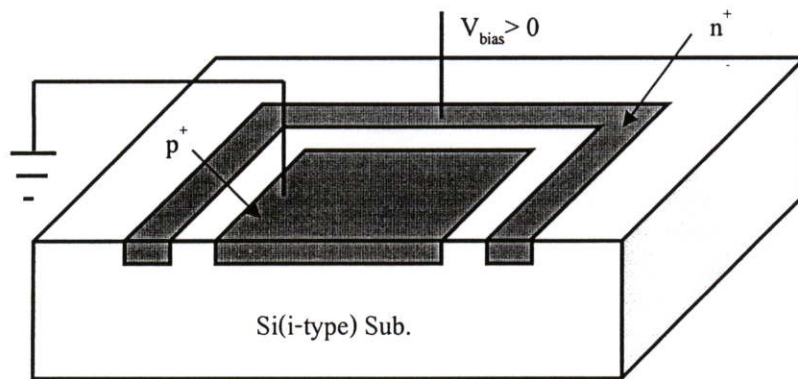
หมายเหตุ กรณีของกลุ่มโฟโตรีโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ จะใช้ลวดลายเดียวกันกับกลุ่มโฟโตรีโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+

3.1.3 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ รูปแบบที่สอง

วัตถุประสงค์

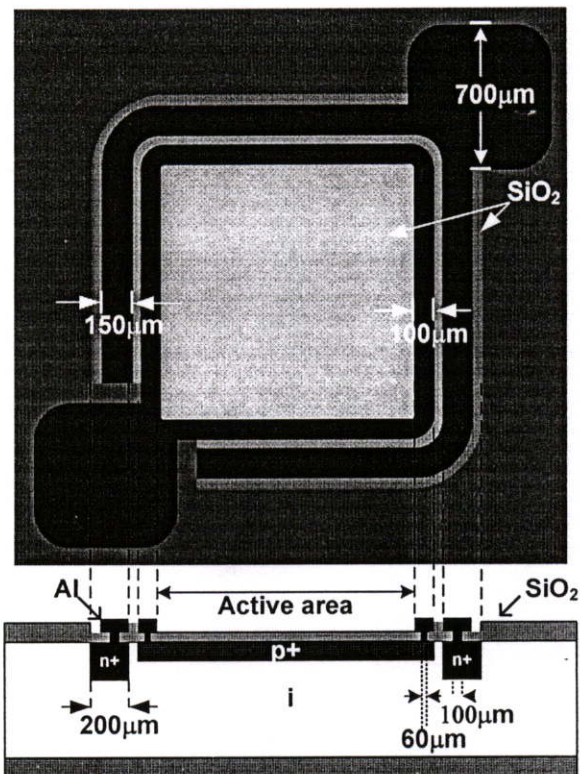
1. เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง
2. เพื่อศึกษาผลของลวดลายโลหะ
3. เพื่อศึกษาผลของ Guard ring
4. เพื่อศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอน

โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ ในรูปแบบนี้ เป็นลักษณะที่มีพื้นที่รับ (Active area) บริเวณส่วนกลาง โดยมีชั้น i และชั้นเอ็นอยู่ล้อมรอบ ดังแสดงในรูปที่ 3.8



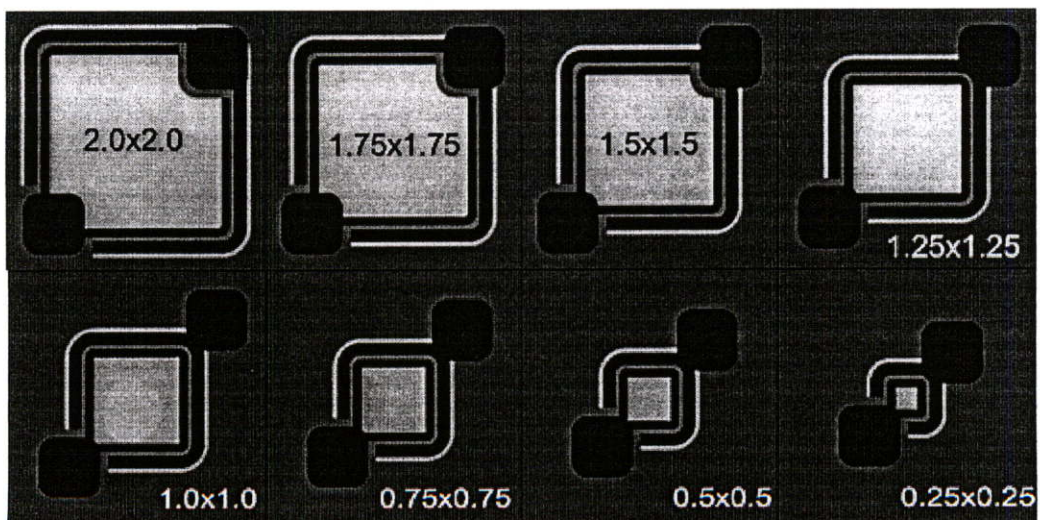
รูปที่ 3.8 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ รูปแบบที่สอง

แสดงลวดลายต้นแบบการทดลองในรูปที่ 3.9 สามารถแบ่งการออกแบบได้ 4 ลักษณะ คือ 1. พื้นที่รับแสง p⁺ 2. ขนาด i 3. ลวดลายขั้วโลหะของชั้นรับแสง และ 4. p⁺-ring ดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 3.9 ลวดลายต้นแบบลักษณะที่สอง

1. พื้นที่รับแสง p^+ (p^+ active area) กำหนดให้พื้นที่รับแสงมีพื้นที่ต่างกัน 8 ขนาด คือ 0.06 mm^2 , 0.25 mm^2 , 0.56 mm^2 , 1.00 mm^2 , 1.56 mm^2 , 2.25 mm^2 , 3.06 mm^2 และ 4.00 mm^2 โดยมีขนาด i และขนาดเอ็น คงที่ ที่ 40 μm และ 200 μm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3.10 และแสดงขนาดต่างๆ ได้ในตารางที่ 3.2



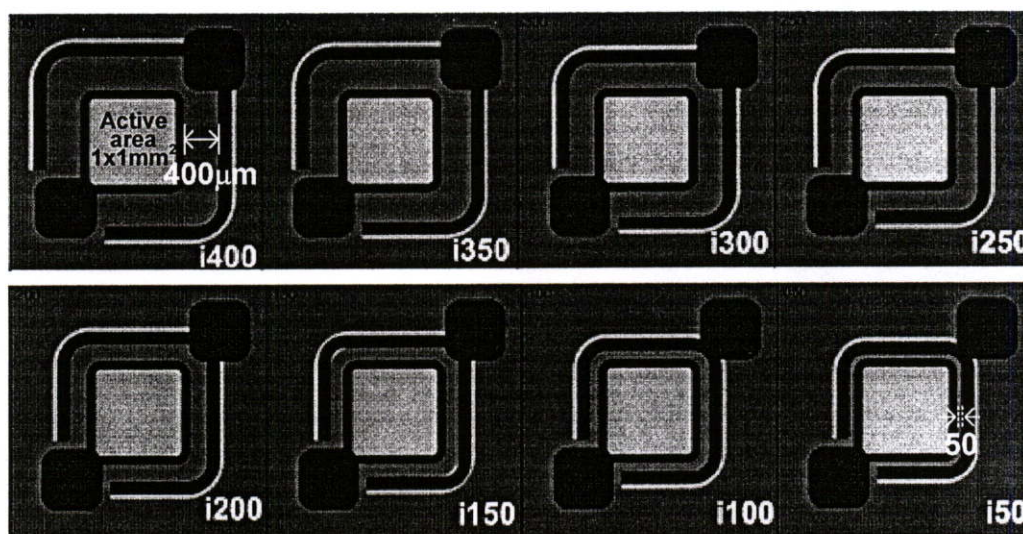
รูปที่ 3.10 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาดพื้นที่รับแสงต่างกัน

ตารางที่ 3.2 ขนาดของพื้นที่รับแสง p^+ (p^+ active area) ในส่วนพี ส่วน i และส่วนเอ็น

| Type No. | พื้นที่รับแสง p^+ (Active area) (mm^2) | ขนาด i (μm) | ขนาด n^+ (μm) |
|----------|---|-----------------------------|---------------------------------|
| A1 | 0.25x0.25 | 40 | 200 |
| A2 | 0.50x0.50 | 40 | 200 |
| A3 | 0.75x0.75 | 40 | 200 |
| A4 | 1.00x1.00 | 40 | 200 |
| A5 | 1.25x1.25 | 40 | 200 |
| A6 | 1.50x1.50 | 40 | 200 |
| A7 | 1.75x1.75 | 40 | 200 |
| A8 | 2.00x2.00 | 40 | 200 |

หมายเหตุ พื้นที่ pad มีขนาด $700 \times 700 \mu\text{m}^2$

2. ขนาด i กำหนดให้มีขนาดต่างกัน 8 ขนาด คือ $50 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $300 \mu\text{m}$, $350 \mu\text{m}$ และ $400 \mu\text{m}$ โดยมีพื้นที่รับแสง p^+ และขนาดเอ็น คงที่ ที่ 1mm^2 และ $200 \mu\text{m}^2$ ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และแสดงขนาดต่างๆได้ในตารางที่ 3.3

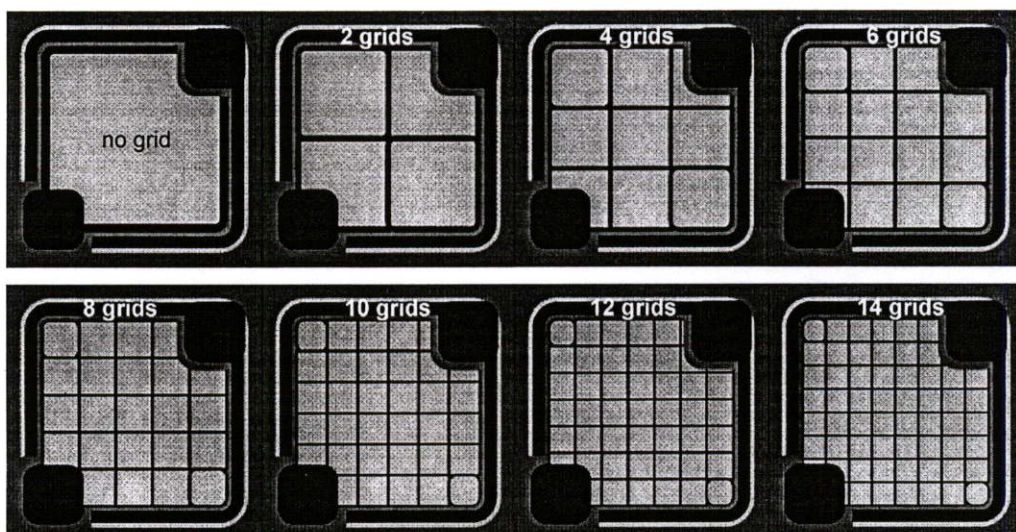


รูปที่ 3.11 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขนาด i ต่างกัน

ตารางที่ 3.3 ขนาดต่างๆ ในส่วนพื้นที่รับแสง p^+ ชั้น i และชั้น n^+

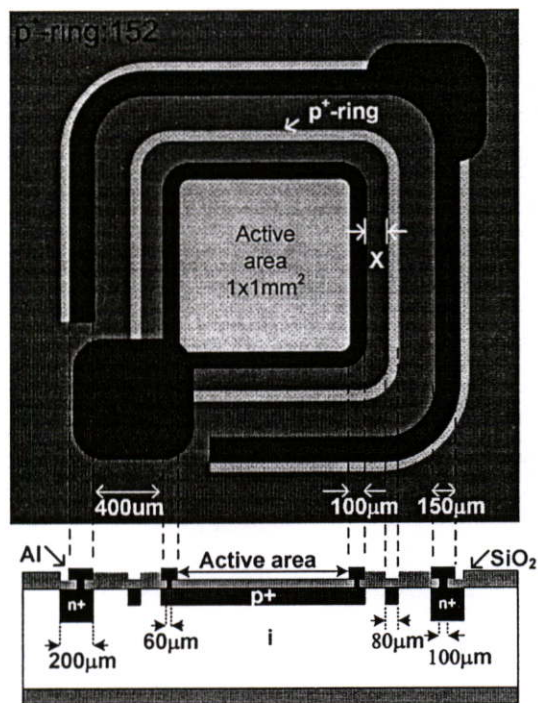
| Type No. | พื้นที่รับแสง p^+ (Active area) (mm) ² | ขนาด i μm | ขนาด n^+ μm |
|----------|---|---------------------------|-----------------------------|
| B1 | 1.00x1.00 | 50 | 200 |
| B2 | 1.00x1.00 | 100 | 200 |
| B3 | 1.00x1.00 | 150 | 200 |
| B4 | 1.00x1.00 | 200 | 200 |
| B5 | 1.00x1.00 | 250 | 200 |
| B6 | 1.00x1.00 | 300 | 200 |
| B7 | 1.00x1.00 | 350 | 200 |
| B8 | 1.00x1.00 | 400 | 200 |

3. ลวดลายอลูมิเนียม กำหนดให้มีลักษณะต่างกัน 8 แบบ ตามจำนวนลวดลายกริด คือเริ่มตั้งแต่ไม่มีกริดตรงบริเวณส่วนกลางของพื้นที่รับแสง และเพิ่มขึ้นตามจำนวนกริด คือ 2 กริด, 4 กริด, 6 กริด, 8 กริด, 10 กริด, 12 กริด, และ 14 กริด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยแต่ละแบบนั้นถูกกำหนดให้มีพื้นที่รับแสงเท่ากันที่ 4 mm^2

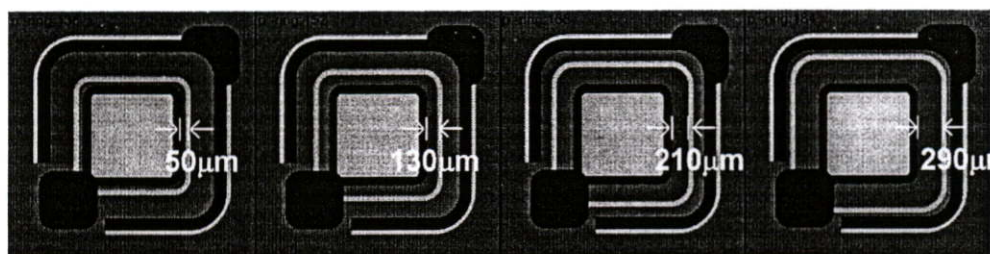


รูปที่ 3.12 ลวดลายต้นแบบ ที่มีขั้วไฟฟ้าของพื้นที่รับแสงต่างกัน

4. p^+ -ring แสดงลวดลายต้นแบบได้ดังในรูปที่ 3.13 โดยกำหนดให้ระยะห่างของ p^+ -ring หรือขนาด x จากพื้นที่รับแสงต่างกัน 4 ค่า คือ $50\ \mu\text{m}$, $130\ \mu\text{m}$, $210\ \mu\text{m}$ และ $290\ \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.13 แสดงแบบลวดลายและภาพตัดขวางของ p-i-n แบบพลาแนร์ ที่มี p^+ -ring



รูปที่ 3.14 ลวดลายต้นแบบ ที่มีระยะของ p^+ -ring ต่างกัน

3.2 ขั้นตอนการสร้าง

ขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ เป็นการสร้างโดยใช้เทคโนโลยีขั้นพื้นฐานในการแพร่อะตอมสารเจือด้วยวิธีทางความร้อนที่อุณหภูมิสูง ซึ่งลักษณะการสร้างจะเหมือนกับโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็น เพียงแต่การสร้างไดโอดชนิดนี้มีการแพร่อะตอมสารเจือ 2 ครั้ง คือ การแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอนและฟอสฟอรัสเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรอง

ซิลิคอนชนิดอินทรินซิกที่มีสภาพความต้านทานสูง 2000 $\Omega\text{-cm}$ ระบาย (111) และแผ่นผลึกซิลิคอนมีความหนาประมาณ 500 μm

ลวดลายต้นแบบหรือกระจกมาสก์ที่ใช้ในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนียร์ มีทั้งหมดด้วยกัน 4 มาส์ค ดังนี้

Mask I Phosphorus Diffusion ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัส

Mask II Boron Diffusion ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน

Mask III Contact Window ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ

Mask IV Metal ใช้สำหรับสร้างลวดลายอะลูมิเนียม

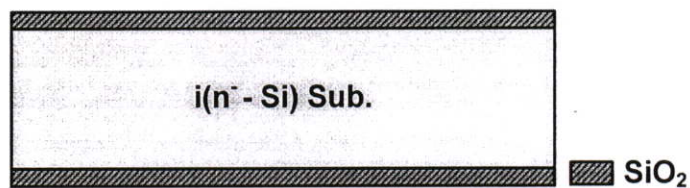
ลำดับขั้นตอนการสร้างมีดังนี้

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน เพื่อกำจัดสิ่งสกปรก และคราบไขมัน
2. สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ให้มีความหนาประมาณ 6000-7000 Å เพื่อเป็นชั้นป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ
3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 1
ใช้กระจกมาสก์ต้นแบบ #Mask I Phosphorus Diffusion สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัส
4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ครั้งที่ 2
ใช้กระจกมาสก์ต้นแบบ # Mask II Boron Diffusion สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ครั้งที่ 3
ใช้กระจกมาสก์ต้นแบบ # Mask III Contact Window สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ
6. ทำการเคลือบอะลูมิเนียมด้วยวิธีการระเหยอะลูมิเนียมในสุญญากาศ ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr.
7. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 4
ใช้กระจกมาสก์ต้นแบบ # Mask IV Metal สำหรับสร้างลวดลายอะลูมิเนียม
8. ทำการซินเตอร์ริง (sintering) ที่อุณหภูมิ 480 °C เป็นเวลา 12 นาที

3.2.1 ขั้นตอนการสร้างรูปแบบที่หนึ่ง

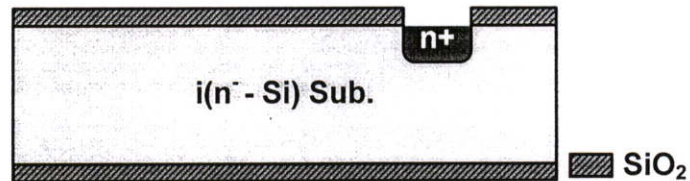
เพื่อการศึกษาผลของความลึกรอยต่อ (x_j) ของชั้นรับแสง เวลาที่ใช้ในการแพร่ขับลึก (drive-in) ของชั้นรับแสงทำที่เวลาต่างๆ กัน คือ 15 นาที 25 นาที 35 นาที และ 45 นาที ตามลำดับ โดยใช้อุณหภูมิที่ $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะได้ความลึกของรอยต่อต่างๆ กัน 4 ค่า คือ $0.39\text{ }\mu\text{m}$, $0.49\text{ }\mu\text{m}$, $0.58\text{ }\mu\text{m}$ และ $0.66\text{ }\mu\text{m}$ และมีขั้นตอนการสร้างดังนี้

1. เริ่มจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการทำความสะอาด (Cleaning) ไปสร้างออกไซด์ ด้วยวิธีเทอร์มอลออกซิเดชัน (Thermal Oxidation) ได้ความหนาประมาณ 6000 \AA



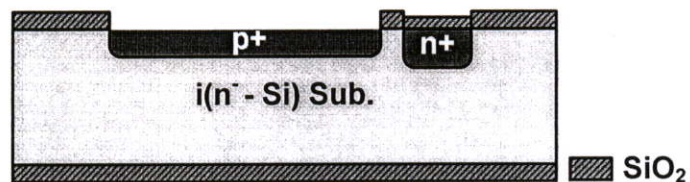
รูปที่ 3.15 แผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

2. ทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัส



รูปที่ 3.16 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัสของมาส์ค 1

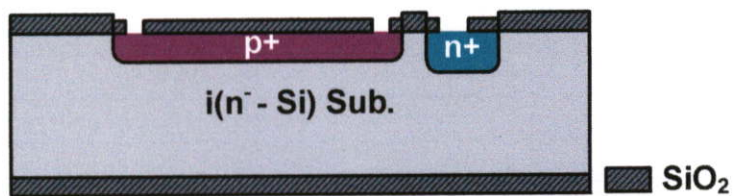
3. ทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน



รูปที่ 3.17 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอนของมาส์ค 2

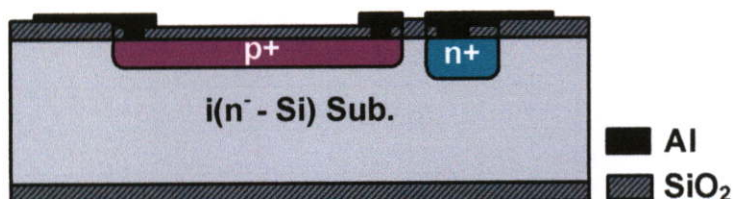
หมายเหตุ รายละเอียดขั้นตอนการสร้างโดยละเอียด สามารถดูได้ในภาคผนวก ก.

4. ทำการเปิดช่องขั้วสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและสารกึ่งตัวนำ

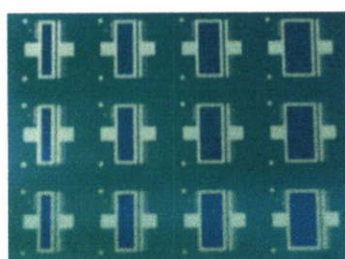


รูปที่ 3.18 การเปิดช่องขั้วสัมผัสของมาส์ค 3

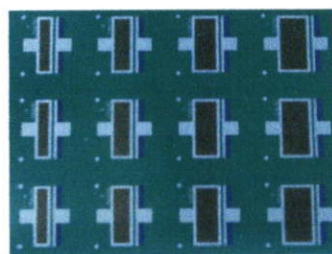
5. ทำการเคลือบอะลูมิเนียมและสร้างลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้า



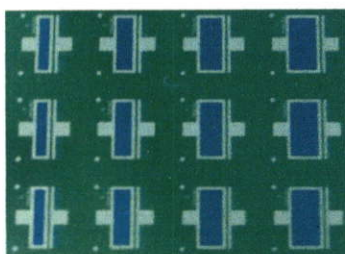
รูปที่ 3.19 การสร้างขั้วโลหะของมาส์ค 4



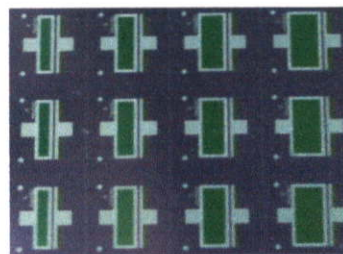
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.20 โฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ ของลวดลายรูปแบบที่หนึ่ง ที่สร้างเสร็จบนแผ่นผลึกซิลิคอน (ก) ที่เวลาแพร์ 15 นาที (ข) ที่เวลาแพร์ 25 นาที (ค) ที่เวลาแพร์ 35 นาที และ (ง) ที่เวลาแพร์ 45 นาที

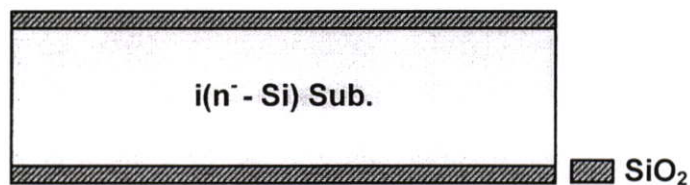
3.2.2 ขั้นตอนการสร้างรูปแบบที่สอง

ขั้นตอนการสร้างรูปแบบที่สอง จะเหมือนกันกับขั้นตอนการสร้างในรูปแบบที่หนึ่ง เพียงแต่ จะใช้เวลาในการขัปลึกของชั้นรับแสงที่เวลา 45 นาที (อุณหภูมิ 1000 °C) เนื่องจากเป็นค่าที่เหมาะสมที่สุด ในช่วงเวลาทดลอง 15 นาที 25 นาที 35 นาที และ 45 นาที

ในการสร้างได้ถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ให้พื้นที่รับแสงเป็น p^+ (p^+ active area) และอีกชุดให้พื้นที่รับแสงเป็น n^+ (n^+ active area) นอกจากนี้ยังได้ใช้โฟโตโธไดโอดรูปแบบที่สองเป็นตัวทดลองสร้างพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอีกด้วย ขั้นตอนการสร้างดังแสดงต่อไปนี้

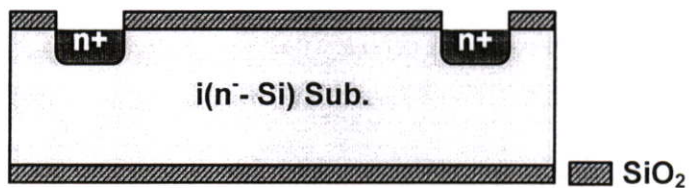
ชุดที่ 1 (p^+ active area)

1. เริ่มจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาด (Cleaning) ไปสร้างออกไซด์ ด้วยวิธีเทอร์มอลออกซิเดชัน



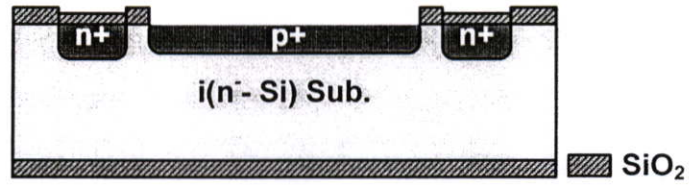
รูปที่ 3.21 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

2. ทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัส



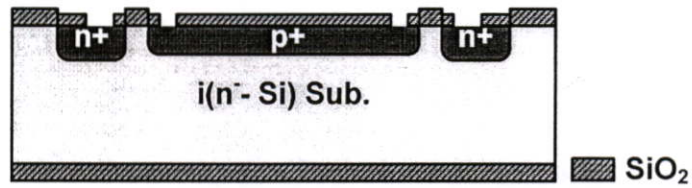
รูปที่ 3.22 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัสของมาส์ค 1

3. ทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน



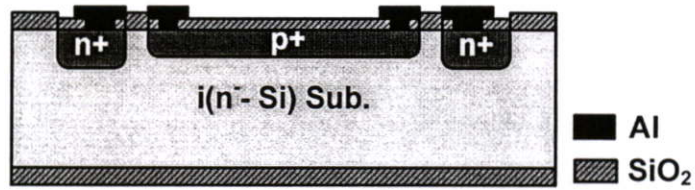
รูปที่ 3.23 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอนของมาส์ค 2

4. ทำการเปิดช่องขั้วสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.24 การเปิดช่องขั้วสัมผัสของมาส์ค 3

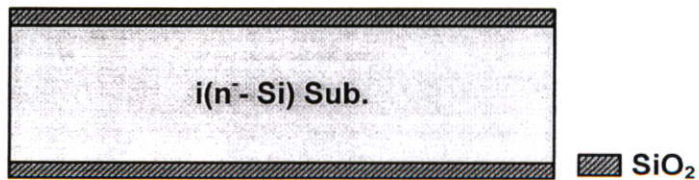
5. ทำการเคลือบอะลูมิเนียมและสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 3.25 การสร้างขั้วโลหะของมาส์ค 4

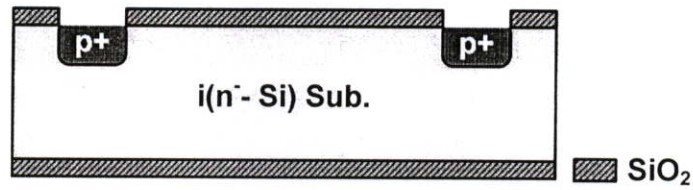
ชุดที่ 2 (n^+ active area)

1. เริ่มจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอนหลังจากผ่านกระบวนการทำความสะอาด (Cleaning) ไปสร้างออกไซด์ ด้วยวิธีเทอร์มอลออกซิเดชัน



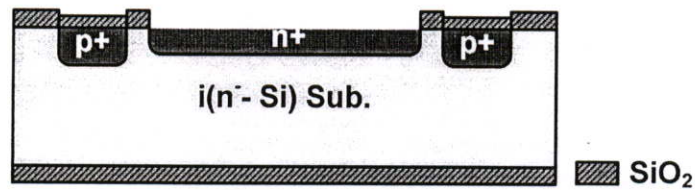
รูปที่ 3.26 การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

2. ทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน



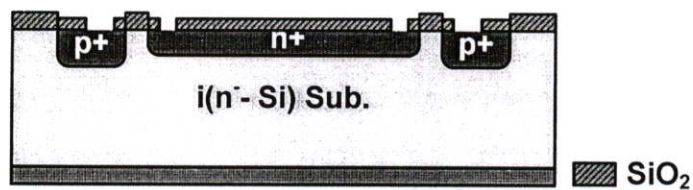
รูปที่ 3.27 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอนของมาส์ค 1

3. ทำการแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัส



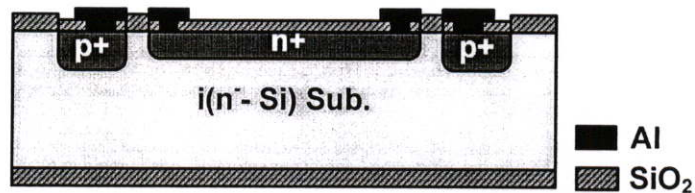
รูปที่ 3.28 การแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัสของมาส์ค 2

4. ทำการเปิดช่องขั้วสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.29 การเปิดช่องขั้วสัมผัสของมาส์ค 3

5. ทำการเคลือบอะลูมิเนียมและสร้างลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้า



รูปที่ 3.30 การสร้างขั้วโลหะของมาส์ค 4

หมายเหตุ มาส์คต้นแบบในชุดที่ 1 (p^+ active area) และชุดที่ 2 (n^+ active area) นั้นสามารถใช้ร่วมกันได้

3.2.3 ขั้นตอนการสร้างพอร์สซิลิคอน

สำหรับมาสก์ต้นแบบที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอนจะถูกเพิ่มมาอีก 1 มาสก์ จากกระบวนการสร้างปกติ รวมเป็น 5 มาสก์ ดังนี้

Mask I Phosphorus Diffusion ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัส

Mask II Boron Diffusion ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน

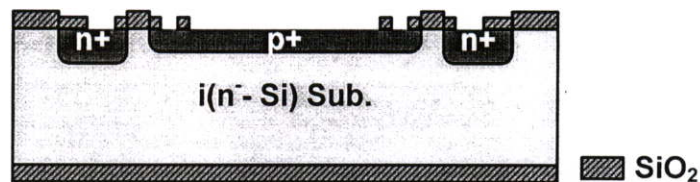
Mask III Contact Window ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ และสร้างพอร์สซิลิคอน

Mask IV Metal Mask ใช้สำหรับสร้างลวดลายอะลูมิเนียม

Mask V Porous Mask ใช้สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอน

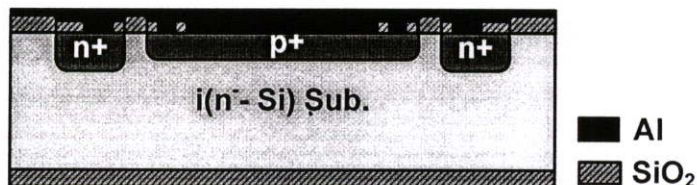
ลำดับขั้นตอนการสร้างพอร์สซิลิคอน มีดังต่อไปนี้

1. เมื่อผ่านขั้นตอนการแพร่อะตอมสารเจือทั้งสองชนิดดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น ทำการเปิดช่องออกไซด์ โดยใช้ # Mask III Contact Window สำหรับรอยสัมผัสขั้วไฟฟ้าและส่วนที่ต้องการสร้างพอร์สซิลิคอน



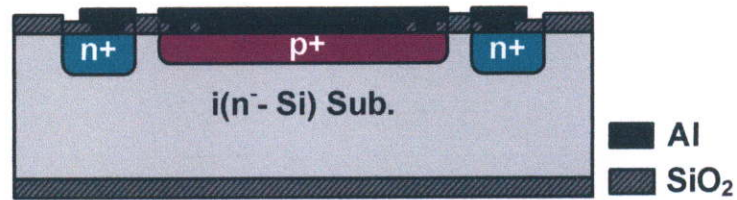
รูปที่ 3.31 การเปิดช่องขั้วสัมผัสและช่องสำหรับสร้างพอร์สซิลิคอนของมาสก์ 3

2. เคลือบชั้นอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm



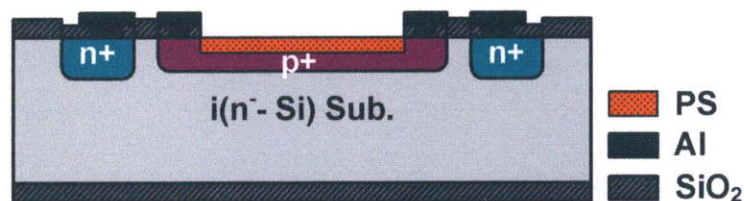
รูปที่ 3.32 การเคลือบอะลูมิเนียมสำหรับสร้างเป็นขั้วโลหะไฟฟ้า

3. สร้างลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้าของขั้วเอ็น (# Mask IV Metal Mask)

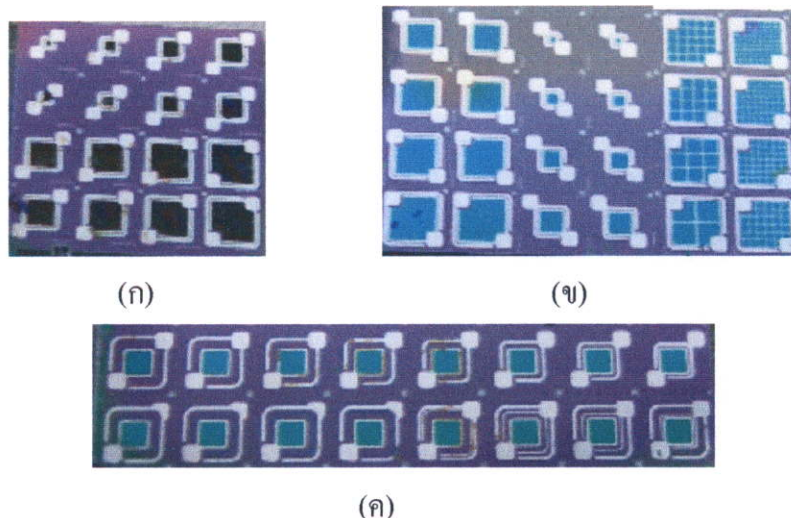


รูปที่ 3.33 การสร้างลวดลายขั้วโลหะของมาส์ค 4

4. สร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล (Stain Etching) โดยใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก 47 เปอร์เซ็นต์ ผสมกับกรดไนตริก 60 เปอร์เซ็นต์ และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ [9] เวลาในการกัดประมาณ 45 วินาที จะได้ชั้นพอร์สซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 3.34 (#Mask V Porous Mask)



รูปที่ 3.34 โฟโตนิกไดโอดที่ผ่านขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนของมาส์ค 5



- รูปที่ 3.35 โฟโตนิกไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมาร์ ของลวดลายรูปแบบที่สอง ที่สร้างเสร็จบนแผ่นผลึกซิลิคอน (ก) โฟโตนิกไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (ข) และ (ค) ลักษณะของโฟโตนิกไดโอดในรูปแบบต่างๆ ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.36 โฟโตไดโอดที่ติดตั้งลงบนตัวถังแบบกระป๋อง

(ก) กลุ่มของไดโอดที่ยังไม่มีชั้นเรซินป้องกันรอยขีดข่วนและความชื้น

(ข) กลุ่มของไดโอดที่มีชั้นเรซินเพื่อป้องกันรอยการขีดข่วนและความชื้น

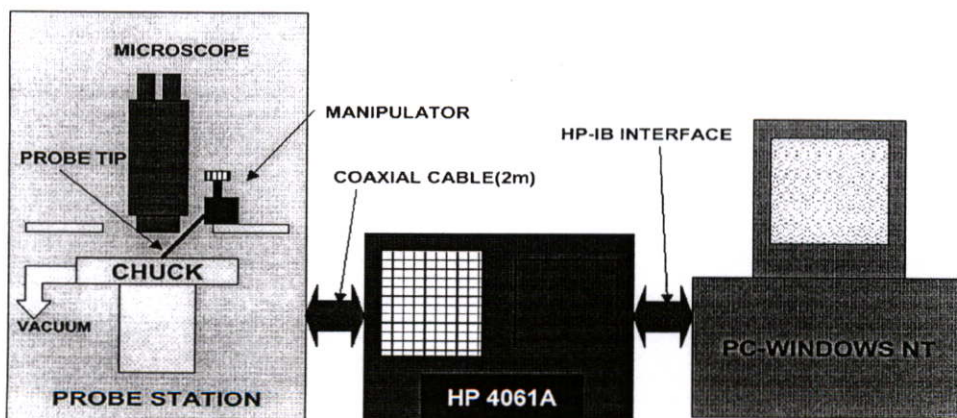
บทที่ 4

การทดลองและผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง โดยแบ่งการทดลองออกเป็นหัวข้อหลักๆ ด้วยกัน 4 หัวข้อ ดังนี้ 1. การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง เป็นการวัดคุณสมบัติของโฟโตไดโอดที่เสร็จจากกระบวนการสร้าง ในลักษณะของกระแสและแรงดัน ค่าความจุไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลอง 2. โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ รูปแบบที่หนึ่ง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความลึกของรอยต่อชั้นรับแสง พื้นที่ไวแสงประสิทธิผล รวมทั้งการตอบสนองทางความถี่ 3. โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ รูปแบบที่สอง เป็นการศึกษาผลของขั้วโลหะไฟฟ้าด้านรับแสง และลักษณะของ Guard ring ในรูปแบบต่างๆ นอกจากนี้ ยังมีการทดลองสร้างชั้นพอร์ซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงบนโฟโตไดโอดชนิดนี้

4.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง

การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงเป็นสิ่งสำคัญในการวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ของโฟโตไดโอด เช่น กระแสมืด กระแสแสง และ ความเร็วในการตอบสนอง ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของโฟโตไดโอดทุกๆ ไป โฟโตไดโอดที่สร้างได้ จะถูกนำไปวัดและทดสอบด้วยเครื่องวิเคราะห์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor Analyzer) ของ HP รุ่น 4061 A ลักษณะของอุปกรณ์ในการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ทำการทดลองครั้งนี้ได้จากหลอดฮาโลเจน นอกจากนี้ยังมีการทดลองกับแสงอัลตราไวโอเล็ต (UVC) ความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 220 - 290 nm



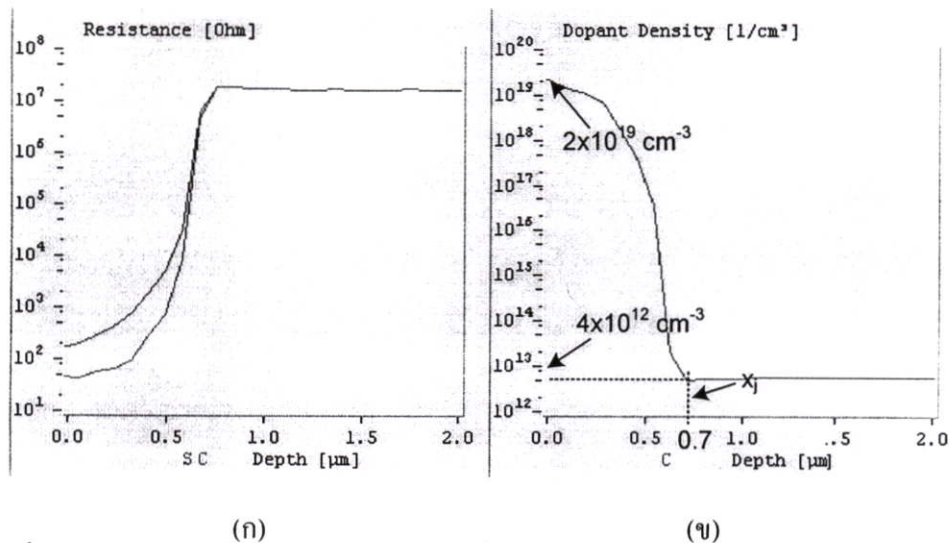
รูปที่ 4.1 ลักษณะของอุปกรณ์ในการทดลองวัดลักษณะสมบัติของไดโอด

เพื่อศึกษาผลการทดลอง ไดโอดที่สร้างเสร็จ จะนำมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และการตอบสนองทางความถี่ กล่าวคือ ลักษณะทางไฟฟ้า เป็นการทดลองในลักษณะของกระแสและแรงดัน ขณะไม่ได้รับแสง และลักษณะของความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ลักษณะทางแสง เป็นการทดลองในลักษณะของกระแสและแรงดัน ขณะได้รับแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ส่วนการตอบสนองทางความถี่ เป็นการทดลองกับแสงเลเซอร์ที่ทำการมอดูเลทกับสัญญาณรูปคลื่นไซน์ (sine wave) ความถี่ต่างๆ

4.2 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ รูปแบบที่หนึ่ง

4.2.1 ความลึกของรอยต่อชั้นรับแสง

การทดลองนี้เป็นการกำหนดให้พื้นที่รับแสงเป็นชั้น p^+ และมีความลึกของชั้น p^+ หรือความลึกของรอยต่อ $p^+ - i$ ต่างๆ กัน 4 ค่า ที่เวลาในการขั้บลึก 15 นาที 25 นาที 35 นาที และ 45 นาที และจะได้ความลึกที่ 0.39 μm , 0.49 μm , 0.58 μm และ 0.66 μm ตามลำดับ เพื่อพิจารณาผลของความลึกของรอยต่อ (x_j) ที่มีต่อการเกิดกระแสแสง ผลของการวัดระยะความลึกของรอยต่อที่เวลา 45 นาที ดังแสดงในรูปที่ 4.2 และผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังในรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความลึกของรอยต่อ (x_j) ที่เวลา 45 นาที (ก) แสดงค่าความต้านทาน (Resistance) ในเนื้อสารซิลิคอน และ (ข) ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

จากรูปที่ 4.2 เป็นกราฟที่ได้จากเครื่องวัดค่าความลึกของรอยต่อ รูปที่ 4.2 (ก) แสดงค่าความต้านทานของเนื้อสารซิลิคอนที่เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือ ความต้านทานของเนื้อซิลิคอนจะมีค่าน้อยที่ผิวหน้าของซิลิคอนและจะมีค่าสูงขึ้น เมื่อมีระยะลึกเข้าไปในเนื้อซิลิคอน

เนื่องจากความหนาแน่นของอะตอมสารเจือปนน้อยลง จนกระทั่งความหนาแน่นของอะตอมสารเจือมีค่าเท่ากับความหนาแน่นของแผ่นผลึกเริ่มต้น (substrate) และ ณ จุดนี้จะเรียกว่าความลึกของรอยต่อ (x_j) พอดี รูปที่ 4.2 (ข) แสดงค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ โดยมีค่าสูงสุดที่ผิวของซิลิคอนประมาณ $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ และมีค่าลดลงจนเท่ากับความหนาแน่นของแผ่นผลึกเริ่มต้นที่ประมาณ $4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$ โดยความลึกของรอยต่อ สามารถหาได้จากสมการ การกระจายของ Gaussian ต่อไปนี้

$$N(x,t) = \left(Q / \sqrt{\pi D_2 t_2} \right) \exp - \left(x_j / 2 \sqrt{D_2 t_2} \right)^2 \quad (4.1)$$

และ
$$Q = 2N_0 \sqrt{D_1 t_1 / \pi} \quad (4.2)$$

โดยที่ Q คือ จำนวนอะตอมสารเจือต่อตารางเซนติเมตร (atoms/cm^2)

N_0 คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือที่ผิวเวเฟอร์ (atoms/cm^3)

$D_1 t_1$ คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่และเวลาในการแพร่ ช่วงเริ่มต้น (Predeposition)

$D_2 t_2$ คือ สัมประสิทธิ์ของการแพร่และเวลาในการแพร่ ช่วงที่สอง (Drive-in)

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4.2) จะได้ปริมาณของอะตอมสารเจือต่อพื้นที่ หรือเรียกว่า ปริมาณโดส (dose) และนำไปแทนลงในสมการที่ (4.1) จะได้ค่าความลึกของรอยต่อเท่ากับ $0.66 \mu\text{m}$ ซึ่งได้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกับค่าที่ทำการวัด

ความหนาแน่นอะตอมสารเจือของแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (n^+) หาได้จาก สภาพความต้านทาน (Resistivity) ของแผ่น

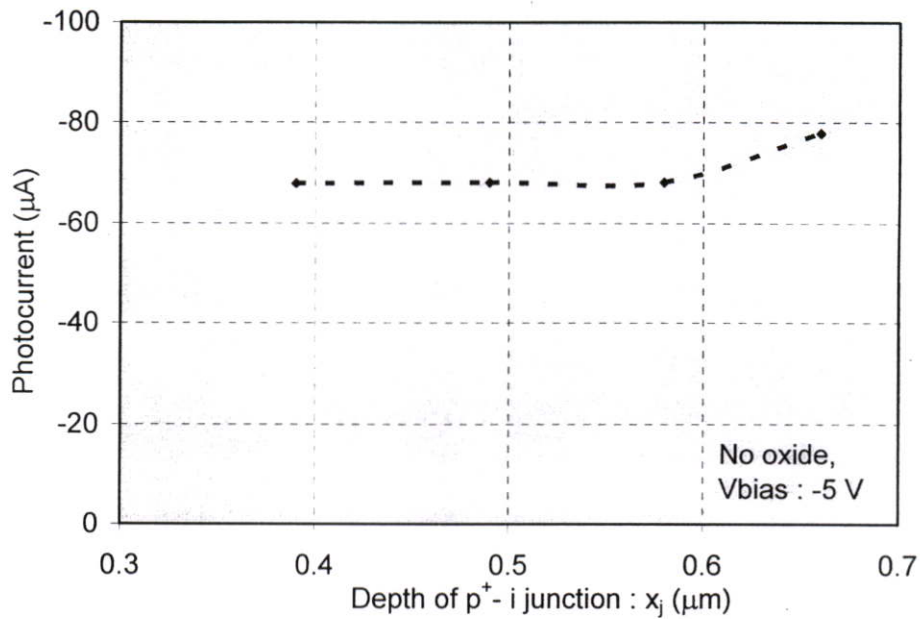
$$\rho = \frac{1}{nq\mu} \quad (4.3)$$

โดยที่ q คือ ประจุไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

μ_n คือ สภาพคล่องของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1350 \text{ cm}^2/\text{V-sec}$

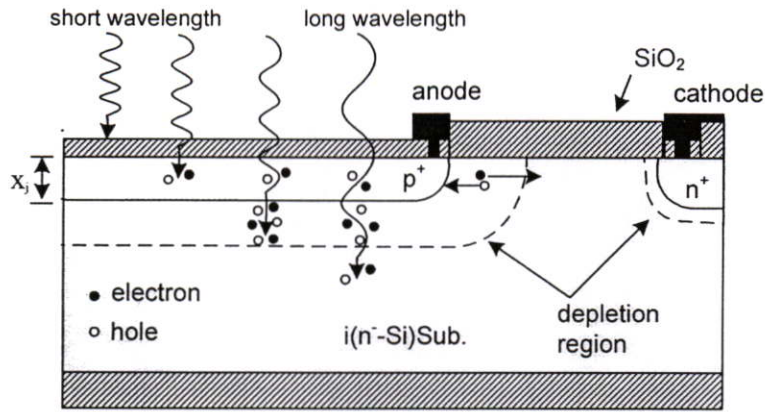
ρ คือ สภาพความต้านทานแผ่น มีค่าเท่ากับ $2000 \Omega\text{-cm}$

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ 4.3 จะได้ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือเท่ากับ $1.7 \times 10^{12} \text{ atoms/cm}^3$ และเมื่อเทียบกับค่าที่วัดได้ก็จะมีค่าใกล้เคียงกัน



รูปที่ 4.3 ลักษณะของกระแสแสงและความลึกของรอยต่อ p⁺-i ขณะได้รับความเข้มแสงคงที่ 3000 lx พื้นที่รับแสง 1.2 mm²

จากรูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่า ความลึกของรอยต่อด้านรับแสงหรือรอยต่อ p⁺-i ที่ 0.39 μm, 0.49 μm, 0.58 μm และ 0.66 μm มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงกระแสแสงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม ความลึกของรอยต่อที่จะทำให้เกิดกระแสแสงได้ดีที่สุด ควรสอดคล้องกับความยาวคลื่นแสงสำหรับแสงที่มีความยาวคลื่น 450 nm และ 430 nm สามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อซิลิคอนที่ความลึก 0.27 nm และ 0.18 nm ตามลำดับเท่านั้น[25] นั่นหมายความว่า ความยาวคลื่นช่วงยาว (long wavelength) นั้นสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อซิลิคอนได้ดีกว่าความยาวคลื่นสั้นๆ (short wavelength) ซึ่งจากผลการทดลองโดยใช้ความเข้มแสงจากหลอดฮาโลเจน ความลึกของรอยต่อที่ 0.66 μm ทำให้เกิดกระแสแสงได้ดีที่สุด ซึ่งสามารถแสดงลักษณะของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล แบบนี้ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับแสงที่มีความยาวคลื่นต่างกัน

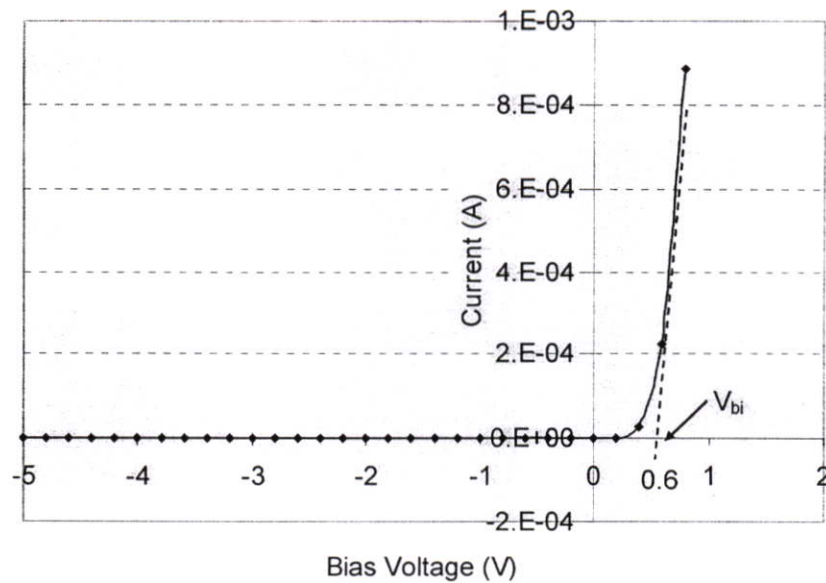
แสงที่มีความยาวคลื่นสั้น จะเกิดการสะท้อนแสงได้มาก ทำให้การทะลุเข้าไปในเนื้อสารซิลิคอนมีค่าน้อย ต่างจากแสงที่มีความยาวคลื่นยาว จะมีการสะท้อนแสงน้อย สามารถทะลุเข้าไปในเนื้อสารซิลิคอนได้มาก แต่อย่างไรก็ดี แสงที่มีความยาวคลื่นยาว ก็จะมีพลังงานแสงน้อยด้วยเช่นกัน ดังนั้น ไดโอดที่มีความลึกของชั้นรับที่พอดีกับระยะทางที่แสงสามารถทะลุเข้าไปถึงบริเวณปลอดพาหะได้ ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลายเป็นกระแสไฟฟ้าภายในวงจรได้ดีที่สุด ความลึกของรอยต่อ (x_j) ตื้นๆ จะเหมาะสมกับการตรวจจับแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ ในขณะที่ความลึกของรอยต่อมีค่ามาก จะเหมาะสมกับการตรวจจับแสงที่มีความยาวคลื่นยาว ซึ่งลักษณะเช่นนี้ อาจนำไปประยุกต์ ใช้เป็นตัวตรวจจับแสงในย่านที่ต้องการได้

4.2.2 พื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพ

เนื่องจากโครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ มีชั้น p⁺ ชั้น i และชั้น n⁺ ที่อยู่ด้านเดียวกัน เมื่อมีแสงมาตกกระทบด้านรับแสง และแสงมีพลังงานมากกว่าพลังงานช่องว่าง (energy gap, E_g) ก็จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลในชั้นต่างๆ เหล่านี้ แต่พื้นที่ไหนจะเป็นพื้นที่ทำให้เกิดผลดีที่สุด ดังนั้นการทดลองเพื่อหาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพ เช่น พื้นที่รับแสงรอยต่อ p⁺-i ชั้น i และรอยต่อ n⁺-i ที่จะเป็นชั้นรับแสงได้ดีที่สุดและทำให้เกิดกระแสแสงสูงสุด ก็เป็นวิธีหนึ่งในการพัฒนาโฟโตไดโอดชนิดนี้

4.2.2.1 พื้นที่รับแสงรอยต่อ p⁺-i มีค่าต่างกัน 4 ค่า คือ 0.8 mm², 1.2 mm², 1.6 mm² และ 2.0 mm² และเขียนแทนด้วยสัญลักษณ์ A, B, C และ D ตามลำดับ ดังที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 3.6 และมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

การทดลองลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง



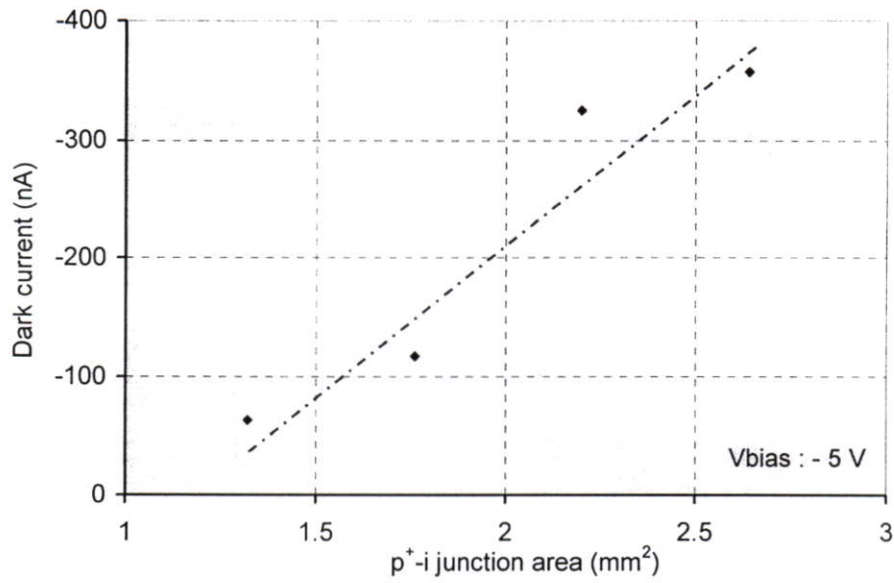
รูปที่ 4.5 ลักษณะของกระแสและแรงดัน ขณะไม่ได้รับแสง

คุณลักษณะระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง ที่แรงดันไบอัส -5 V ไดโอดมีกระแสมืดต่ำประมาณ 48.1 nA/mm^2 โดยมีแรงดันขีดเริ่มประมาณ 0.6 V ดังแสดงในรูปที่ 4.5 ซึ่งสามารถหาได้จากสมการที่ 4.4 และไดโอดสามารถทนแรงดันไบอัสย้อนกลับได้สูงถึง 150 V ซึ่งเป็นลักษณะเด่นของไดโอดชนิดนี้ กระแสมืดเพิ่มขึ้นกับพื้นที่รอยต่อ $p^+ - i$ ดังแสดงในรูปที่ 4.6 เนื่องจากกระแสมืดแปรผันโดยตรงกับพื้นที่รอยต่อนั้นเอง [30]

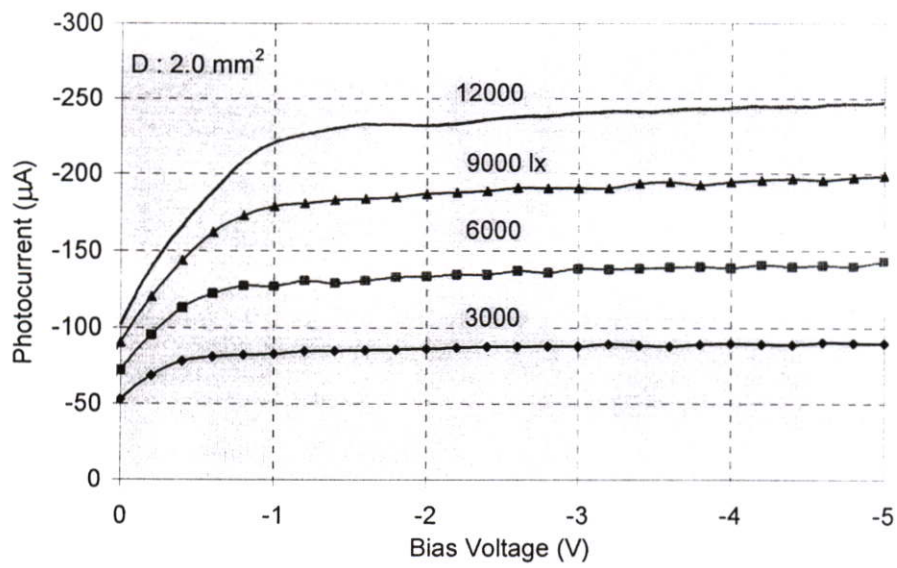
$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right) \quad (4.4)$$

โดยที่ $\frac{kT}{q} = 26 \text{ mV}$ ที่อุณหภูมิห้อง ($T = 300\text{K}$)
 N_A คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับในชั้นพี ($2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$)
 N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ในชั้น i (n^-) ($4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$)
 n_i คือ ความหนาแน่นอินทรินซิกมีค่าเท่ากับ $1.45 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ ที่อุณหภูมิห้อง

เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4.4) จะได้ค่าเท่ากับ 0.66 V ซึ่งใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้ในรูปที่ 4.5

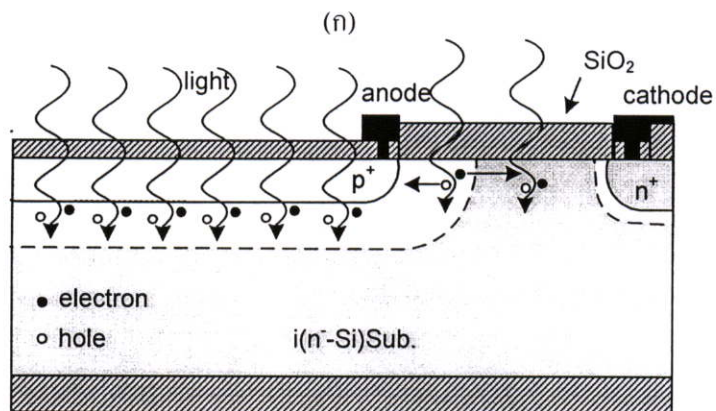
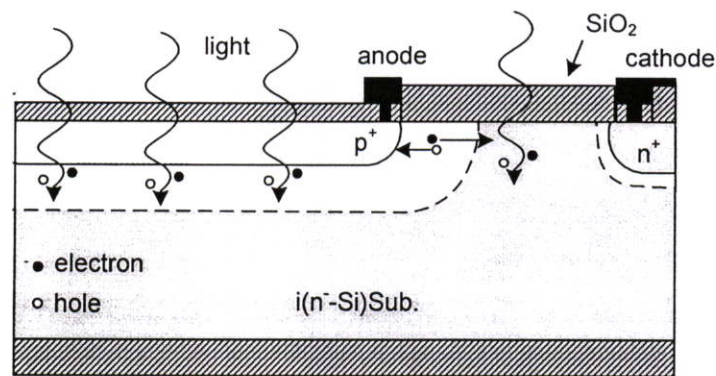


รูปที่ 4.6 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสมืดและรอยต่อ p⁺-i



รูปที่ 4.7 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและแรงดันไบอัส

ในขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแสงการดูดกลืนโฟตอนจะทำให้มีกระแสแสงเกิดขึ้น จากรูปที่ 4.7 แสดงลักษณะสมบัติระหว่างกระแสและแรงดัน ขณะได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ กัน 3000 lx, 6000 lx, 9000 lx และ 12000 lx จะเห็นได้ว่า กระแสแสง (photocurrent) เพิ่มขึ้นกับความเข้มแสงอย่างเชิงเส้น การที่กระแสแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นกับความเข้มแสงนั้น เพราะว่าปริมาณโฟตอน (photon) ที่ตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดมีมากขึ้น ความเข้มแสงหมายถึง ความหนาแน่นของโฟตอนที่ตกกระทบลงบนพื้นที่ต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เมื่อปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบมีมากขึ้น ทำให้อัตราการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.8 นอกจากนี้ เมื่อกำหนดให้ความเข้มแสงคงที่ 9000 lx และแรงดันไบอัส -5 V พบว่า กระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับพื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ ดังในรูปที่ 4.9

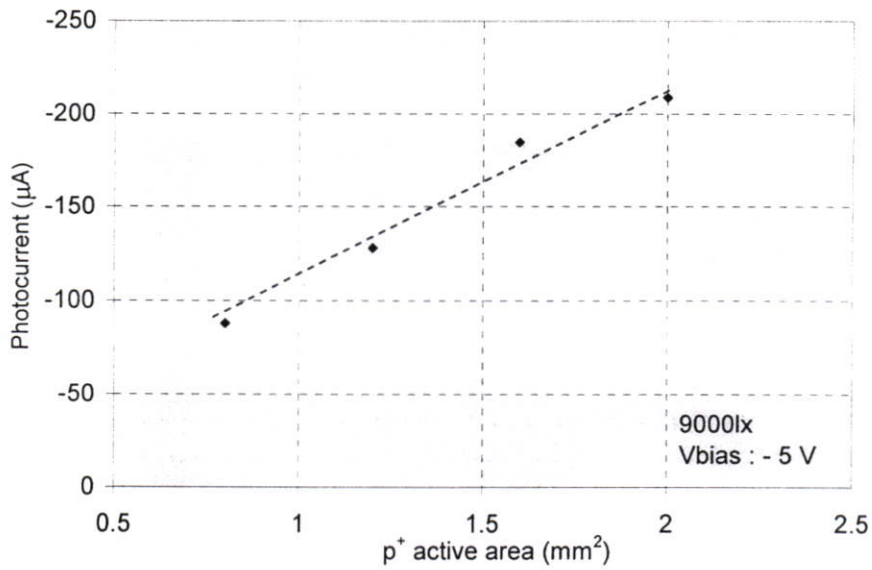


(ข)

รูปที่ 4.8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

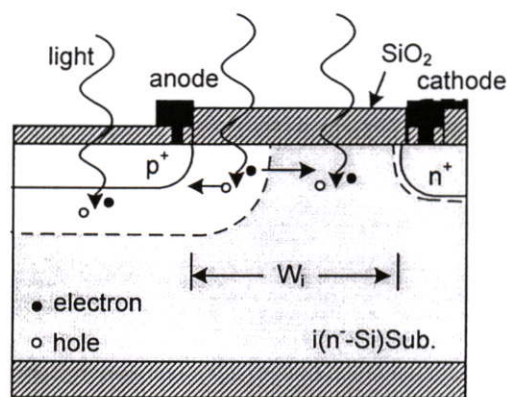
(ก) ความเข้มแสงน้อย

(ข) ความเข้มแสงมาก

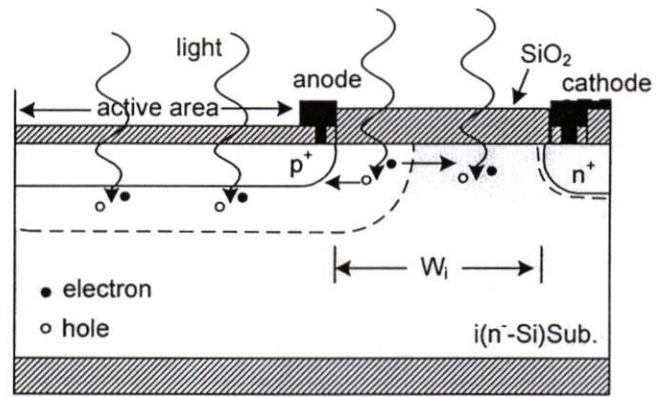


รูปที่ 4.9 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i

การที่กระแสแสงเพิ่มขึ้นกับพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i เพราะว่าพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i เป็นรอยต่อที่มีบริเวณปลอดพาหะกว้าง เมื่อพื้นที่ของรอยต่อเพิ่มขึ้นก็จะทำให้พื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ดังนั้นการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณปลอดพาหะ ก็จะมีค่ามากตามพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i ดังแสดงในรูปที่ 4.10



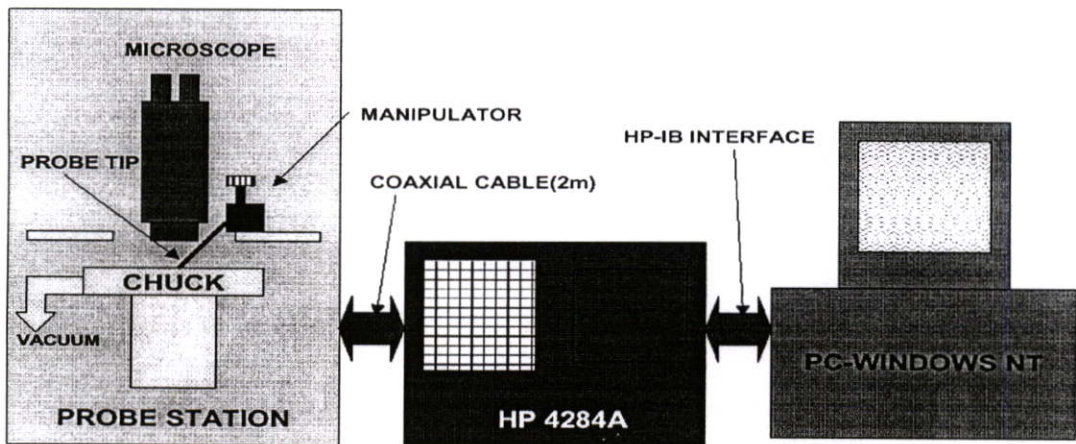
(ก)



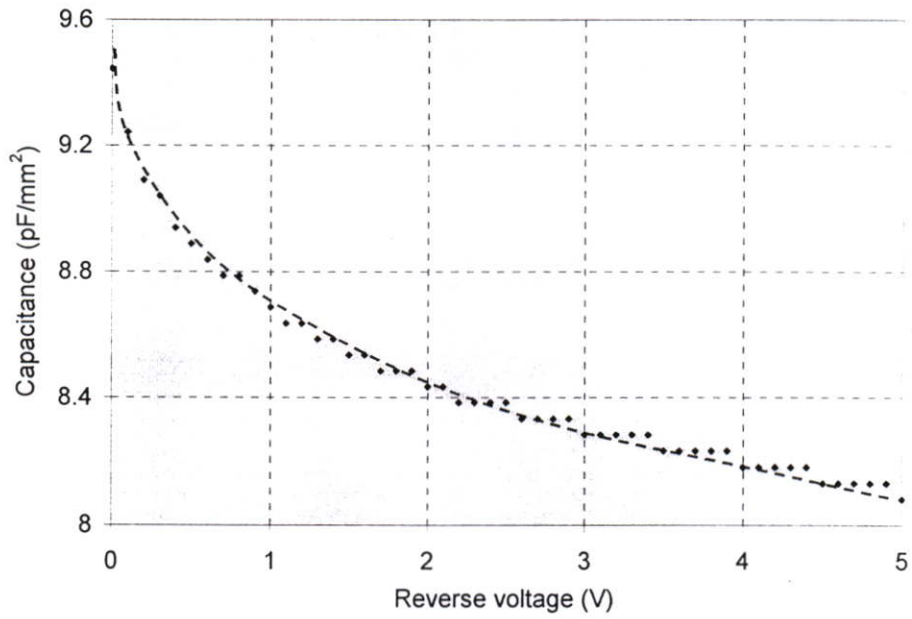
(ข)

- รูปที่ 4.10 ลักษณะการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ภายในพื้นที่บริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ $p^+ - i$
- (ก) พื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ น้อย
- (ข) พื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ มาก

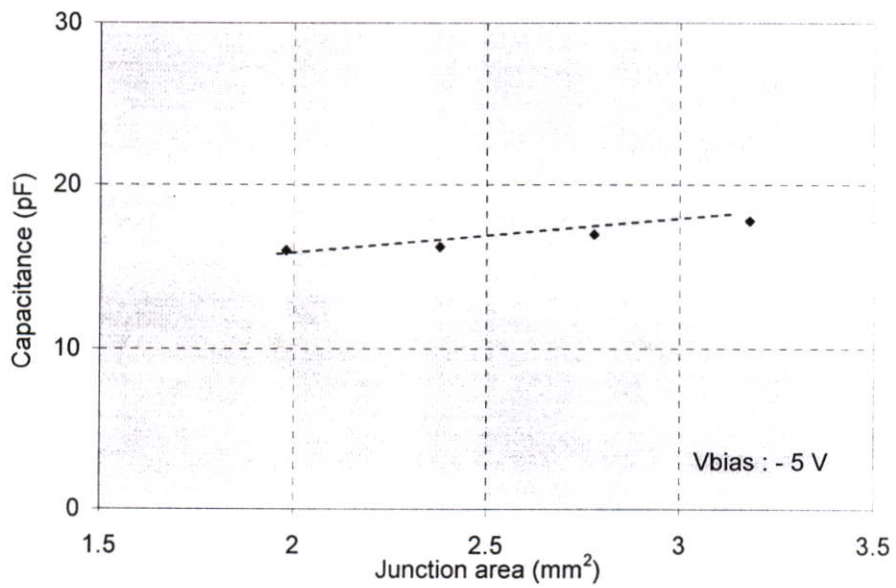
การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าและแรงดัน วิเคราะห์ได้จากเครื่อง HP 4284 A ดังแสดงในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ลักษณะเครื่องมือที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้าและแรงดัน



รูปที่ 4.12 ลักษณะความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและแรงดันย้อนกลับ



รูปที่ 4.13 ลักษณะความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าและพื้นที่รอยต่อ

จากรูปที่ 4.12 แสดงลักษณะของค่าความจุไฟฟ้าต่อพื้นที่และแรงดันย้อนกลับของโฟโอดีโอดีชนิดนี้ ขณะไม่ได้รับแรงดันไบอัส (0 V) โอดีมีความจุไฟฟ้า 9.45 pF/mm^2 และที่แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นเป็น -5 V โอดีมีความจุไฟฟ้า 8.1 pF/mm^2 จะเห็นได้ว่าความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ซึ่งค่าความจุไฟฟ้าจะมีลักษณะลดลงอย่างเอกโพเนนเชียลเมื่อได้รับแรงดันย้อนกลับเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อแปรผกผันกับ $|V_R|^{1/2}$ นอกจากนี้ความจุไฟฟ้ายังมีลักษณะเพิ่มขึ้นกับพื้นที่รอยต่อของโอดีอย่างเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เพราะว่าค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันโดยตรงกับพื้นที่รอยต่อของโอดีนั่นเอง

$$C_j = \epsilon_{si} \frac{A}{W} \quad (4.5)$$

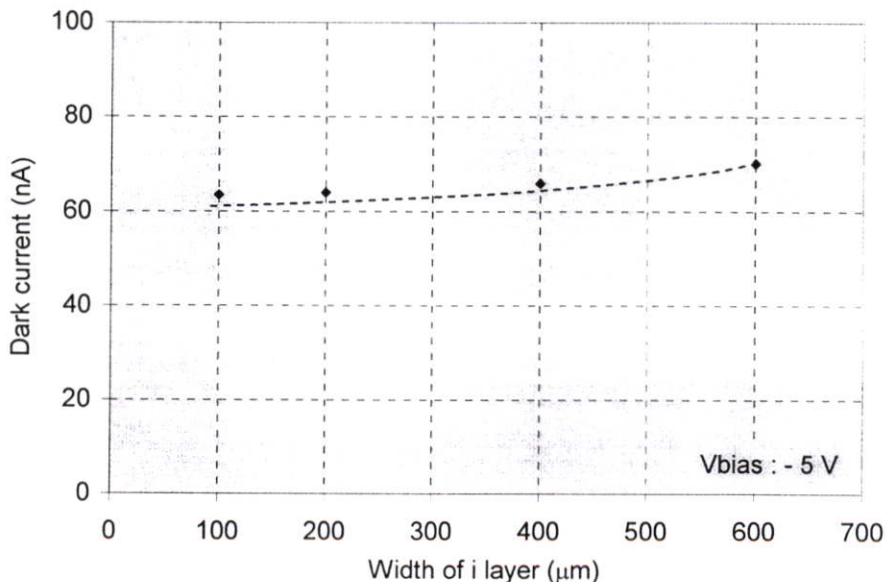
โดยที่ ϵ_{si} คือเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

A คือพื้นที่ของรอยต่อ

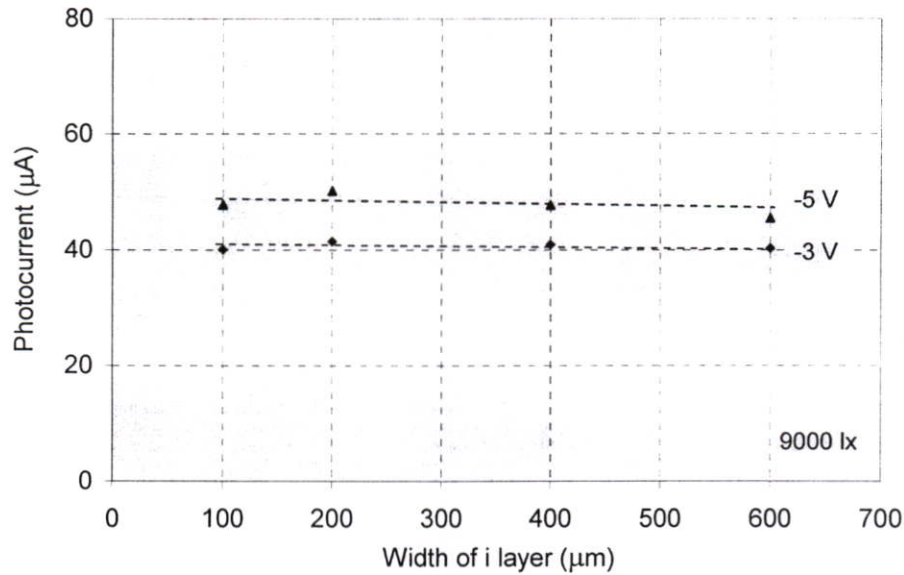
W คือความกว้างของชั้นปลอดพาหะ

จากสมการ (4.5) จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ แปรผันโดยตรงกับพื้นที่ของรอยต่อ และแปรผกผันกับ ความกว้างของชั้นปลอดพาหะ

4.2.2.2 พื้นที่ชั้น i มีขนาด ต่างกันอีก 4 ค่า คือ $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $400 \mu\text{m}$ และ $600 \mu\text{m}$ ดังที่ได้ออกแบบไว้ในรูปที่ 3.6 ผลการทดลองลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง ดังแสดงต่อไปนี้



รูปที่ 4.14 ลักษณะของกระแสมืดและความกว้างของชั้น i



รูปที่ 4.15 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและความกว้างของชั้น i

ไดโอดที่มีความกว้างของชั้น i ซึ่งอยู่ระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ มีขนาดเพิ่มขึ้นตามแนวแกนอน เมื่อทดสอบผลของกระแสมืด (dark current) หรือกระแสรั่ว (leakage current) ของไดโอด ที่แรงดันไบอัส -5 V ในขณะที่ไม่ได้รับแสง พบว่า กระแสมืดของไดโอดมีค่าเปลี่ยนแปลงเล็กน้อย เมื่อไดโอดมีความกว้างของชั้น i เพิ่มขึ้น ซึ่งกระแสมืดอยู่ในช่วงประมาณ 60-70 nA กระแสมืดนี้มีลักษณะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในขณะที่ความกว้างของชั้น i มีค่าเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 นอกจากนี้ยังพบว่า พื้นที่รับแสงชั้น i หรือความกว้างชั้น i ที่เพิ่มขึ้นตามแนวแกนอน กระแสแสงก็มีลักษณะคงที่ อย่างไรก็ตามกระแสแสงเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 4.15 เนื่องจากกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในบริเวณชั้นปลอดพาหะ ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

จากผลการทดลองความกว้างของชั้น i ที่เพิ่มขึ้นนั้น ไม่ทำให้เกิดกระแสแสงเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด เนื่องจากบริเวณปลอดพาหะที่ทำให้เกิดกระแสแสงมีค่าเท่าเดิม ไม่เพิ่มขึ้นกับความกว้างชั้น i ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ $p^+ - i$ หาได้จากสมการดังนี้

$$W = \left[\frac{2\epsilon_{si} (V_{bi} + V_R)}{qN_D} \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

โดยที่ ϵ_{si} คือ เปรอริมิตติวิตีของซิลิคอน มีค่าเท่ากับ $11.7 \times 8.854 \times 10^{-14}$ F/cm

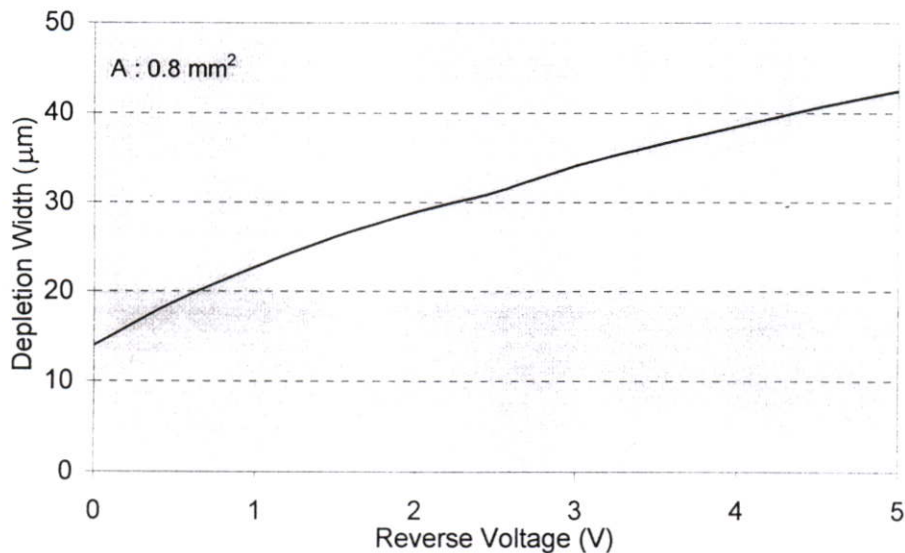
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้ในชั้น i (n^-) (4×10^{12} cm $^{-3}$)

V_{bi} คือ กำแพงศักย์ที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ

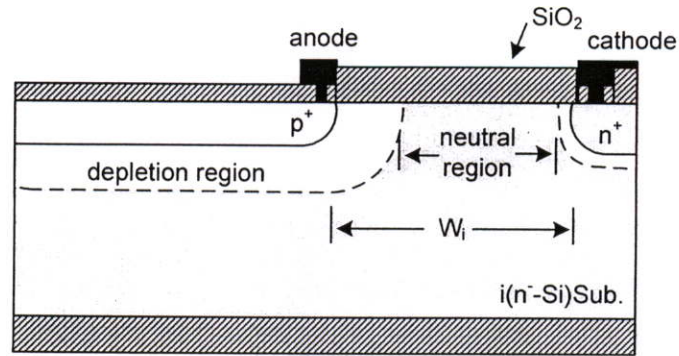
V_R คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ป้อนให้กับไดโอด

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 4.5 จะได้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.16



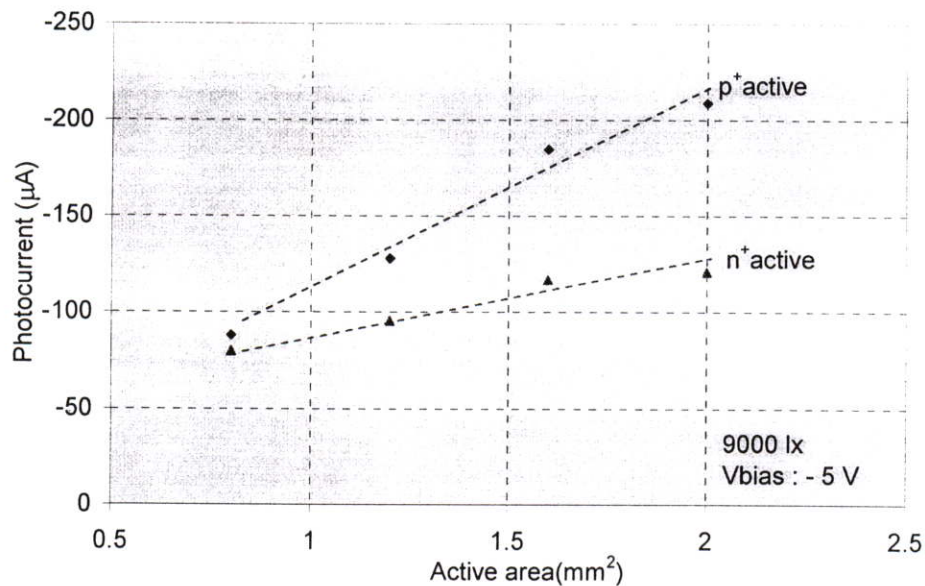
รูปที่ 4.16 ความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างบริเวณปลอดพาหะและแรงดันไบอัสย้อนกลับ

จากความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณปลอดพาหะและแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะเห็นได้ว่า ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไบอัสย้อนกลับในลักษณะของฟังก์ชันพาราโบลา และพบว่าที่แรงดันไบอัส -5 V จะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวเข้าไปในชั้น i ประมาณ 42.5 μm ในขณะที่ความกว้างของชั้น i ที่น้อยที่สุด หรือระยะห่างระหว่างชั้น p $^+$ และชั้น n $^+$ มีขนาด 100 μm ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างชั้น p $^+$ และชั้น n $^+$ นี้ จึงประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ บริเวณปลอดพาหะ และบริเวณนิวทรัล ซึ่งบริเวณนิวทรัลนี้มีผลต่อการเกิดกระแสย่อย เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าส่วนใหญ่ตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 ลักษณะของบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล

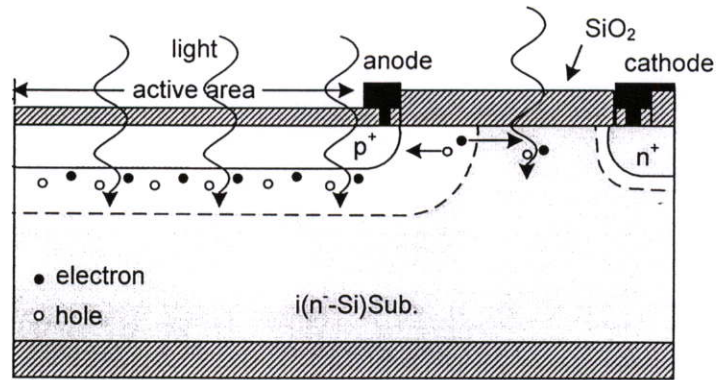
4.2.2.3 ผลการทดลองของชั้นรับแสง p^+ และชั้นรับแสง n^+



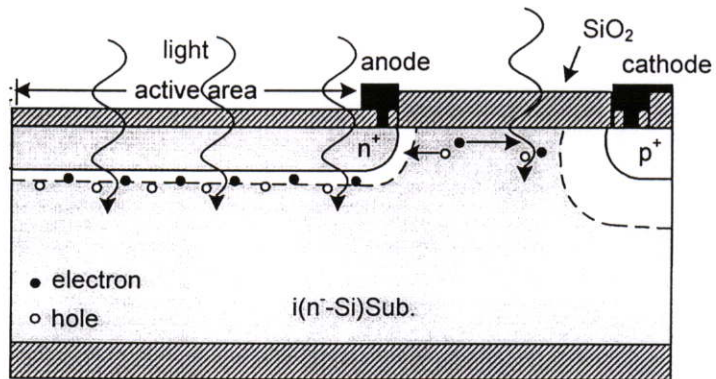
รูปที่ 4.18 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและพื้นที่รับแสง

จากการทดลองและเปรียบเทียบโฟโตนิกไดโอด สองกลุ่มที่มีชั้นรับแสง p^+ และกลุ่มที่มีชั้นรับแสง n^+ โดยทั้งสองกลุ่มมีขนาดของพื้นที่รับแสง (active area) ที่เท่ากัน และมีขนาดเพิ่มขึ้นตามแนวแกนอน เมื่อนำไปตรวจวัดความเข้มแสงที่ได้จากหลอดฮาโลเจน ที่ความเข้มแสง 9000 lx แรงดันไบอัส - 5 V พบว่ากลุ่มของโฟโตนิกไดโอดที่มีชั้นรับแสง p^+ มีกระแสแสงสูงกว่ากลุ่มของโฟโตนิกไดโอดที่มีชั้นรับแสง n^+ ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์[29] เนื่องจากแผ่นผลึกฐานรองเริ่มต้นซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกที่มีการเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเล็กน้อย จึงมี

ลักษณะเป็น i (n^- -Si) ดังนั้นชั้นรับแสงที่ดีควรจะเป็นชั้นพี มากกว่าชั้นเอ็น เพราะว่า เมื่อพิจารณาถึงรอยต่อที่เกิดขึ้นทั้งสอง คือรอยต่อ $p^- - n^-$ และรอยต่อ $n^- - n^-$ พบว่ารอยต่อ $p^- - n^-$ มีลักษณะเป็นแบบชันบันได (abrupt junction) คือมีความกว้างของชั้นปลอดพาหะขยายเข้าไปในชั้น i หรือชั้น n^- ได้มาก เนื่องจากมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือต่างกันมาก ในขณะที่รอยต่อ $n^- - n^-$ มีความกว้างของชั้นปลอดพาหะแคบ เพราะมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือต่างกันน้อย สนามไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อนี้ จึงมีค่าน้อย ดังนั้นจึงเป็นเหตุผลที่ทำให้ชั้น p^- เป็นชั้นรับแสงได้ดีกว่าชั้นรับแสง n^- และกระแสแสง (Photocurrent) จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงอย่างเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.18



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.19 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ภายในบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ $p^- - n^-$ และ $n^- - n^-$

(ก) ชั้นรับแสง p^-

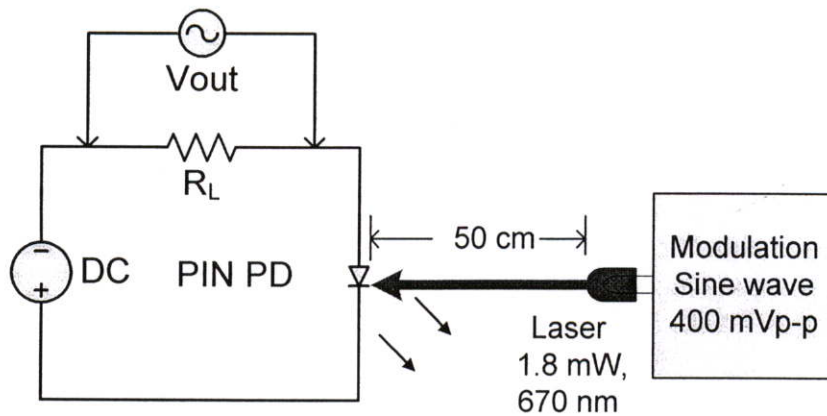
(ข) ชั้นรับแสง n^-

จากรูปที่ 4.19 แสดงลักษณะของบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นกับรอยต่อ $p^- - n^-$ และรอยต่อ $n^- - n^-$ รอยต่อ $p^- - n^-$ ทำเป็นชั้นรับแสงจะทำให้เกิดกระแสแสงได้มากกว่ารอยต่อ $n^- - n^-$

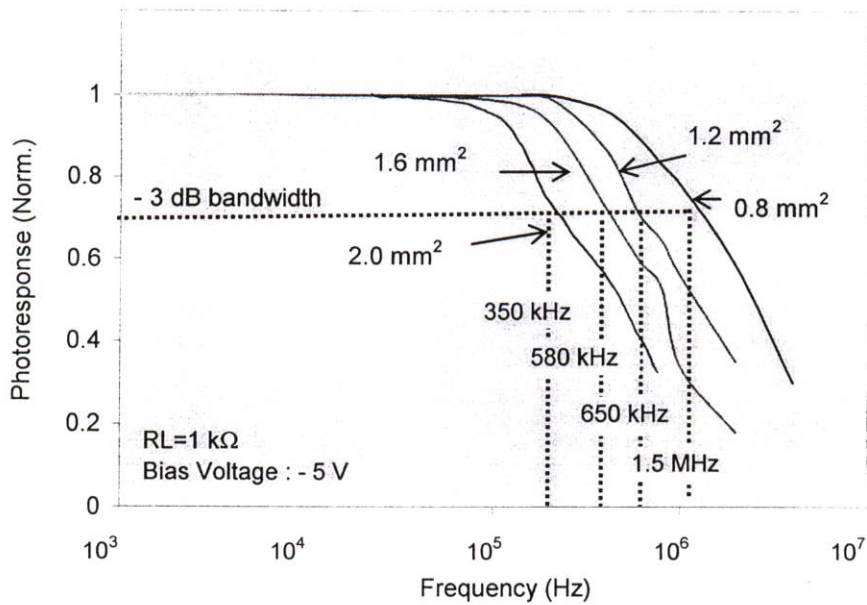
4.2.3 การตอบสนองทางความถี่

คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณแสงทางความถี่ของโฟโตไดโอด วัดได้โดยใช้สัญญาณคลื่นรูปไซน์ขนาด 400 mVp-p ที่ความถี่ค่าต่างๆ มอดูเลท (Modulation) กับคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm ซึ่งเป็นคลื่นพาหะ โดยที่โฟโตไดโอดจะถูกต่ออนุกรมกับแหล่งจ่ายไฟตรงและความต้านทานโหลด (R_L) ดังแสดงในรูปที่ 4.10 ทำการวัดสัญญาณที่ตกคร่อมโหลด ที่ความถี่ต่างๆ ออกมาในรูปของแรงดันเอาต์พุต แล้วนำค่าที่ได้ทำการนอร์มอลไรซ์ (normalize) เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่

จากผลการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รับแสง p^+ ค่าต่างๆ 0.8 mm², 1.2 mm², 1.6 mm² และ 2.0 mm² พบว่าโฟโตไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รับแสงเล็กที่สุด 0.8 mm² จะได้แบนด์วิดท์สูงที่สุด 1.5 MHz และขนาดพื้นที่ส่วน p^+ ใหญ่ที่สุด 2.0 mm² จะได้แบนด์วิดท์ต่ำที่สุด 350 kHz ดังในรูปที่ 4.11 ทั้งนี้เนื่องจากว่าการตอบสนองทางความถี่ ในโฟโตไดโอดจะขึ้นอยู่กับสาเหตุหลัก 2 ประการ คือ เวลาส่งผ่าน (Transit time) และค่าคงที่เวลา CR (CR-Time constant)[3] ซึ่งในกรณีนี้เกิดจากค่าคงที่เวลา CR มีขนาดเพิ่มขึ้น เมื่อไดโอดมีพื้นที่รับแสงหรือพื้นที่ของรอยต่อมากขึ้น



รูปที่ 4.20 ลักษณะของวงจรการทดลองการตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 4.21 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณแสงทางความถี่ของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์

ค่าเวลาคงที่ CR ในพินโฟโตไดโอด จะมีค่าสูง ถ้าชั้นปลอดพาหะขยายไม่เต็มชั้น i ซึ่งจะทำให้เกิดความต้านทานสูงภายในชั้น i นี้ด้วย อีกทั้งชั้นปลอดพาหะที่แคบยังทำให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าสูง

จากผลการทดลองในโครงสร้างรูปแบบที่หนึ่ง ได้ศึกษาความลึกของรอยต่อ (x_j) ด้านรับแสง ศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพ พื้นที่รับแสง p^+ พื้นที่รับแสง i และพื้นที่รับแสง n^+ ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และการตอบสนองทางความถี่ ทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

ความลึกของรอยต่อด้านรับแสง ควรมีระยะความลึกที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นแสงที่ตกกระทบ เนื่องจากแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นจะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อซิลิคอนได้น้อย ต่างจากแสงที่มีความยาวคลื่นยาว จะสามารถทะลุผ่านเข้าไปในเนื้อได้มาก ซึ่งจากผลการทดลองแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ที่ความลึกของรอยต่อ $0.66 \mu\text{m}$ ได้กระแสแสงสูงที่สุด

พื้นที่รับแสง p^+ จากการเปลี่ยนขนาดค่าต่างๆ 0.8 mm^2 , 1.2 mm^2 , 1.6 mm^2 และ 2.0 mm^2 พบว่ากระแสมืดและกระแสแสงเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นกับพื้นที่รับแสงอย่างเชิงเส้น นอกจากนี้ยังมีผลต่อการตอบสนองทางความถี่อีกด้วย กล่าวคือ ขนาดของพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้แบนด์วิดท์ ลดลง เนื่องจากความจุไฟฟ้าแปรผันโดยตรงกับขนาดของพื้นที่รอยต่อ ทำให้ค่าคงที่ CR เพิ่มขึ้น

พื้นที่ i เป็นชั้นรับแสง และมีขนาด 100 μm , 200 μm , 400 μm และ 600 μm จากผลการทดลอง พบว่าความกว้างของชั้น i มีผลต่อกระแสมีค่น้อย แต่อย่างไรก็ตาม ความกว้างของชั้น i ส่งผลให้เกิดกระแสมีค่นเพิ่มขึ้น ซึ่งกระแสมีค่นสามารถพิจารณาได้หลายชนิด เช่น กระแสมีค่นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสาร (bulk) และกระแสมีค่นที่เกิดขึ้นระหว่างผิวซิลิคอนกับซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งกระแสมีค่นที่เกิดขึ้นระหว่างผิวซิลิคอนกับซิลิคอนไดออกไซด์นี้ จะส่งผลทำให้เกิดกระแสมีค่นเพิ่มขึ้น กรณีที่ความกว้างของชั้น i มีขนาดมากขึ้นนั่นเอง ส่วนกระแสมีค่นที่เกิดขึ้นภายในเนื้อสารพิจารณาว่าเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากในชั้น i มีความบริสุทธิ์สูง กระแสแสงมีลักษณะไม่เปลี่ยนแปลงกับขนาดของชั้น i ที่เพิ่มขึ้น เพราะว่ากระแสแสงส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งชั้น i ทำหน้าที่เป็นชั้นรับแสง และมีขนาดที่กว้างขึ้น ในขณะที่บริเวณปลอดพาหะมีค่าประมาณเท่าเดิม ในกรณีที่ได้รับแรงดันไบอัสคงที่ ดังนั้นชั้น i จึงไม่เหมาะสำหรับเป็นชั้นรับแสง

ชั้นรับแสง n^+ มีลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และการตอบสนองทางความถี่ เช่นเดียวกับชั้นรับแสง p^+ คือ มีกระแสมีค่นและกระแสแสงเพิ่มขึ้นตาม พื้นที่ของรอยต่อรับแสงในลักษณะเดียวกัน แต่อย่างไรก็ตาม กระแสแสงที่เกิดจากชั้นรับแสง n^+ มีค่าน้อยกว่าชั้นรับแสง p^+ เนื่องจากการเกิดรอยต่อทั้งสองต่างกัน คือรอยต่อ $p^- - i$ หรือ $p^- - n^-$ ทำให้รอยต่อเป็นแบบชันบันได การดูดกลืนแสงได้ดี ต่างจากรอยต่อ $n^+ - i$ หรือ $n^+ - n^-$ รอยต่อมีลักษณะลาดเอียง ทำให้การดูดกลืนแสงในชั้นนี้ได้ไม่ดี ดังนั้นการเลือกชั้นรับแสงเป็นพีหรือเอ็นควรพิจารณาถึงการเกิดรอยต่อที่วุ่นวาย

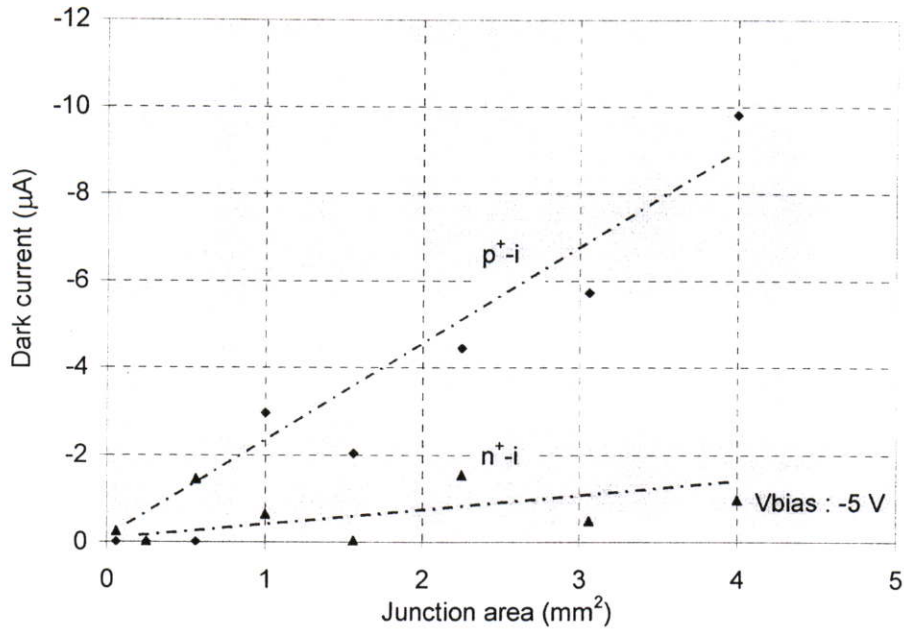
จากผลการทดลองหาพื้นที่ไวแสงประสิทธิผล ในพื้นที่ต่างๆ พื้นที่รับแสง p^+ พื้นที่รับแสง i และพื้นที่รับแสง n^+ สรุปได้ว่าชั้นรับแสง p^+ ทำเป็นชั้นรับแสงเหมาะสมที่สุด

4.3 โครงสร้าง p-i-n แบบพลาแนร์ รูปแบบที่สอง

การทดลองในหัวข้อนี้มีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ออกเป็น 4 ลักษณะด้วยกัน คือ พื้นที่รับแสง (active area) ลวดลายขั้วโลหะด้านรับแสง และโครงสร้างมี Guard ring (p^+ ring) ดังต่อไปนี้

4.3.1 พื้นที่รับแสง (active area)

ผลการทดลองของพื้นที่รับแสงที่มีขนาดต่างกัน 8 ขนาด คือ 0.06 mm^2 , 0.25 mm^2 , 0.56 mm^2 , 1.00 mm^2 , 1.56 mm^2 , 2.25 mm^2 , 3.06 mm^2 และ 4.00 mm^2 โดยมีขนาด i และขนาดเอ็น คงที่ที่ 40 μm และ 200 μm ตามลำดับ

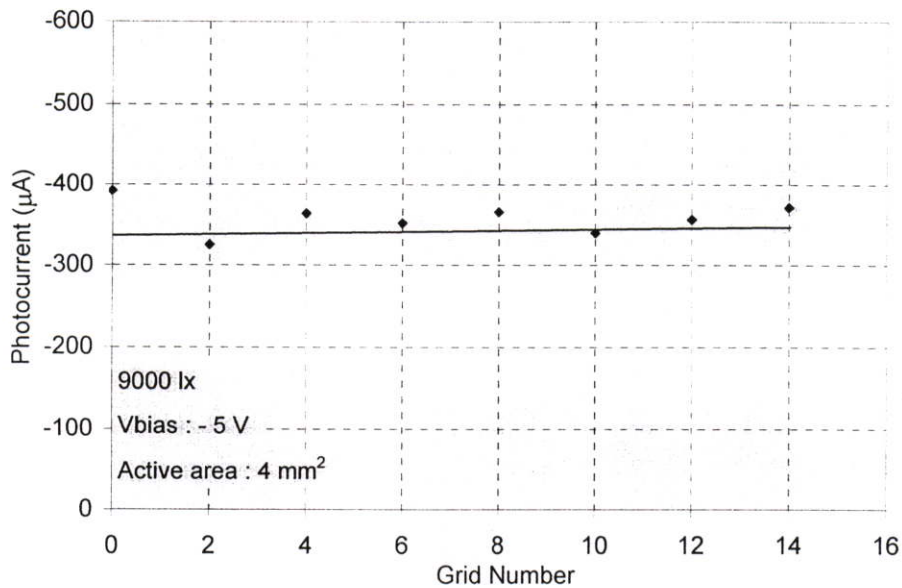


รูปที่ 4.22 ลักษณะของกระแสมืดและพื้นที่รอยต่อ ขณะไม่ได้รับแสง

จากผลการทดลองเปรียบเทียบกระแสมืดระหว่างโฟโตไดโอด ชุดที่ 1 (p⁺ active area) และชุดที่ 2 (n⁺ active area) ที่มีชั้นรับแสงเป็น p⁺ และชั้นรับแสงเป็น n⁺ ตามลำดับ พบว่ากระแสมืดเกิดจากชั้นรับแสง p⁺ หรือรอยต่อ p⁺-i มากกว่า ชั้นรับแสงเป็น n⁺ หรือรอยต่อ n⁺-i เนื่องจากกระแสมืดส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นเมื่อพิจารณาบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ p⁺-i พบว่ามีบริเวณปลอดพาหะที่กว้างมากหรือมีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะมากกว่าของรอยต่อ n⁺-i จึงทำให้เกิดกระแสมืดสูงกว่า และกระแสมืดมีลักษณะสูงขึ้นเมื่อมีพื้นที่รอยต่อมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4.22

4.3.2 ผลการทดลองของสวดลายขั้วโลหะด้านรับแสง

จากการทดลองสวดลายขั้วโลหะให้มีลักษณะต่างกัน 8 แบบ ตามจำนวนเส้นกริดที่เพิ่มขึ้น คือ เริ่มตั้งแต่ไม่มีเส้นกริดตรงกลางของพื้นที่รับแสง และมีจำนวนเส้นกริดเพิ่มขึ้น 2 กริด, 4 กริด, 6 กริด, 8 กริด, 10 กริด, 12 กริด และ 14 กริด ดังแสดงในรูปที่ 3.12 โดยแต่ละแบบนี้ถูกกำหนดให้มีพื้นที่รับแสงเท่ากับ 4 mm²



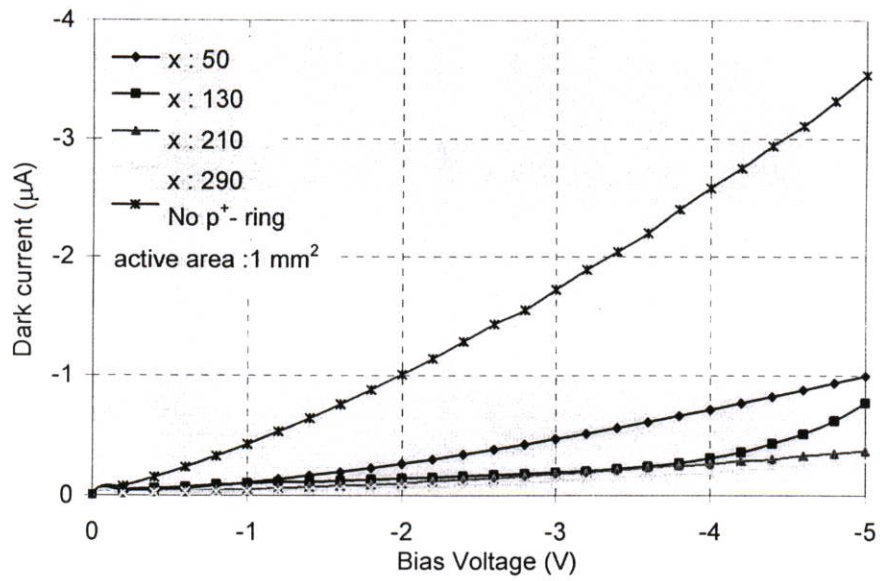
รูปที่ 4.23 ลักษณะของกระแสแสงและจำนวนเส้นกริด

ผลการทดลองในรูปที่ 4.23 แสดงลักษณะของกระแสแสงและจำนวนเส้นกริด โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่แรงดันไบอัส -5 V ความเข้มแสง 9000 lx มีกระแสแสงอยู่ในช่วง 350 µA จะเห็นได้ว่าจำนวนเส้นกริดที่เพิ่มขึ้น มีผลต่อการเกิดของกระแสแสงน้อยมากหรือมีแนวโน้มคงที่ เมื่อเทียบกับพื้นที่รับแสงและแรงดันไบอัสเปลี่ยนแปลงในหัวข้อที่ผ่านมา เหตุผลเพราะว่าโฟโอดีโอดมีขนาดของพื้นที่รับแสงที่น้อยอยู่แล้ว ดังนั้นจำนวนเส้นกริดที่เพิ่มขึ้น จึงมีผลต่อปริมาณการเกิดกระแสแสงน้อยนั่นเอง

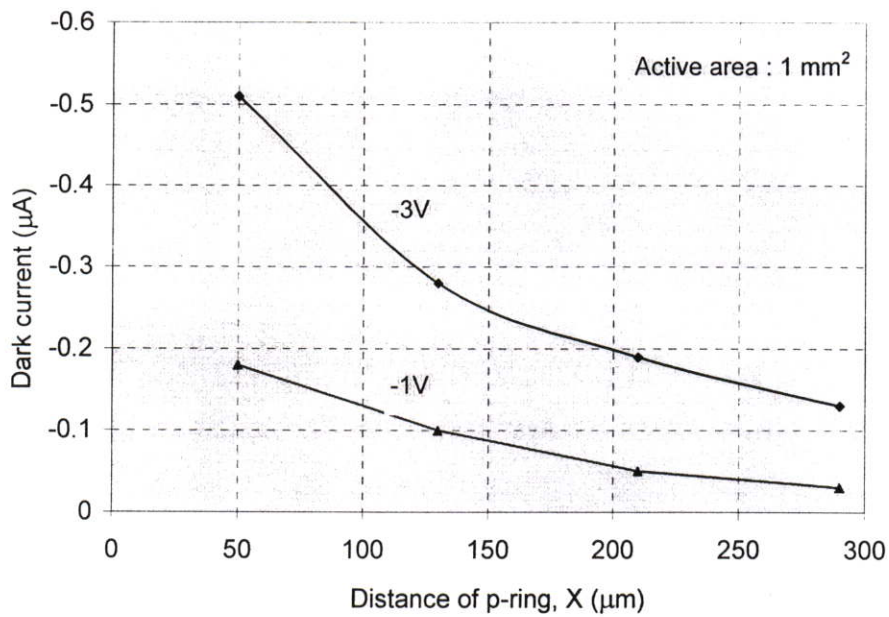
4.3.3 ผลการทดลองของโครงสร้าง Guard ring

การทดลองลักษณะของ Guard ring หรือ p^+ ring แสดงลวดลายต้นแบบได้ดังในรูปที่ 3.13 และรูปที่ 3.14 โดยกำหนดให้ระยะห่างของ p^+ ring หรือขนาด x ห่างจากพื้นที่รับแสงต่างกัน 4 ค่า คือ 50 µm, 130 µm, 210 µm และ 290 µm

จากการทดลองผลของการ์ดริง (p^+ ring) พบว่าสามารถลดกระแสมืดหรือกระแสรั่วที่เกิดขึ้นบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Si/SiO₂ interface leakage) ของโฟโอดีโอดแบบพลาสมาได้เป็นอย่างดี เมื่อเปรียบเทียบกับไดโอดที่ไม่มีการ์ดริง (No p^+ ring) ดังแสดงในรูปที่ 4.24

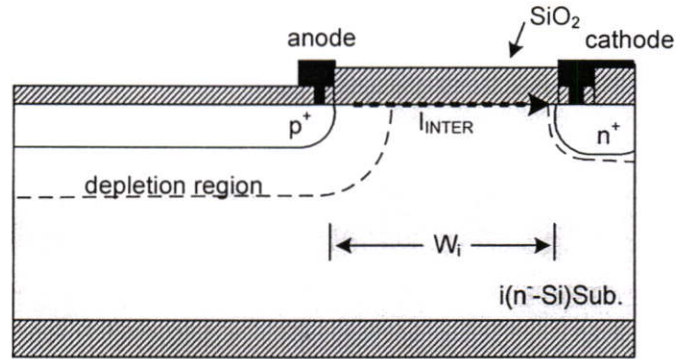


รูปที่ 4.24 ลักษณะของกระแสมืดและแรงดันไบอัสย้อนกลับของโฟโตไดโอดที่มีชั้นการโด๊ป p^+ ล้อมรอบและอยู่ห่างจากชั้นรับแสงเป็นระยะต่างๆ

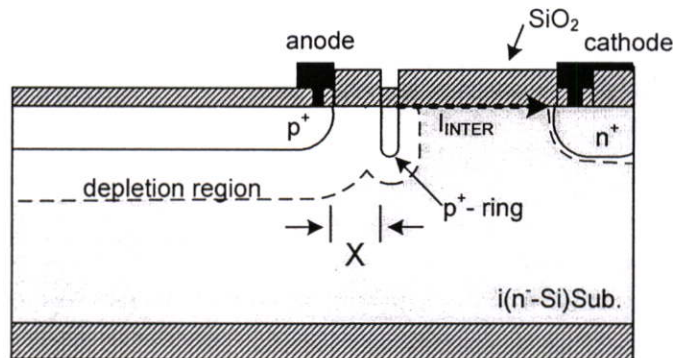


รูปที่ 4.25 ลักษณะของกระแสมืดและระยะห่างของ p^+ ring ที่แรงดันไบอัส -1 V และ -3 V

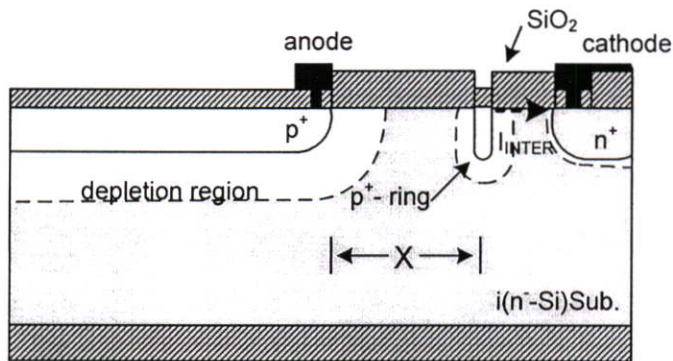
การทดลองในรูปที่ 4.25 แสดงลักษณะของกระแสมืดและระยะห่างของ p^+ -ring ที่แรงดันไบอัส -1 V และ -5 V ระยะห่างของ p^+ -ring จากพื้นที่รับแสงเท่ากับ $50 \mu\text{m}$ มีกระแสมืด $0.18 \mu\text{A}$ และ $0.89 \mu\text{A}$ ตามลำดับ กระแสมืดเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัส และมีแนวโน้มลดลงเมื่อ p^+ -ring มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับชั้น n^+



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 4.26 ลักษณะของการเกิดกระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์

- (ก) เกิดกระแสรั่วสูง ขณะไม่มี p^+ -ring
- (ข) กระแสรั่วลดลง เมื่อมี p^+ -ring
- (ค) กระแสรั่วต่ำสุด เมื่อ p^+ -ring เข้าใกล้ ชั้น n^+

จากรูปที่ 4.26 (ก) แสดงลักษณะของการเกิดกระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Si/SiO_2 interface leakage, I_{INTER}) [23] ที่อยู่ระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ ซึ่งกระแสรั่วนี้มีสาเหตุมาจากอะตอมแปลกปลอมต่างๆ ที่เกิดขึ้นระหว่างรอยสัมผัสนี้ รวมถึงชั้นออกไซด์มักจะมีประจุบวกอยู่ ซึ่งประจุบวกนี้จะดึงอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็น channel เล็กๆ และเกิดเป็นช่องทางเดินกระแสที่ไม่ต้องการได้ ในขณะที่ไดโอดมีกัริง (p⁺- ring) ล้อมรอบระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ กัริงจะทำหน้าที่เป็นตัวกักจับอิเล็กตรอน และทำให้กระแสรั่วชนิดนี้ลดน้อยลง ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ข) และเมื่อตำแหน่งของกัริงมีขนาด x เพิ่มขึ้น หรือมีตำแหน่งใกล้ชั้น n^+ ดังแสดงในรูปที่ 4.26 (ค) กระแสรั่วชนิดนี้จะมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากพื้นที่ที่จะทำให้เกิดกระแสรั่วชนิดนี้มีขนาดน้อยลงนั่นเอง

นอกจากนี้ผลของกัริง (p⁺- ring) ที่ถูกสร้างกับไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ โดยมีระยะห่างของ p⁺- ring หรือขนาด x ห่างจากพื้นที่รับแสง n^+ ต่างกัน 4 ค่า คือ 50 μm , 130 μm , 210 μm และ 290 μm ผลปรากฏว่าขนาด x น้อยที่สุด 50 μm จะได้กระแสมืดต่ำที่สุด ในขณะที่ขนาด x มากที่สุด 290 μm มีกระแสมืดสูงที่สุด กระแสมืดมีแนวโน้มลดลง เมื่อ p⁺- ring อยู่ใกล้กับชั้น n^+ เช่นเดียวกัน จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงลักษณะของการเกิดกระแสมืดหรือกระแสรั่วชนิดนี้ โดยกัริง (p⁺- ring) สามารถป้องกันการเกิดกระแสรั่วชนิดนี้ได้เป็นอย่างดีเมื่ออยู่ใกล้กับชั้น n^+

จากผลการทดลองในโครงสร้างรูปแบบที่สอง ได้ศึกษาลักษณะของลวดลายขั้วโลหะด้านรับแสง และ ลักษณะของกัริง ได้ข้อสรุปดังนี้

ลักษณะของลวดลายขั้วโลหะด้านรับแสง ที่มีขนาดของเส้นกริดต่างกัน 8 ขนาด คือ ไม่มีเส้นกริดตรงกลาง (0 กริด), 2 กริด, 4 กริด, 6 กริด, 8 กริด, 10 กริด, 12 กริด และ 14 กริด พบว่ามีผลต่อการเกิดกระแสแสงได้น้อยมาก เนื่องจากไดโอดมีขนาดของพื้นที่รับแสงน้อยอยู่แล้ว ดังนั้นการเพิ่มจำนวนเส้นกริด จึงมีผลต่อกระแสแสงน้อย แต่อย่างไรก็ตาม จำนวนกริดที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยให้ไดโอดมีความไวต่อแสงได้ดี (sensitivity)

ลักษณะของกัริง (p⁺- ring) ที่อยู่รอบๆ ระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ สามารถลดกระแสรั่วที่ผิวระหว่างซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ของไดโอดแบบพลาแนร์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่าลักษณะของกัริง (p⁺- ring) ที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับชั้น n^+ สามารถลดกระแสรั่วได้ดีที่สุด

4.4 พอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

4.4.1 การทดลองสร้างพอร์สซิลิกอน

การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนแบบวิธีกัดข้อมล (Stain etching) สามารถสร้างได้ด้วยเงื่อนไขหลายแบบ เช่น การกระตุ้นด้วยแสง ระบบอัลตราโซนิค อุณหภูมิ การเติมเอทานอล (ethanol) ลงในสารละลาย และเวลา เป็นต้น [10]

การกระตุ้นด้วยแสงจากหลอดทั้งสแตนที่มีความเข้มสูง จะช่วยให้เกิดพอร์สซิลิกอนที่สม่ำเสมอและเร็วขึ้น

ระบบอัลตราโซนิค ส่งผลต่อเวลาการเหนี่ยวนำในการเกิดพอร์สซิลิกอน

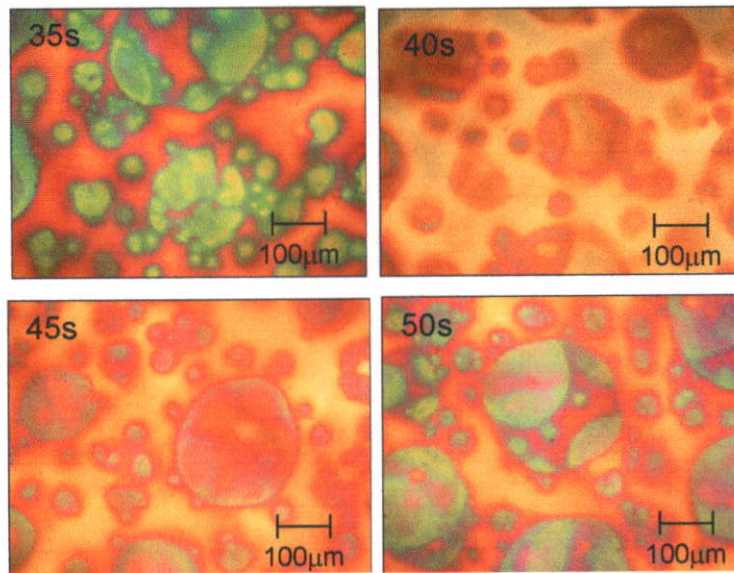
อุณหภูมิ จะมีผลต่อเวลากัดเซาะ (Etching time) อุณหภูมิต่ำ (<10°C) จะทำให้การกัดเซาะด้านข้างน้อยเกิดรูพรุนเล็ก ส่วนอุณหภูมิสูง (>10°C) จะทำให้การกัดเซาะด้านข้างสูงเกิดรูพรุนกว้าง [26] และอุณหภูมิที่ต่ำยังให้คุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ดีกว่าอุณหภูมิที่สูง

การเติมเอทานอล (Ethanol) ลงในสารละลาย จะทำให้มีความสม่ำเสมอ (uniformity) เนื่องจากไปลดแรงดึงผิวของน้ำ

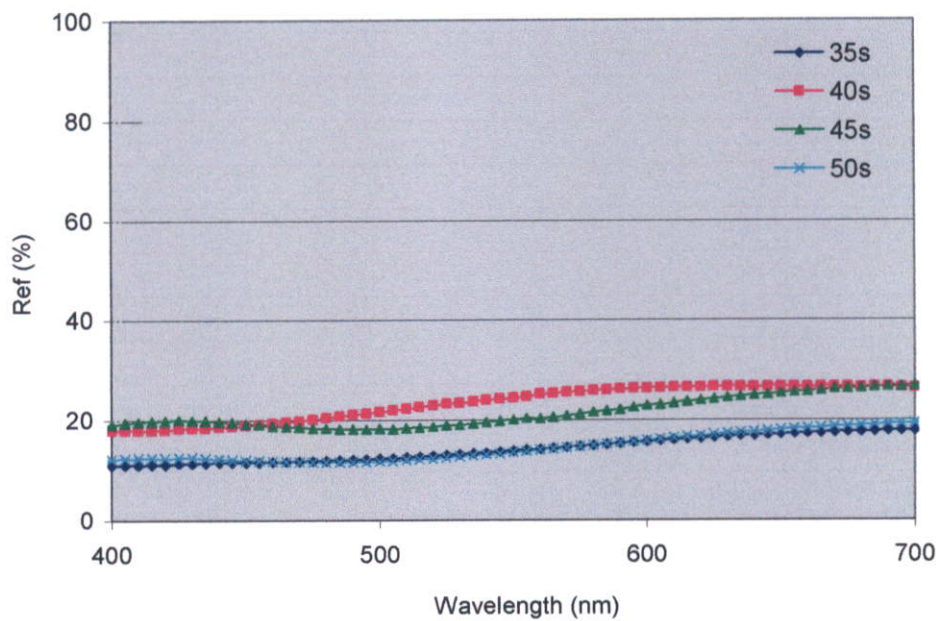
เวลา มีผลต่อความพรุน เวลานานจะทำให้เกิดความพรุนสูง ซึ่งช่วงเวลาที่เหมาะสมทำการกัดข้อมลควรจะอยู่ในช่วงเวลาประมาณ 40 - 120 วินาที

ในการทดลองนี้ ได้สร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยเงื่อนไขที่ง่ายและไม่ยุ่งยาก โดยการกระตุ้นให้เกิดพอร์สซิลิกอนได้เร็วและมีความสม่ำเสมอ ด้วยการเติมเอทานอล (Ethanol) ลงในสารละลาย และมีการกำหนดที่เวลาต่างๆ

เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติของพอร์สซิลิกอน ได้ทำการทดลองสร้างบนแผ่นมอนิเตอร์ โดยได้ทำการแบ่งออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือชนิด p^+ และชุดที่เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือชนิด n^+ แผ่นผลึกฐานรองเริ่มต้นเป็นชนิดอินทรินซิกสภาพต้านทานสูง 2000 $\Omega \cdot \text{cm}$ ระบาย (111) ทำการแพร่สารเจือโบรอนและฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิเดียวกัน 1100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 50 นาที จากนั้นนำไปเคลือบอะลูมิเนียมด้วยการระเหยอะลูมิเนียมในสุญญากาศ และซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้ได้ซิลิกอนอัลลอยด์ (Al/Si alloy) ที่อุณหภูมิ 480 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที ทำการจุ่มแผ่นผลึกซิลิกอน (monitoring wafer) ลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF : 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ : 60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 และเติมเอทานอล (ethanol) ปริมาตร 0.25 ลูกบาศก์เซนติเมตร (เอทานอล 10 หยด) ต่อปริมาณของสารละลาย 90 ลูกบาศก์เซนติเมตร มีการเพาะบ่มสารละลายก่อนทำการกัด 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง 20 องศาเซลเซียส โดยกำหนดเงื่อนไขในการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนที่เวลาต่างๆ กัน คือ 35 วินาที 40 วินาที 45 วินาที และ 50 วินาที



รูปที่ 4.27 ภาพถ่ายลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ถ่ายจากกล้องไมโครสโคป ที่เวลาต่างๆ 35 วินาที 40 วินาที 45 วินาที และ 45 วินาที



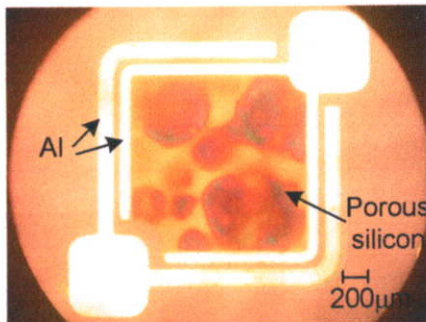
รูปที่ 4.28 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์สซิลิคอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ จากการกักข้อมสี ที่เวลาต่างๆ กัน

จากผลการทดลองสังเกตการเกิดพอร์สซิลิคอนจากเงื่อนไขดังกล่าว ทั้งสองชนิดที่สร้างบนชั้น p^+ และชั้น n^+ พบว่าเวลาที่เริ่มเกิดฟองประมาณ 10 วินาที เวลาในการเกิดพอร์สซิลิคอนเท่าๆ กัน และลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอน ที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 4.27 ซึ่งเมื่อ

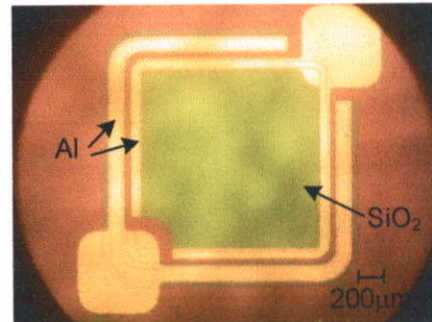
นำไปวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซิลิคอน พบว่ามีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำ และมีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วงประมาณ 10-30% ดังแสดงในรูปที่ 4.28

4.4.2 การทดลองสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนบนไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+

เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของกลุ่มโฟโต้ไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ และมีชั้นพอร์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ได้ทำการทดลองกับไดโอดที่มีขนาด ต่างกัน 8 ขนาด คือ 0.06 mm^2 , 0.25 mm^2 , 0.56 mm^2 , 1.00 mm^2 , 1.56 mm^2 , 2.25 mm^2 , 3.06 mm^2 และ 4.00 mm^2 ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.13 เวลาที่ใช้ในการกัดพอร์ซิลิคอน 45 วินาที ลักษณะของชั้นพอร์ซิลิคอนบนโฟโต้ไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.29 (ก) เปรียบเทียบกับโฟโต้ไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังในรูปที่ 2.29 (ข)



(ก)

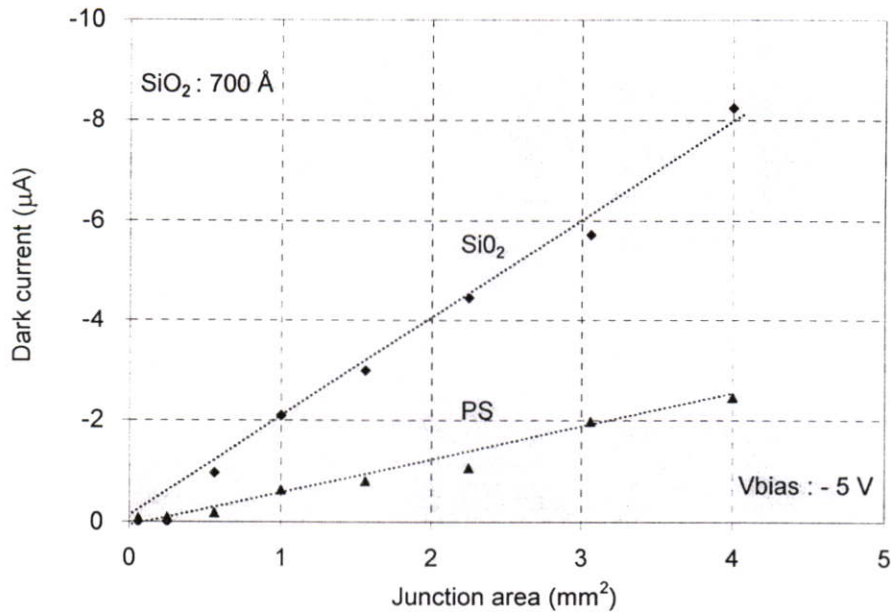


(ข)

รูปที่ 4.29 ภาพถ่ายจากกล้องไมโครสโคป

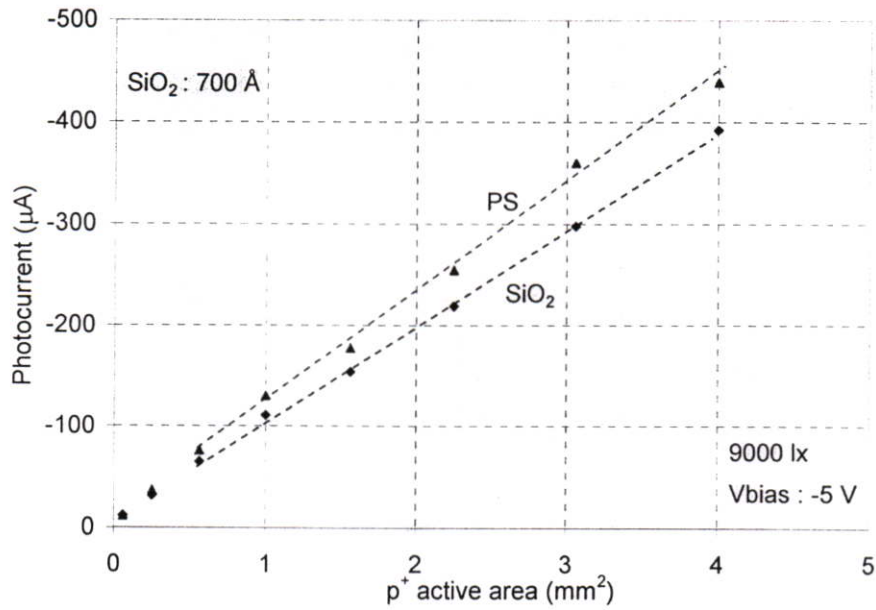
(ก) โฟโต้ไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

(ข) โฟโต้ไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

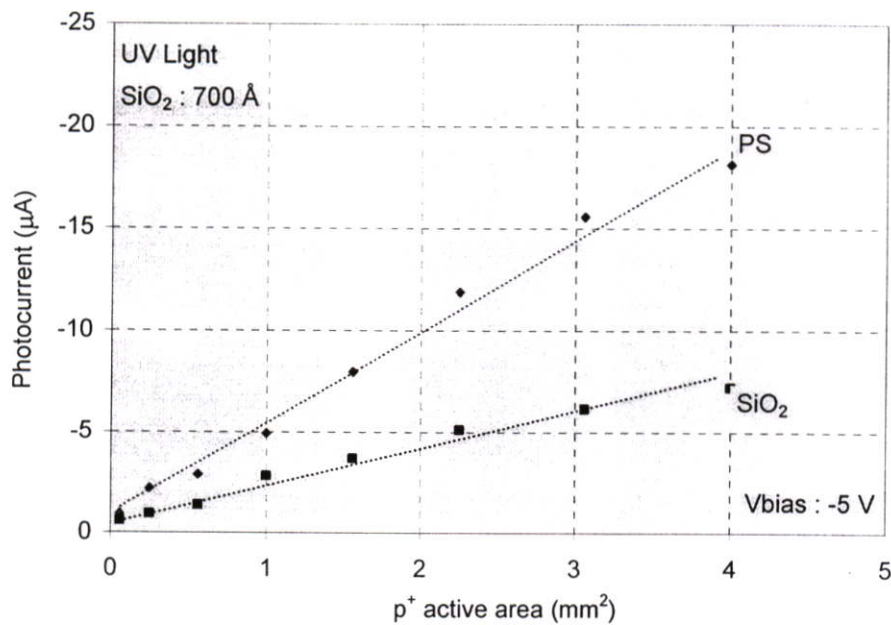


รูปที่ 4.30 ลักษณะของกระแสมืดและพื้นที่รอยต่อ ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นซิลิกอนไดออกไซด์และพอร์สซิลิกอน ขณะไม่ได้รับแสง

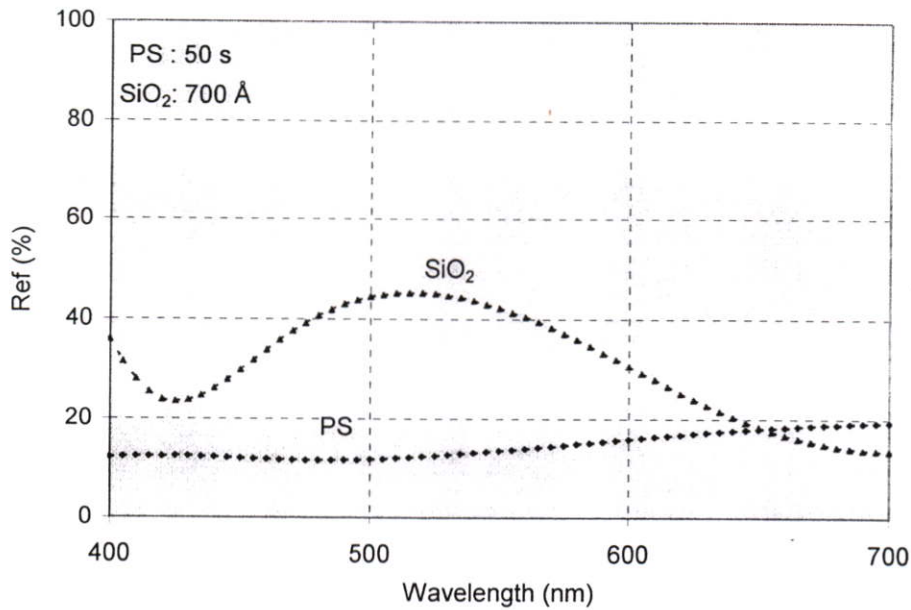
ผลการทดลองรูปที่ 4.30 แสดงลักษณะของกระแสมืดและพื้นที่รอยต่อ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มของไดโอดที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และกลุ่มของไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิกอน (PS) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง กระแสมืดเพิ่มขึ้นกับพื้นที่รอยต่อ และพบว่ากลุ่มของไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีกระแสมืดน้อยกว่ากลุ่มของไดโอดที่มีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ อย่างเห็นได้ชัด กระแสมืดหรือกระแสรั่วในโฟโตนิกไดโอดเกิดขึ้นได้หลายชนิด และส่วนใหญ่เกิดจากกระแสรั่วชนิดการเกิดและการรวมตัว (generation-recombination current) และกระแสรั่วชนิดแพร่ (diffusion current) ซึ่งกระแสรั่วชนิดการเกิดและการรวมตัว จะเกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะ ส่วนกระแสรั่วชนิดแพร่นั้น เกิดจากพาหะส่วนน้อย (minority carrier) คืออิเล็กตรอนและโฮลในชั้นพีและชั้นเอ็น ตามลำดับ จะแพร่ข้ามชั้นปลอดพาหะกลายเป็นกระแสรั่วเกิดขึ้นในวงจร ดังนั้นกรณีจากผลการทดลองนี้ พิจารณาจากกระแสรั่วชนิดแพร่ และกระแสรั่วชนิดนี้จะลดลง เนื่องจากการสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนทำให้มีลักษณะเป็นรูพรุนเข้าไปในเนื้อซิลิกอน และมีแถบช่องว่างพลังงานกว้างมากกว่าซิลิกอนลักษณะเช่นนี้จะช่วยลดกระแสรั่วที่เกิดจากการแพร่ได้



รูปที่ 4.31 ลักษณะของกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของไดโอด ที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ เปรียบเทียบระหว่างกลุ่มไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน (PS) และกลุ่มไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ขณะได้รับแสงฮาโลเจน



รูปที่ 4.32 ลักษณะของกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของไดโอด ที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ เปรียบเทียบระหว่างกลุ่มไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน (PS) และกลุ่มไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ขณะได้รับแสงอัลตราไวโอเล็ต



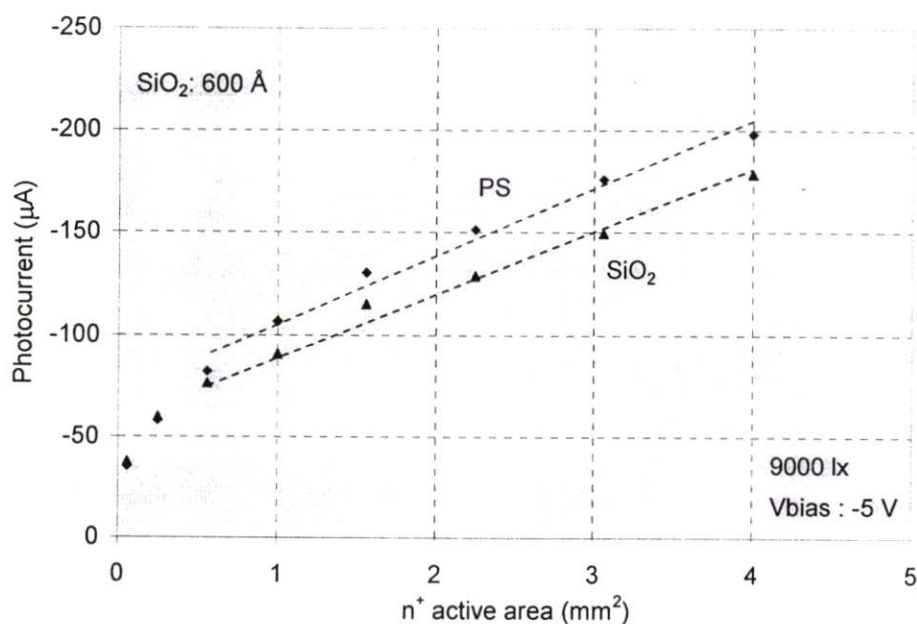
รูปที่ 4.33 คุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอร์ซซิลิคอน (PS) และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์(SiO_2) ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

กลุ่มของไดโอดที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอน (PS) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เมื่อนำไปตรวจจับความเข้มแสงที่ได้จากหลอดฮาโลเจน ความเข้มแสง 9000 lx แรงดันไบอัส -5 V โดยทำการวัดเปรียบเทียบกับกลุ่มของไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงพบว่ากลุ่มของไดโอดที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสามารถตรวจจับกระแสแสงได้มากกว่ากลุ่มของไดโอดที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 10-30% ดังแสดงในรูปที่ 4.31 เหตุผลเพราะว่าชั้นพอร์ซซิลิคอนช่วยลดการสะท้อนแสงได้ดีกว่าชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ในช่วงความยาวคลื่นแสงที่ต่ำกว่า 650 nm ดังแสดงในรูปที่ 4.33 ซึ่งอยู่ในช่วงของความยาวคลื่นแสงที่ได้จากหลอดฮาโลเจน

เมื่อนำกลุ่มของไดโอดทั้งสองกลุ่มนี้ไปทำการทดลองตรวจจับแสงอัลตราไวโอเล็ตพบว่ากระแสแสงมีลักษณะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่รับแสง p^+ เช่นเดียวกับการตรวจจับแสงที่ได้จากหลอดฮาโลเจน ที่สำคัญไปกว่านั้น ยังพบว่า กลุ่มของไดโอดที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสามารถเพิ่มกระแสแสงได้มากกว่า 100% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มของไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.32 เนื่องจากชั้นพอร์ซซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่ต่ำในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ อีกทั้งยังเป็นชั้นที่มีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนหรือดักจับแสง (light trapping) ได้ดีอีกด้วย[31]

4.4.3 การทดลองสร้างชั้นพอร์ซซลิคอนบนไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+

เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางแสงของโฟโอดีไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ และมีชั้นพอร์ซซลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ได้ทำการทดลองกับไดโอดที่มีขนาดต่างกัน 8 ขนาด คือ 0.06 mm^2 , 0.25 mm^2 , 0.56 mm^2 , 1.00 mm^2 , 1.56 mm^2 , 2.25 mm^2 , 3.06 mm^2 และ 4.00 mm^2 ตามที่ได้ออกแบบไว้ในหัวข้อ 3.13 เวลาที่ใช้ในการกัดพอร์ซซลิคอน 45 วินาที และนำผลจากการสร้างพอร์ซซลิคอนบนไดโอด มาวัดลักษณะสมบัติทางแสงเปรียบเทียบกับไดโอดที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงเป็นชั้นซลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 700 อังสตรอม



รูปที่ 4.34 ลักษณะของกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของไดโอด ที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ เปรียบเทียบระหว่างชั้นพอร์ซซลิคอน (PS) และชั้นซลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂)

ผลการทดลองในรูปที่ 4.34 แสดงลักษณะของกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ กระแสแสงเพิ่มขึ้นกับพื้นที่รับแสง n^+ และไดโอดที่ถูกสร้างชั้นพอร์ซซลิคอน (PS) บนชั้นพื้นที่รับแสง n^+ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง สามารถเพิ่มกระแสแสงได้เช่นเดียวกับ ไดโอดที่ถูกสร้างชั้นพอร์ซซลิคอนบนชั้นพื้นที่รับแสง p^+ อย่างไรก็ตาม ไดโอดที่สร้างชั้นรับแสงเป็น n^+ ก็ยังให้กระแสแสงที่น้อยกว่าไดโอดที่สร้างชั้นรับแสงเป็น p^+

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

งานวิจัยที่ได้นำเสนอเป็นการพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิดนี้เป็นที่นิยมนำไปใช้ในงานต่างๆ อย่างมากมาย เช่น เป็นตัวตรวจจับในระบบสื่อสารด้วยแสงยุคใหม่ ในระบบเครื่องมือแพทย์ ในระบบทางการแพทย์ เป็นต้น เพราะว่ามีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีกระแสรั่วหรือกระแสรั่วต่ำ (low leakage current) มีความไวในการทำงานสูง (high sensitivity) และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูง (high breakdown voltage) จึงทำให้ไดโอดชนิดนี้เป็นที่สนใจที่จะนำมาทำการทดลองและวิจัย เพื่อเป็นแนวทางการศึกษาและพัฒนาให้ดียิ่งขึ้นต่อไป

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบและกระบวนการสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ รวมทั้งการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และการตอบสนองทางความถี่ ในการศึกษาการออกแบบ ได้แบ่งการออกแบบออกเป็น 2 ลักษณะด้วยกัน คือ โครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ รูปแบบที่หนึ่ง และโครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ รูปแบบที่สอง ในโครงสร้างรูปแบบที่หนึ่ง เป็นการศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพ โดยมีการกำหนดขนาดของพื้นที่รอยต่อ p⁺-i พื้นที่ชั้น i และพื้นที่รอยต่อ n⁺-i ส่วนในโครงสร้างรูปแบบที่สอง เป็นการศึกษา ลักษณะของลวดลายขั้วโลหะไฟฟ้า โครงสร้างที่มีอาร์คริง รวมถึงชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงให้กับไดโอด

ผลการทดลองลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงกับโฟโตไดโอดที่สร้างได้ ในลักษณะของแรงดันและกระแส ขณะไม่ได้รับแสง พบว่าไดโอดมีกระแสรั่วต่ำประมาณ 48.1 nA/mm² และสามารถทนแรงดันย้อนกลับได้สูงถึง 150 V ซึ่งกระแสรั่วของโฟโตไดโอดจะแปรผันกับพื้นที่รอยต่อและแรงดันไบอัสย้อนกลับ โฟโตไดโอดที่มีขนาดเล็กจะมีกระแสรั่วต่ำ ในขณะที่ได้รับแสง โฟโตไดโอดมีความไวต่อแสงได้ดีมาก ที่ความเข้ม 3000 lx มีกระแสแสงประมาณ 48.1 μ A/mm²

ผลการทดลองความลึกรอยต่อ (x_j) ของชั้นรับแสง ที่ความลึกเท่ากับ 0.39 μ m, 0.49 μ m, 0.58 μ m และ 0.66 μ m มีผลต่อการเกิดกระแสเล็กน้อย แต่อย่างไรก็ตามความลึกของรอยต่อต้องให้เหมาะสมกับระยะความลึกที่แสงสามารถทะลุผ่านเข้าไปได้ ถ้าชั้นรับแสงที่มีรอยต่อลึกเกินไป จะทำให้แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นไม่สามารถทะลุเข้าไปถึงภายในบริเวณปลอดพาหะได้ ดังนั้นควรออกแบบให้ชั้นรับแสงมีรอยต่อที่พอดีกับระยะที่แสงทะลุเข้ามาได้

ผลการทดลองพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพกับโครงสร้าง p-i-n แบบพลาเนอร์ ในรูปแบบที่หนึ่ง พบว่าพื้นที่ไวแสงที่เป็นรอยต่อ p⁺-i เป็นพื้นที่ไวแสงที่ดีที่สุด เมื่อเทียบกับพื้นที่รับแสงของ

ชั้น i และพื้นที่รับแสงที่เป็นรอยต่อ $n^+ - i$ เนื่องจากพื้นที่รับแสงที่เป็นรอยต่อ $p^+ - i$ นั้น มีบริเวณปลอดพาหะที่ขยายเข้าไปในชั้น i ได้กว้าง ทำให้เกิดการดูดกลืนพลังงานแสงหรือโฟตอน ได้มาก ซึ่งกระแสแสงส่วนใหญ่ถูกผลิตภายในบริเวณชั้นนี้ โดยการดูดกลืนโฟตอนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล รอบๆ พื้นที่รอยต่อ $p^+ - i$ และพบว่าเมื่อพื้นที่รับแสงที่เป็นรอยต่อ $p^+ - i$ เพิ่มขึ้น ส่งผลให้มีกระแสแสงเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ในขณะที่ชั้น i เป็นชั้นรับแสง พบว่าเมื่อพื้นที่หรือความกว้างของชั้น i ที่เพิ่มขึ้น ไม่ทำให้เกิดกระแสแสงสูงขึ้น ในกรณีที่ให้แรงดันไบอัสคงที่ เนื่องจากพื้นที่บริเวณปลอดพาหะมีค่าประมาณเท่าเดิม ส่วนพื้นที่รับแสงที่เป็นรอยต่อ $n^+ - i$ ก็ทำให้เกิดกระแสแสงได้น้อยเช่นเดียวกัน เพราะว่าเป็นรอยต่อที่มีพื้นที่ปลอดพาหะน้อย เนื่องจากมีความหนาแน่นของอะตอมสารเจือชนิดเดียวกัน คือชั้น i หรือชั้นอินทรินซิกที่มีอะตอมสารเจือชนิดอื่นเล็กน้อย (n^-) จึงทำให้พื้นที่รอยต่อนี้ เป็นชั้นรับแสงได้ไม่ดี

ผลการทดลองลักษณะของความจุไฟฟ้าและแรงดัน ไคโอดที่สร้างได้มีความจุไฟฟ้าค่า 8.1 pF/mm^2 ที่ไบอัส -5 V ความจุไฟฟ้ามีลักษณะลดลงอย่างเอกโพเนนเชียล เมื่อให้แรงดันไบอัสสูงขึ้น ในขณะที่พื้นที่รอยต่อของไคโอดมีขนาดมากขึ้น จะทำให้ความจุไฟฟ้ามีขนาดมากขึ้นตาม ค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผันกับพื้นที่รอยต่อ และแปรผกผันกับ $|V_R|^{1/2}$ นั้นเอง

ผลของการตอบสนองทางความถี่ ไคโอดที่มีขนาดพื้นที่รับแสง p^+ ค่าต่างๆ 0.8 mm^2 1.2 mm^2 1.6 mm^2 และ 2.0 mm^2 พบว่าโพโตไคโอดมีขนาดพื้นที่รับแสงเล็กที่สุด สามารถตอบสนองสัญญาณได้สูง 1.5 MHz และแบนด์วิดท์จะลดลงเมื่อไคโอดมีขนาดใหญ่ขึ้น เนื่องจากขนาดของไคโอดมีผลต่อความจุไฟฟ้า นอกจากนี้ ความต้านทานโหลดที่เพิ่มขึ้นยังทำให้แบนด์วิดท์ลดลงอีกด้วย เพราะเกี่ยวข้องกับค่าคงที่เวลา CR โดยตรง

ผลการทดลองลักษณะของกระแสมืดใน โครงสร้างรูปแบบที่สอง โดยเปรียบเทียบกับไคโอดสองกลุ่ม ที่ถูกสร้างให้มีพื้นที่รับแสงต่างกัน เป็นชั้น p^+ และชั้น n^+ และมีพื้นที่เท่ากัน พบว่าไคโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ หรือมีรอยต่อเป็น $p^+ - i$ ทำให้เกิดกระแสมืดมากกว่าไคโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ หรือมีรอยต่อ $n^+ - i$ เนื่องจากว่ากระแสมืดส่วนใหญ่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นรอยต่อ $p^+ - i$ ซึ่งมีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะมากกว่ารอยต่อ $n^+ - i$ ก็ย่อมทำให้เกิดกระแสมืดที่สูงกว่าเป็นปกติ

ผลการทดลองลดอายุขั้วโลหะตามลักษณะจำนวนกริด ตั้งแต่ 0-14 กริด โดยกำหนดให้มีพื้นที่รับแสงเท่ากัน พบว่ามีผลต่อการเกิดกระแสแสงน้อย เนื่องจากพื้นที่รับแสงของโพโตไคโอดมีขนาดเล็ก ซึ่งมีค่า 4.0 mm^2 ดังนั้นจำนวนเส้นกริดที่เพิ่มขึ้นนั้น จึงมีผลต่อปริมาณกระแสแสงน้อย

ผลการทดลองโครงสร้างที่ไม่มีกริดจริง จะช่วยลดกระแสมืดหรือกระแสรั่วได้มาก เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างที่ไม่มีกริดจริง เนื่องจากการ์ดริงที่ถูกสร้างให้เป็น p^+ -ring จะเป็นตัวดักจับหรือเป็นตัวกั้นอะตอมแปลกปลอมที่เกิดขึ้นบริเวณผิวซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่ง

สาเหตุมาจาก ผิวไม่เรียบขรุขระ นอกจากนี้ ระยะหรือตำแหน่งของจุด p^+ -ring ยังส่งผลให้ กระแสมีเกิดการเปลี่ยนแปลงอีกด้วย กล่าวคือ ตำแหน่งที่จุด p^+ -ring อยู่ใกล้กับชั้นรับแสงที่เป็น p^+ จะมีกระแสมีสูง เนื่องจากมีพื้นที่ระหว่าง p^+ -ring และชั้น n^+ มาก จึงทำให้มีกระแสที่สูงกว่าตำแหน่งที่จุด p^+ -ring อยู่ใกล้กับชั้น n^+ เพราะมีพื้นที่ที่จะทำให้เกิดกระแสนั้นน้อย

ผลการทดลองพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงกับโฟโตไดโอด เมื่อนำไปตรวจจับแสงที่ได้จากหลอดฮาโลเจน พบว่าไดโอดมีกระแสแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 10-30% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มของไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เนื่องจากชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถลดการสะท้อนแสงได้ดีกว่าชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งจากผลการวัดเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสง (Ref%) ในช่วงความยาวคลื่นแสงตั้งแต่ 400-700 nm ชั้นพอร์สซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนต่ำกว่า โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นแสงต่ำกว่า 650 nm ลงมา และพบว่ากระแสของไดโอดเพิ่มขึ้นมากกว่าหนึ่งเท่าตัว เมื่อนำไปทดลองตรวจจับแสงอัลตราไวโอเลต (UVC) เพราะความยาวคลื่นแสงอัลตราไวโอเลตมีความยาวคลื่นสั้น ซึ่งเป็นช่วงที่ชั้นพอร์สซิลิคอนนั้นมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงต่ำ ในขณะที่ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีแนวโน้มของเปอร์เซ็นต์การสะท้อนแสงที่สูง (พิจารณารูปที่ 4.33) และผลของการทดลองสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนบนไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น n^+ ผลปรากฏว่าสามารถเพิ่มกระแสแสงได้ประมาณเท่ากับการสร้างพอร์สซิลิคอนบนไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็น p^+ อย่างไรก็ตาม ไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็นชั้น n^+ ไม่เหมาะสำหรับเป็นชั้นรับแสง จากการทดลองยังสังเกตเห็นว่าการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนก็ยังมีข้อจำกัด เกี่ยวกับพื้นที่ในการสร้าง พื้นที่ที่มีขนาดเล็กจะไม่สามารถสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนได้ ซึ่งพื้นที่ที่เล็กที่สุดในการทดลองครั้งนี้และทำให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนได้ประมาณ 0.06 mm^2

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ สุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพมหานคร: แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [2] Fukuda M. **Optical Semiconductor Devices**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1999.
- [3] Bhattacharya P. **Semiconductor Optoelectronic Devices**. 2nd Ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 1997.
- [4] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนร์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชากรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [5] คุสิต เครื่องาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน**. เล่ม 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2542.
- [6] R. King. Electrical Noise. **Chapman and Hall**. London, section 3, 1983.
- [7] W. Budde. “Physical Detectors of Optical Radiation” **Academic Press**. New York, 1983.
- [8] G.C. John V.A. Singh, **Physics report**. 263, 1195. 93-151.
- [9] นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง. “การศึกษาคุณสมบัติลูมิเนสเซนซ์ของชั้นพอร์สซิลิกอน” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542.
- [10] สรวิศ มุ่งการนา. “เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิกอนที่มีชั้นพอร์สซิลิกอนจากการกัดด้วยอัลตราโซนิก” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549.
- [11] V. Lehmann and U. Gosele. “Porous silicon formation : A Quantum Wire Effect” **Appl. Phys. Lett**, vol.58, no.8, 1991, pp. 856-858.
- [12] A. Halimaoui, C. Oules and G. Bomchil. “Electroluminescence in the visible rang during anodic oxidation of porous silicon films” **Appl. Phys. Lett**, vol.59, no.3, 1991, pp.304-306.
- [13] Y. Kanemitsu. “Luminescence properties of nanometer-size Si crystallites : core and surface states” **Phys. Rev. B**. vol.49, no.23, 1994, pp.16845-16848.
- [14] R.J. Archer. **J. Phys. Chem. Solids (UK)**. vol.35, 1956, pp. 333.
- [15] V. M. Aroutiounian, K. R. Maroutyan, A. L. Zatikyan and K. J. Touryan. “Calculations of the reflectance of porous silicon and other antireflection coating to silicon solar cells”

- Thin Solid Films.** vol.403-404, 1 February 2002, pp. 517-521.
- [16] V.P. Bondarenko and V.A. Yakovtseva. "Optoelectronic applications of porous silicon" **PROPERTIES OF Porous Silicon.** England ; Short Run Press Ltd., 1997.
- [17] L.T. Canham. "Biomedical applications of porous silicon" **PROPERTIES OF Porous Silicon.** England ; Short Run Press Ltd., 1997.
- [18] M.J. Sailor. "Sensor applications of porous silicon" **PROPERTIES OF Porous Silicon.** England ; Short Run Press Ltd., 1997.
- [19] B. William., Jones. **Introduction to Optical Fiber Communication Systems.** Holt, Rinehart and Winston, Inc., New York, 1988.
- [20] Appendix-f. "PIN Diode Radiation Detectors" **Microsemi Corp.-Watertown.**
- [21] A. Uhlir, "Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid" **Tech. J.**, vol.35, pp. 333, 1956.
- [22] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern and S.K. Deb. "Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics" **Photovoltaics Specialists Conference**, pp.287-293, 10-14 May 1993.
- [23] Wang, Hongbo. "Silicon X-ray smart sensor micromodule and microsystem" **University of Oulu, Finland Oulu, Finland 2002.**
- [24] L. T. Canham. **Appl. Phys. Lett. (USA).** vol.57, 1990, pp. 1096.
- [25] H. Zimmermann, U. Müller, R. Buchner and P. Seegebrecht. "Optoelectronic receiver circuits in CMOS-technology" in **Mikroelektronik'97, Berlin, Offenbach**, pp.195-202, 1997.
- [26] B Gonzalez-Diaz, R Guerrero-Lemus, N Marrero, C Hernandez-Rodriguez, F A Ben-Hander and JM Martinez-Duart. "Anisotropic textured silicon obtained by stain-etching at low etching rates" **J.Phys. D:Appl. Phys.** 39(2006)631-634.
- [27] J.D.Schaub, D.L.Rogers, M.Yang, S. M. sutak, B.Yang, J.C.Campbell. "Lateral PIN photodiodes for high-speed silicon optical receivers" **LEOS Volume16** Number 6, December 2002.
- [28] สมเกียรติ สุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2** กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544.
- [29] คงศักดิ์ อิ่มอุไร, สมเกียรติ สุภเดช. "การศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมา" **วิศวกรรมลาดกระบัง**, ปีที่ 23, ฉบับที่ 3, กันยายน 2549.
- [30] สมเกียรติ สุภเดช, คงศักดิ์ อิ่มอุไร, จิรวัดน์ ปรามเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ.

“กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด p-i-n” การประชุม
วิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28). vol.2. ตุลาคม 2548.

- [31] กงศักดิ์ อิมอุไร, จิรวัดน์ ปราบเขต และ สมเกียรติ สุกเดช. “ซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด p-i-n
แบบพลานาร์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง” การประชุมวิชาการทาง
วิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON 29), พฤษภาคม 2549.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ขั้นตอนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมา

1. การเตรียมแผ่นซิลิคอน และ การตรวจสอบคุณสมบัติ
 - แผ่นซิลิคอนชนิด อินทรินซิก ระบาย (111)
 - พิกัดความต้านทาน = 2,000 Ω -cm
 - ความหนา = 500 μ m
2. การทำความสะอาดครั้งแรก
 - อัลตราโซนิก (ultrasonic) ในน้ำ DI (น้ำบริสุทธิ์) 2 นาที (เพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ)
 - จุ่มในน้ำ DI เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
 - ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) 10 นาที (เพื่อกำจัดเศษ โลหะหนัก เช่น เศษ Si)
 - จุ่มในน้ำ DI
 - ต้มในน้ำ DI (I) 5 นาที
 - ต้มในน้ำ DI (II) 5 นาที
 - จุ่มในน้ำ DI
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
3. ทำความสะอาดผิวหน้าแบบมาตรฐาน
 - ต้มในไตรโคโลโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) 5 นาที (กำจัดคราบไขมัน)
 - อัลตราโซนิกในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) 5 นาที
 - จุ่มในน้ำ DI (I)
 - จุ่มในน้ำ DI (II)
 - เป่าแห้งด้วย N_2
4. การลอกออกไซด์ (slice etching) ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์
 - จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) 10% 10 วินาที
 - จุ่มในน้ำ DI (I)
 - จุ่มในน้ำ DI (II)
 - เป่าแห้งด้วย N_2

5. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการออกซิเดชัน เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ของ อะตอมสารเจือ

ใช้อุณหภูมิเตา 1,000 °C อุณหภูมิน้ำ 90 °C

- Dry Oxidation ด้วย O₂ 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O₂ 1,000 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O₂ 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง

ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 6,000 Å

6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 1

Mask/ Phosphorus Diffusion

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 90 °C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90 °C 30 นาที (prebake)
- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer ฟิล์ม โดย
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90 °C 30 นาที (Post bake)

7. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching) เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับการแพร่สารเจือ

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation) 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂

8. ลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 5 นาที
- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

9. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

10. Slight etching

- จุ่มใน HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

11. Phosphorus diffusion

- เคลือบซอสเหลวชนิดฟอสฟอรัส (P-59250) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ $150^{\circ}C$ เวลา 20 นาที
- Pre-dep. $1000^{\circ}C$ ด้วย N_2 1000 cc/min, 15 นาที

ลอกชั้น Pre-deposition, Phosphorus

- จุ่มใน HF 10 % 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- Drive-in (Phosphorus) $1100^{\circ}C$ ด้วย O_2

Dry 1200 cc/min 10 นาที

Wet 1000 cc/min 10 นาที

Dry 1200 cc/min 10 นาที

12. กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 2

Mask// Boron Diffusion

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer พิสูจน์โดย
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (Post bake)

13. Oxide etching

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation) 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂

14. ลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 5 นาที
- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂

15. ทำความสะอาดผิวหน้า

- ดั้มใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

16. Slight etching

- จุ่มใน HF 5% 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

17. Boron diffusion

- เคลือบขอสเลทชนิดโบรอน (B_2O_3) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ $150^\circ C$ เวลา 20 นาที
- Pre-dep. $1000^\circ C$ ด้วย N_2 1000 cc/min , 15 นาที

ลอกชั้น Pre-deposition, Boron

- จุ่มใน HF 10 % 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- Drive-in (Boron) $1000^\circ C$ ด้วย O_2
 - Dry 1200 cc/min 5 นาที
 - Wet 1000 cc/min 5 นาที*
 - Dry 1200 cc/min 5 นาที

.....

* 5 นาที 15 นาที 25 นาที และ 35 นาที (เวลากำหนดความลึกของรอยต่อ x_j)

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที

18. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 3

Mask/III Contact Window

- อบแผ่น ไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer ฟลิ้มโดย
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (Post bake)

19. Oxide etching

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation) 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂

20. ลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 5 นาที
- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂

21. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

22. Aluminium Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} torr.

27. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 4

Mask IV Metal .

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ 30 นาที (prebake)
- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer พิสูจน์ โดย
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที
 - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ 30 นาที (Post bake)

28. การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)

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

29. ลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 5 นาที
- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที

- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

30. Sintering 500°C

- N_2 1,000 cc./min. เวลา 12 นาที

ขั้นตอนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนบนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมา

สำหรับมาสก์ต้นแบบที่ใช้ในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมา ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนมีทั้งหมดด้วยกัน 5 มาส์ค ดังนี้

Mask I Phosphorus Diffusion ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดฟอสฟอรัส

Mask II Boron Diffusion ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน

Mask III Contact Window ใช้สำหรับเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำ และสร้างพอร์สซิลิคอน

Mask IV Metal Mask ใช้สำหรับสร้างลวดลายอะลูมิเนียม

Mask V Porous Mask ใช้สำหรับสร้างพอร์สซิลิคอน

โดยขั้นตอนการสร้างพอร์สซิลิคอนโฟโตไดโอดเริ่มต้นจากมาสก์ที่ 5 (#Mask V Porous Mask)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 5

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (S1818) ที่ความเร็ว 4,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 20 นาที
- ฉายแสง เวลา 60 วินาที

Develop ฟิล์มโดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 25 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 20 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)

- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ $90^\circ C$ เวลา 30 นาที (Post bake)

การสร้างชั้นพอร์ซซัลฟอน

- จุ่มในสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก เวลา 45 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 2 นาที
- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

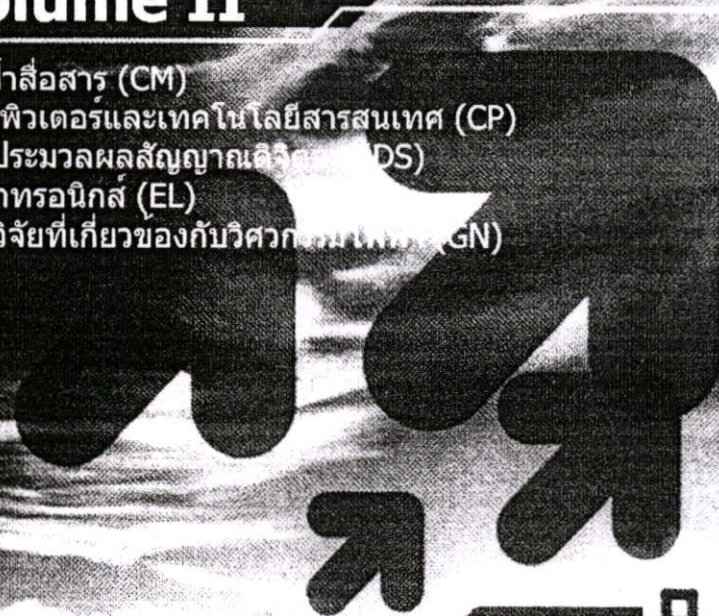
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 28th Electrical Engineering Conference



Volume II

Electrical Engineering

ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



Western
Digital



ศูนย์ส่งเสริมเทคโนโลยีทางไฟฟ้าอุตสาหกรรม
และอุตสาหกรรมสัมพันธ์

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า
ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ครั้งที่ 28 ประจำปี 2548

20-21 ตุลาคม 2548

โรงแรมประชุมฟ้า วิทยาลัย

กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

Fabrication and Characteristics of Silicon p-i-n Photo Diode

สมเกียรติ ศุภเดช กงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัดน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร. 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384 Email:kssomkia@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้เสนอการทดลองและผลการทดลอง ในการ ออกแบบและสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ซึ่งเป็นตัวตรวจจับ แสงที่ถูกนำมาใช้ในงานด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย โดยใช้แผ่นผลึก ซิลิคอนชนิดอินทรินซิก(i-type) ที่มีสภาพต้านทานสูง 2000 Ω-cm. ระบาย(111) เป็นแผ่นผลึกฐานรองรับชั้นเอ็น(n-region)ที่อยู่ ด้านล่างและชั้นพี(p-region)ที่อยู่ด้านบนของไดโอดสร้างได้ด้วยเทคนิค การแพร่ระดมของสารเจือฟอสฟอรัสและโบรอนเข้าไปในแผ่นซิลิคอน ตามลำดับ โฟโตไดโอดที่สร้างได้มีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง(vertical structure)และสามารถแสดงคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้เสนอ ผลของความเข้มแสง ผลของขนาดพื้นที่รับแสง และผลของความลึก(depth)ของชั้นพีและชั้นเอ็นของไดโอดที่มีต่อ คุณสมบัติของไดโอดและพารามิเตอร์ที่สำคัญเช่น กระแสมืด กระแส แสง และการตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่สูง(Photo response) อีกด้วย ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาตัวตรวจจับ แสงโครงสร้าง p-i-n แบบอื่น ๆ ต่อไป

คำสำคัญ : ตัวตรวจจับแสง, ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

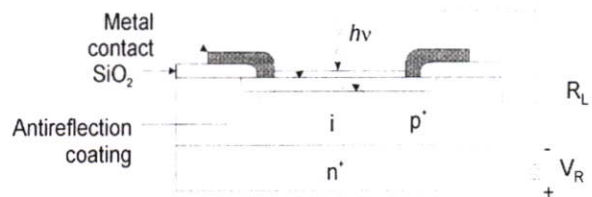
Abstract

This paper presents the experiment and experimental results of Design and Fabrication of Si p-i-n photo diodes which are widely used in many applications. The initial substrate is intrinsic silicon wafer with 2000 Ω-cm. resistivity and (111) orientation. The n-region at the bottom and p-region at the top surface of photo diode are respectively formed by diffusing technique of phosphorus and boron into silicon substrate. In addition the effect of light intensity, active area, the depth of n-region and p-region on the important parameter of photo diode such as dark current, photo current and photo response are also reported. The basic datas of this experiment are useful for the development of the other type of silicon p-i-n photo diodes.

Keywords : Photo detector, si p-i-n photo diode

1. บทนำ

ปัจจุบันตัวตรวจจับแสง(photo detector) ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานด้านต่างๆ เช่น เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงในเครื่องเล่นซีดี(CD player) ทั่วๆ ไป กระทั่งเป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงความเร็วสูง(high speed photo detector)ในระบบการสื่อสารทางแสง(optical communication system)ยุคใหม่ และนับวันยังมีบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ(junction photo diode)เป็นตัวตรวจจับแสงที่นิยมนำมาใช้งานกันมากชนิดหนึ่งเพราะมีราคาถูกเนื่องจากใช้เทคโนโลยีซิลิคอน(silicon technology)ซึ่งเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและยังมีสมรรถนะสูงอีกด้วย โดยเฉพาะซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 กล่าวคือมีชั้นซิลิคอนชนิดพี(p-type)และชั้นซิลิคอนชนิดเอ็น(n-type)ประกบอยู่ที่ด้านทั้งสองของชั้นซิลิคอนชนิดอินทรินซิก(intrinsic-type) โครงสร้างเช่นนี้ทำให้มีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นหลายประการเช่นมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง(absorption efficiency)สูง มีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงกว้างตั้งแต่ 200 nm(UV) ถึง 1150 nm (near IR) และมีความอัตราเร็วในการตอบสนอง(response speed) สูงกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ [1]



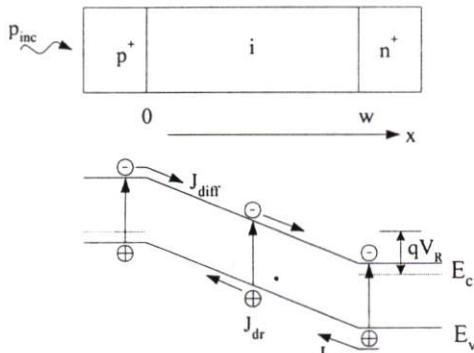
รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

นอกจากนี้โฟโตไดโอดชนิด p-i-n ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็น ตัวตรวจจับรังสี(radiation)ต่างๆ เช่นรังสีเอกซ์ รังสีแกมมา และอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า(อนุภาคอัลฟา อนุภาคเบต้า)ได้อีกด้วย[1-3]

ในรายงานนี้ได้เสนอการออกแบบ สร้างและศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์แสงอื่น ๆ ต่อไป

2. การทำงานของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

ชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก (i - region) ที่มีค่าสภาพต้านทานสูงและถูกประกบด้วยชั้นพีและชั้นเอ็น จะเป็นชั้นที่มีการดูดกลืนโฟตอนมากที่สุด และทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น ในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแม้เพียงเล็กน้อยแรงดันไบอัสเกือบทั้งหมดนี้จะปรากฏตกคร่อมบริเวณชั้นอินทรีนซิกและมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้นอินทรีนซิก ดังนั้นคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากการดูดกลืนโฟตอนจะถูกสนามไฟฟ้าพัดพาให้เคลื่อนที่เข้าไปยังด้านพีและด้านเอ็นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และเป็นกระแสแสงที่ขั้วโลหะทั้งสองของไดโอด



รูปที่ 2 การดูดกลืนโฟตอนและการเกิดคู่พาหะ อิเล็กตรอน-โฮล ในโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

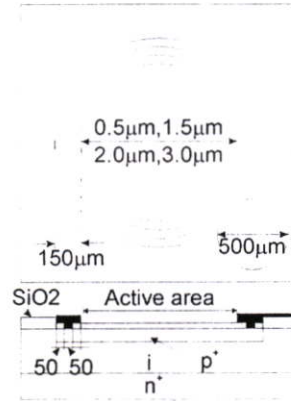
เนื่องจากชั้น i มีขนาดกว้างกว่าบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นธรรมดา ดังนั้นไดโอดชนิด p-i-n จึงมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงสูง หรือมีความไวต่อแสง (responsivity) สูงกว่าโฟโตไดโอดแบบรอยต่อธรรมดา นอกจากนี้แล้ว เนื่องจากโครงสร้างของไดโอดชนิด p-i-n ซึ่งมีรอยต่อสองรอยต่ออนุกรมกันอยู่ ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมของไดโอดชนิดนี้จะมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีความเร็วในการทำงานสูง (high response speed) หรือตอบสนองต่อสัญญาณแสง (photo response) ความถี่สูงได้ดี [5]

ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากความกว้างของชั้น i สามารถเปลี่ยนแปลงและควบคุมได้ ซึ่งจะมีประโยชน์มากเพราะทำให้เราสามารถกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณแสง หรือ bandwidth ของโฟโตไดโอดชนิดนี้ได้ตามความต้องการ [6]

3. การออกแบบและขั้นตอนการสร้าง

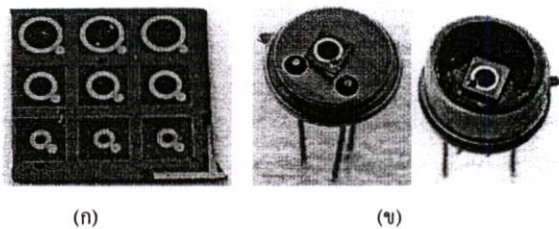
การออกแบบลวดลายส่วนต่างๆของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง สำหรับการทดลองในครั้งนี้กำหนดให้ส่วนพี (p-region) เป็นส่วนที่รับแสง โดยมีลักษณะเป็นรูปวงกลมและมีโครงสร้างดังในรูปที่ 3 และมีพื้นที่รับแสงหรือ Active area

ขนาดต่างๆกันคือ 0.196 mm², 1.767 mm², 3.142 mm², และ 7.068 mm² ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของขนาดพื้นที่รับแสง ที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของโฟโตไดโอดชนิดนี้ โฟโตไดโอด หรือกระจกอลวยดัดแบบที่ใช้ในการสร้างไดโอดมีจำนวน 3 มาส์กคือ p-region mask, contact window mask และ metal mask ตามลำดับ



รูปที่ 3 ลักษณะรูปร่างอลวยดัดของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่

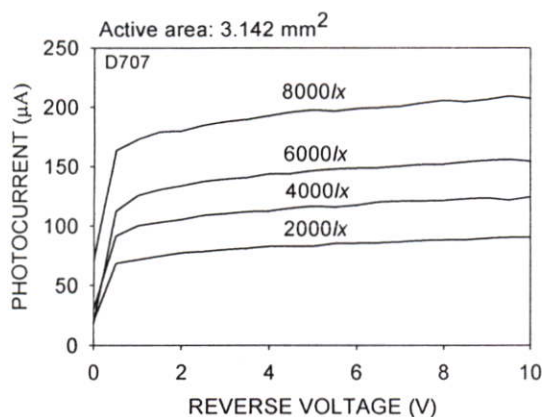
ลำดับขั้นตอนของการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n เริ่มจากแผ่นผลึกสารรองชนิดอินทรีนซิก (intrinsic type) มีสภาพต้านทาน 2000 Ω.cm. ระบาย (111) ชั้นเอ็น (n-region) เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเข้าทางด้านล่าง (ด้านหลัง) ของแผ่นผลึกทั่วทั้งผิวหน้า ส่วนชั้นพี (p-region) เกิดจากการแพร่ อะตอมโบรอนเข้าทางด้านบน (ด้านหน้า) ของแผ่นผลึก ซึ่งชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ถูกเปิดออกเป็นช่องวงกลม อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่สารคือ 1100 °C เพื่อการศึกษาผลของความกว้างของชั้น i เวลาที่ใช้ในการแพร่ส่วนเอ็นทำที่เวลาต่างๆกันคือ 3 ชั่วโมง 5 ชั่วโมง และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ และเพื่อศึกษาผลของความหนาของชั้นพี ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับแสงเวลาที่ใช้ในการแพร่ส่วนพีทำที่เวลาต่างๆกันคือ 30 นาที 50 นาทีและ 70 นาที ตามลำดับ ชั้นของอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของไดโอด โฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่สร้างได้ถูกนำไปติดตั้งลงบนตัวถังแบบ can case ดังในรูปที่ 4 เพื่อวัดและทดสอบคุณสมบัติต่อไป



รูปที่ 4 (ก) โฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่สร้างเสร็จ อยู่บนแผ่นผลึกซิลิกอนและ (ข) โฟโตไดโอดที่ถูกแยกและติดตั้งลงในตัวถัง

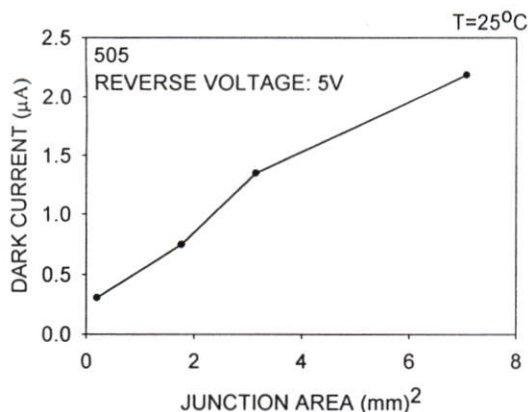
3. การทดลองและผลการทดลอง

โฟโตไดโอดที่สร้างได้ ถูกนำไปวัดและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางแสง โดยแสงที่ใช้ได้จากหลอดฮาโลเจน ลักษณะสมบัติระหว่าง กระแสและแรงดันไบอัสย้อนกลับ(reverse biased) ขณะที่ได้รับแสงความเข้มค่าต่างๆ แสดงได้ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติระหว่างกระแส และแรงดันไบอัสย้อนกลับ ขณะที่ได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

กระแสมืด(dark current) หรือกระแสรั่ว(leakage current)ของ ไดโอดมีค่าไม่เท่ากัน โดยไดโอดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีค่ากระแสมืดสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 6 และไดโอดที่มีขนาดความกว้าง ของชั้น i ที่ต่างกันจะมีค่ากระแสมืดต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7

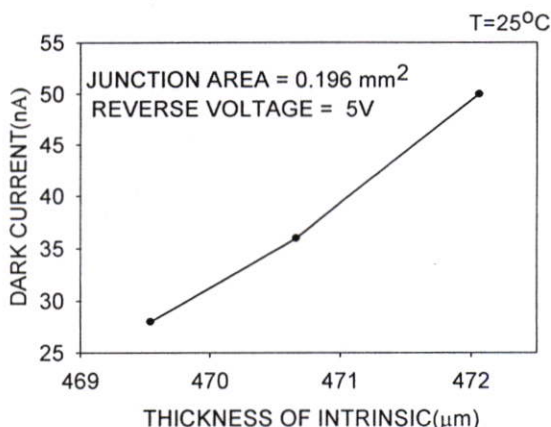


รูปที่ 6 กระแสมืดของโฟโตไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อค่าต่างๆ

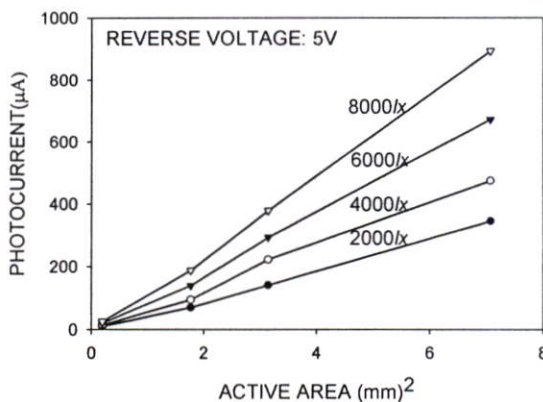
ในขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแสง เมื่อมีการดูดกลืนโฟตอนจะทำให้มีกระแสแสงเกิดขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง และขนาดของพื้นที่รับแสงดังแสดงในรูปที่ 8

นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนาของชั้นหน้าต่างรับแสงหรือชั้นที่(x_j)จะมีผลต่อกระแสแสงเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่าความหนาของชั้นรับแสงที่เหมาะสมจะสามารถให้กระแสแสงได้มากที่สุด ใน

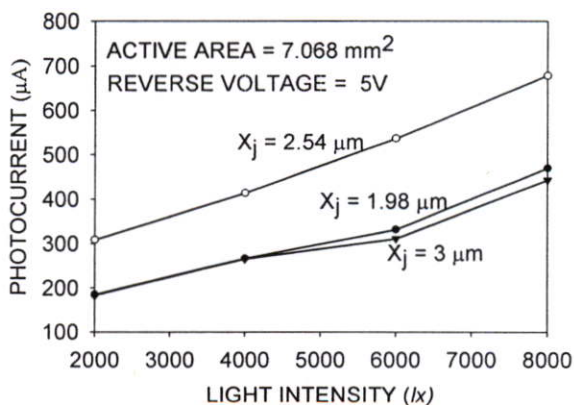
การทดลองนี้ความหนาของชั้นที่ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับแสงที่หนา ประมาณ 2.5 µm. จะให้กระแสแสงได้สูงที่สุด



รูปที่ 7 กระแสมืดของโฟโตไดโอดที่มีความกว้างของชั้น i ค่าต่างๆ

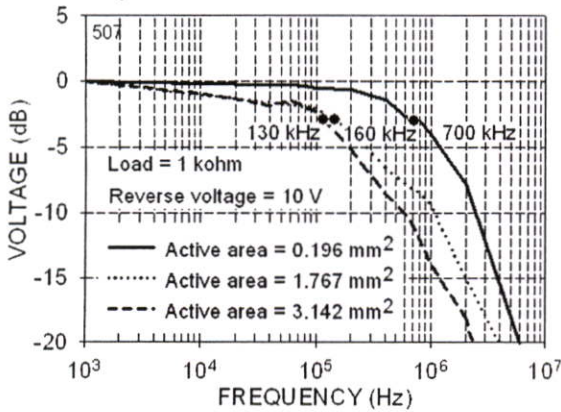


รูปที่ 8 กระแสแสงที่พื้นที่รับแสงต่างๆกันของโฟโตไดโอดในขณะที่ได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 9 กระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ของโฟโตไดโอด ที่มีขนาดความหนาของชั้นรับแสงค่าต่างๆ

คุณลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ความถี่ต่างๆ สามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณคลื่นรูปไซน์ขนาด 500 mVp-p ที่ความถี่ค่าต่างๆมอดูเลท(modulation)กับคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm. ซึ่งเป็นคลื่นพาหะ แล้วส่งออกไปยังวงจรรวมรับ ที่มีโฟโอดีไดโอดชนิด p-i-n เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสง ทำให้มีกระแสแสงไหลในวงจรรวม และมีแรงดันเอาท์พุทตกคร่อมตัวต้านทานซึ่งเป็นโหลดในวงจรรวมรับ เมื่อสัญญาณรูปไซน์มีค่าความถี่สูงขึ้น ขนาดของกระแสแสงจะลดลง ทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าลดลงด้วย ขนาดของแรงดันเอาท์พุทที่ความถี่ค่าต่างๆ ถูกลำดับเปรียบเทียบด้วยขนาดของแรงดันเอาท์พุทสูงสุด และแสดงออกมาในรูปของค่าแรงดันมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า โฟโอดีไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อค่าน้อย จะให้ผลการตอบสนองต่อสัญญาณความถี่สูงได้ดีกว่า ซึ่งจากการทดลองโฟโอดีไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อ 0.196 ตร.มม.สามารถตอบสนองสัญญาณแสงที่มีความถี่สูงถึง 700 kHz.



รูปที่ 10 คุณลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่ต่างๆ ที่มีพื้นที่ของรอยต่อพี-ไอแตกต่างกัน ที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์

นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโอดีไดโอดที่มีความกว้างของชั้น i ค่าน้อยจะให้ผลตอบสนองทางสัญญาณแสงได้ดีกว่า

5. สรุปและวิจารณ์

ซิลิคอนโฟโอดีไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้งถูกออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์ซิลิคอน ขนาดของกระแสมีคของไดโอด จะเพิ่มขึ้นกับขนาดของพื้นที่รอยต่อพี-ไอ และความกว้างของชั้น i

กระแสแสงของโฟโอดีไดโอดจะเพิ่มขึ้นกับความเข้มแสงและความหนาของชั้นรับแสง โดยชั้นรับแสงที่มีความหนาที่เหมาะสมจะให้กระแสแสงได้สูงสุด ในการทดลองนี้ความหนาของชั้นรับแสงที่ดีที่สุดประมาณ 2.5 μm. สำหรับความกว้างของชั้น i ในกรณีนี้จะมีผลต่อกระแสแสงน้อย ซึ่งต่างจากโครงสร้างแบบพลาเนอร์ คุณลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่ต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเร็วในการทำงานของโฟโอดีไดโอด พบว่าขนาดพื้นที่ของรอยต่อของไดโอด

จะเป็นตัวกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ไดโอดที่มีขนาดเล็กจะมีความเร็วในการทำงานสูง และตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่สูงได้ดี ในการทดลองนี้ไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อ 0.196 ตร.มม. มี bandwidth กว้าง 700 kHz. แต่จะให้กระแสแสงต่ำ ดังนั้นในการออกแบบโฟโอดีไดโอด จำเป็นต้องกำหนดเป้าหมายการใช้งานให้ชัดเจน เพื่อให้ได้ไดโอดตามต้องการ เช่นหากใช้เป็นตัวตรวจจับแสง ควรมีความไวต่อแสงสูงหรือ responsivity ที่สูง กรณีนี้ควรมีพื้นที่รับแสงที่มีขนาดใหญ่และชั้น i ควรมีขนาดกว้างเพื่อให้ได้กระแสแสงค่าสูง แต่ในกรณีที่ใช้เป็นตัวจับสัญญาณแสงในระบบการสื่อสารทางแสง ไดโอดควรมีขนาดเล็กและชั้น i ควรมีค่าน้อยๆ เพื่อลดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ และค่า transit timeของพาหะจะทำให้ได้ไดโอดที่มีความเร็วสูง ซึ่งไดโอดที่มีโครงสร้างแบบพลาเนอร์จะสามารถควบคุมขนาดของชั้น i ได้ โดยง่ายและสะดวกกว่าโครงสร้างแบบแนวตั้ง

เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Bhattacharya, "Semiconductor Optoelectronic Devices", 2th., Prentice-Hall, 1997
- [2] W. Slysz, L. Ryc, and M. Wegrzecki, "High-resistivity silicon p-i-n diodes for detection of ionising radiation", IEEE, pp. 461-462(2000)
- [3] Appendix-f, "PIN Diode Radiation Detectors" ,Microsemi Corp.-Watertown.
- [4] Carroll-Ramsey Associates Berkeley, "Silicon PIN Diode Radiation Detectors", CA Copyright 1999.
- [5] รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช, "เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์" คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล., 2545
- [6] N. Peyghambarian, S. W. Loch, and A. Mysyrowicz, "Introduction To Semiconductor Optics", Prentice-Hall, 1993, pp448-453



สมเกียรติ สุภเดช ปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



กงศักดิ์ อิมจไ้ ปัจจุบัน กำลังศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



จิรวัดน์ ปราบเขต ปริญญาตรี วศ.บ. สาขา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



1. ข้อมูลสมมูลของการสกัดน้ำมันงาโดยใช้เทอร์โมลิกเนชันเป็นตัวทำละลาย
รินฤดี เบญจางคประเสริฐ 1
2. การกำจัดสีย้อมฟาสบลูบีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีไอโซเนชัน
สุราสินี เนรมิตตกพงศ์ อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ 7
3. การศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิผลของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมา
คงศักดิ์ อิมอุไร สมเกียรติ สุภเดช 13
4. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของเซลล์แสงอาทิตย์สำหรับแบบจำลองแหล่งจ่ายไฟจากเซลล์แสงอาทิตย์
ที่ถูกต้อง
เอก เอื้อตระการวิวัฒน์ วิมลชัย ชูรักษ์ วิจิตร กิณเรศ 18
5. วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์หลายเฟสแบบปรับค่าด้วยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ไอทีเอแบบหลาย
เอาต์พุต
สดดี จินตณปัญญา กอบชัย เดชหาญ 24
6. การพยากรณ์ความต้องการใช้พลังงานไฟฟ้าสูงสุดระยะยาวของระบบ กฟน. โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม
จตุพร ธรรมเจริญ สมชาติ จิรวินาการ 30
7. การทำนายค่าความสูญเสียในหม้อแปลงจำหน่ายโดยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดแพร่ค่าย้อนกลับ
นุชทิศา สุทธิสินทอง มณฑล สีลาจินดาไกรฤกษ์ 36
8. อินเวอร์เตอร์หลายระดับชนิดแคสเคดแหล่งจ่ายที่มีการส่งผ่านกำลังไฟฟ้าสมดุลโดยใช้เทคนิคการกำจัด
ฮาร์มอนิกที่เหมาะสม
สิทธิพร เจียรนนทพิสุทธิ์ วิจิตร กิณเรศ 42
9. การศึกษาเชิงตัวเลขของผลของการปรับแต่งพื้นเพื่อตรงโดยวิธีเงื่อนไขพื้นต่อการหล่อขึ้นแบบ
อิลาสโตไฮโดรไดนามิกส์
อานันท์พล แสนคำ มนต์ศักดิ์ พิมสาร 48

การศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์

Study on Effective Active Area of Planar p-i-n Silicon Photodiode

คงศักดิ์ อิมูไร สมเกียรติ สุภเดช

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384 Email: aimurai01@hotmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอ การศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ ที่มีผลทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้มีความไวในการตรวจจับแสงสูง โดยได้ทำการศึกษา ทดลองและเปรียบเทียบผลของพื้นที่ไวแสงที่บริเวณต่างๆในโครงสร้างของไดโอดชนิดนี้ เช่น พื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$, $n^+ - i$ และพื้นที่รับแสงของชั้น i ในการสร้างไดโอด ส่วน n^+ และ p^+ ทำได้ด้วยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสและโบรอนเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิกที่มีสภาพความต้านทานสูง $2000 \Omega\text{-cm}$. โฟโตไดโอดที่สร้างได้ถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ผลการทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าบริเวณพื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$ เป็นพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพ ซึ่งสามารถช่วยเพิ่มกระแสแสงได้มากกว่าพื้นที่ไวแสงส่วนอื่นๆ

คำสำคัญ: โฟโตไดโอดชนิด p-i-n, โฟโตไดโอดแบบพลาแนร์, ซิลิคอน

Abstract

This report presents the study on effective active area of planar p-i-n silicon photodiode that makes to have a high sensitivity. The experiment has studied and compared the results of several active area such as a $p^+ - i$ junction area, $n^+ - i$ junction area and a width of i layer. The structure consisted of n^+ layer and p^+ layer have been constructed by diffusing technique of phosphorus and boron on the top of intrinsic silicon wafer with a high-resistivity of $2000 \Omega\text{-cm}$., which is the initial substrate. Photodiodes constructed have been to test the electrical and the photocurrent characteristics and the Halogen lamp used is a light source. The testing demonstrates obviously that the $p^+ - i$ junction area is effective active area and increases the photocurrent more than the other ones.

Keyword: p-i-n photodiodes, planar photodiodes, Silicon

1. บทนำ

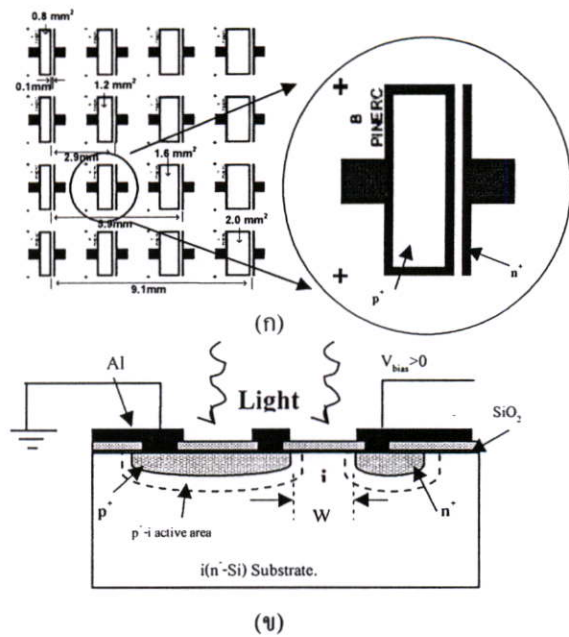
ปัจจุบันมีการใช้งานฟิสิกส์โฟโตนิกส์หรือโฟโตนิกส์ไดโอดชนิด p-i-n เป็นตัวตรวจรับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลายในระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว เช่นในระบบการสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์ ในอุปกรณ์ดิสก์ ในอุปกรณ์รีโมตคอนโทรลด้วยแสง หรือแม้แต่เป็นตัวตรวจจับรังสี เป็นต้น เนื่องจากโฟโตนิกส์ไดโอดชนิดนี้มีลักษณะเด่นคือ ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อ (Junction capacitance) ในไดโอด มีค่าน้อย จึงทำให้มีความเร็วในการทำงานสูง หรือมีคุณสมบัติตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก (Ultra-fast response speed)

โฟโตนิกส์ไดโอดชนิด p-i-n สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ลักษณะ คือแบบแนวตั้ง (Vertical p-i-n photodiode) และแบบแนวนอนหรือแบบพลาแนร์ (Planar p-i-n photodiode) ซึ่งทั้งสองลักษณะนี้มีคุณสมบัติในการใช้งานต่างกัน กล่าวคือโฟโตนิกส์ไดโอดชนิด p-i-n แบบแนวตั้งจะไม่นิยมนำไปใช้ในระบบที่ต้องการความเร็วสูงๆ เนื่องจากค่าแบนด์วิท (bandwidth) จะถูกจำกัดด้วยความกว้างของชั้น i [1] ซึ่งควบคุมได้ยากในไดโอดแบบแนวตั้ง ต่างจากโฟโตนิกส์ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ ที่สามารถควบคุมชั้น i ได้โดยง่าย และกระบวนการสร้างก็สามารถทำได้เช่นเดียวกับเทคโนโลยีของ CMOS [2] จึงง่ายต่อการประยุกต์เป็นวงจรรวมทางแสง (Photonic integrated circuits)

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการทดลองและผลการทดลองเพื่อศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพในโครงสร้างของโฟโตนิกส์ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาให้ได้โฟโตนิกส์ไดโอดที่มีความไวต่อแสงสูงต่อไป

2. โครงสร้างและหลักการทำงาน

ลักษณะลวดลายและโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตนิกส์ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ประกอบด้วยชั้น p^+ ชั้น i และชั้น n^+ ดังแสดงในรูปที่ 1(ก) และ(ข) ตามลำดับ. ความกว้างของชั้น i หรือก็คือระยะห่างระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ มีขนาด $100 \mu\text{m}$ กำหนดให้พื้นที่ไวแสง (Active area) ของรอยต่อ $p^+ - i$ มีขนาดต่างๆ กันคือ 0.8 mm^2 , 1.2 mm^2 , 1.6 mm^2 และ 2.0 mm^2 ตามลำดับ



รูปที่ 1 (ก). ลวดลายต้นแบบ และ (ข) ภาพตัดขวางของโฟโตนิกส์ไดโอดแบบพลาแนร์ที่สร้างขึ้น

หลักการทำงานพื้นฐานของโฟโตนิกส์ไดโอดชนิดนี้มีลักษณะคล้ายกับกรณีของโฟโตนิกส์ไดโอดแบบรอยต่อที่เอินทั่วไป เพียงแต่โฟโตนิกส์ไดโอดชนิดนี้ มีชั้น i ซึ่งเป็นส่วนที่มีความต้านทานสูงกั้นอยู่ระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ ในขณะที่ถูกนำไปใช้งานไดโอดจะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ทำให้มีสนามไฟฟ้าปรากฏอยู่ในชั้น i

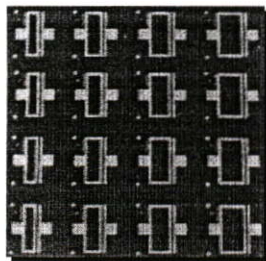
เมื่อไดโอดได้รับแสง การดูดกลืนโฟตอนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลอิสระขึ้นในชั้นต่างๆ ทั้งในชั้น p^+ ชั้น i และชั้น n^+ แต่บริเวณผิวหน้าและบริเวณที่มีสนามไฟฟ้าจะเป็นพื้นที่ไวแสงที่ดี เช่นบริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ $p^+ - i$, รอยต่อ $n^+ - i$ และชั้น i โดยพาหะที่เกิดขึ้นนี้จะสามารถเคลื่อนที่ด้วยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าไปยังขั้วโลหะและกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแสงที่เอาต์พุต

ปกติความกว้างของชั้น i จะเป็นตัวกำหนดขนาดของแบนด์วิท (Bandwidth) กรณีความหนาของชั้นดูดกลืน $2 \mu\text{m}$ หรือน้อยกว่านี้ จะช่วยเพิ่มแบนด์วิทให้สูงขึ้นในระดับหลายจิกกะเฮิร์ตส์ [2]

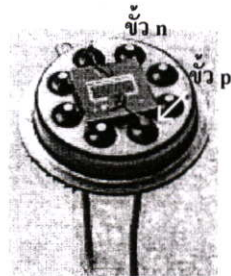
3. การสร้าง

ขั้นตอนของกระบวนการสร้างโฟโตนิกส์ไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ เริ่มจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิด

อินทรีนซิก (n⁻type) ที่มีสภาพต้านทาน 2000Ω.cm.ระนาบ (111) ชั้นพี (p⁺-region) และชั้นเอ็น (n⁻-region) เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัสเข้าทางด้านผิวบนของแผ่นผลึกฐานรองโดยเทคนิคการแพร่ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1000°C ทำให้ได้ความเข้มข้น 7.13x10¹⁸ cm⁻³ และ 1x10¹⁹ cm⁻³ ตามลำดับ และมีความลึกของชั้น n⁺ และ ชั้น p⁺ เท่ากับ 1 μm และ 0.5 μm ตามลำดับ พื้นที่ของส่วนเอ็นมีขนาด 300 x 2200 μm² สำหรับพื้นที่ของส่วนพีมีขนาดต่างๆตามลวดลายที่ได้ออกแบบไว้คือ 600 x 2200 μm², 800 x 2200 μm², 1000 x 2200 μm², และ 1200 x 2200 μm² ชั้นของอะลูมิเนียมที่สร้างขึ้นด้วยวิธีการระเหยอะลูมิเนียมในสุญญากาศที่ 2x10⁻⁶ Torr. ถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของไดโอด และทำการสร้างอัลลอยของ AISi เพื่อให้ได้รอยสัมผัสโอห์มิกที่ดีโดยการซินเตอร์ริง (sinter) ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 12 นาที ชั้นลดการสะท้อนแสงที่ผิวหน้าของไดโอดนี้ได้แก่ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์(SiO₂) ซึ่งหนาประมาณ 700 Å ซึ่งสร้างขึ้นในระหว่างการแพร่อะตอมสารเจือ ลักษณะของไดโอดที่สร้างเสร็จบนแผ่นผลึกซิลิคอนและถูกแยกคิดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋อง(can case) แสดงดังในรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ



(ก)



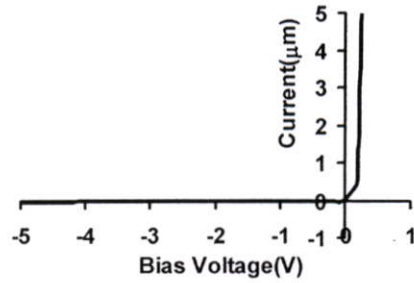
(ข)

รูปที่ 2 (ก) ไดโอดที่สร้างเสร็จบนแผ่นผลึกซิลิคอนและ (ข) ไดโอดที่ถูกแยกมาติดตั้งอยู่บนตัวถังแบบกระป๋อง

4. การทดลองและผลการทดลอง

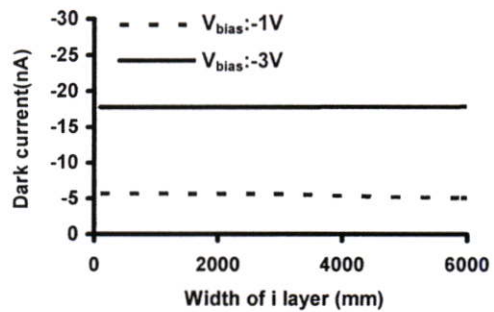
โพลีไดโอดที่สร้างได้ถูกนำไปทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง ด้วยเครื่องวิเคราะห์อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor analyzer) ของ HP รุ่น 4061 A คุณลักษณะระหว่างกระแสและแรงดันของไดโอด ขณะที่ไม่ได้รับแสงแสดงได้ดังในรูปที่ 3 ที่แรงดันไบอัส -5 V มีกระแสมืดหรือกระแสรั่ว 48.1 nA/mm² และไดโอด

สามารถทนแรงดันไบอัสย้อน กลับได้สูงถึง 150 V และเป็นลักษณะเด่นของโพลีไดโอดชนิดนี้คือมีกระแสมืดต่ำ และมีแรงดันพังทลายสูง

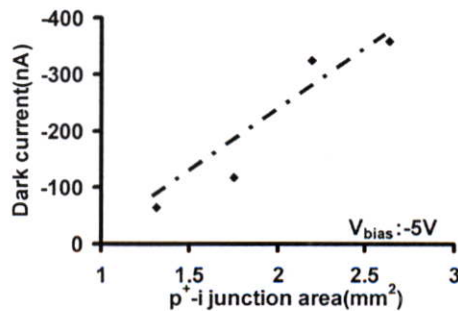


รูปที่ 3 ลักษณะของกระแสและแรงดันขณะไม่ได้รับแสง

ผลการวัดกระแสมืด (Dark current) ของไดโอดที่มีความกว้าง (w) ของส่วน i ซึ่งอยู่ระหว่างชั้น p⁺ และชั้น n⁻ ค่าต่างๆกัน ขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัส -1 V และ -3 V แสดงได้ดังในรูปที่ 4 จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า กระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นกับแรงดันไบอัส แต่ไม่เปลี่ยนกับความกว้างของส่วน i แต่อย่างไรก็ดี กระแสมืดของโพลีไดโอดนี้จะเพิ่มขึ้นกับพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i ดังในรูปที่ 5 ซึ่งเป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยต่อ

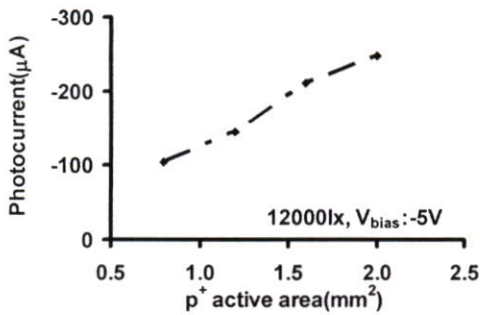


รูปที่ 4 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสมืดและความกว้างของชั้น i(w)



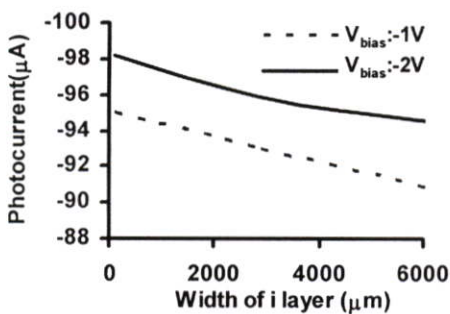
รูปที่ 5 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดและพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i

ในขณะที่ไดโอดได้รับแสงการดูดกลืนโฟตอนจะทำให้มีกระแสแสงเกิดขึ้น กรณีของแสงจากหลอดฮาโลเจนความเข้ม 12000 lx และที่แรงดันไบอัส -5 V พบว่ากระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นกับพื้นที่รับแสง p^+ ดังในรูปที่ 6



รูปที่ 6 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและพื้นที่ของรอยต่อ $p^+ - i$

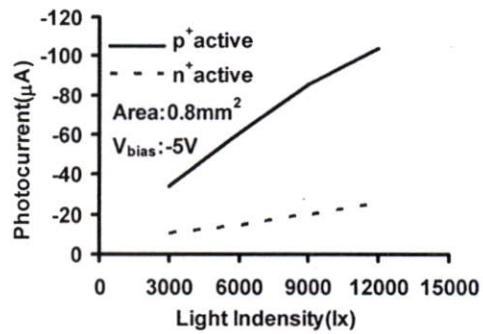
จากผลการทดลองในรูปที่ 7 ซึ่งแสดงลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความกว้างของชั้น $i(w)$ ขณะได้รับแรงดันไบอัสที่ -1 V และ -2 V จะเห็นว่ากระแสแสงมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่าง p^+ และ n^+ หรือบริเวณความกว้างของชั้น $i(w)$ มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากชั้น $i(w)$ ที่มีขนาดกว้างขึ้นส่งผลให้เกิดความต้านทานภายในชั้นนี้มากขึ้นและเป็นสาเหตุทำให้บริเวณปลอดพาหะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าพื้นที่รับแสงของชั้น i ไม่เหมาะสมสำหรับเป็นพื้นที่ไวแสง



รูปที่ 7 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและพื้นที่รับแสงของชั้น i ที่ความเข้มแสง 12000 lx

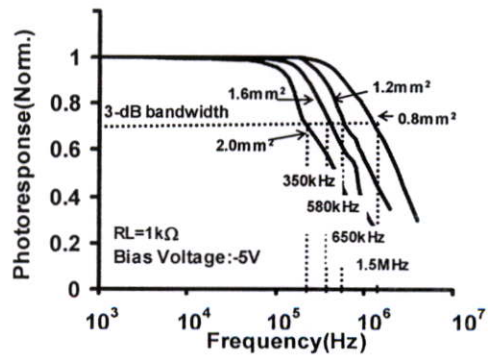
จากการทดลองและเปรียบเทียบโฟโอดีไดโอดชนิด $p-i-n$ สองกลุ่มที่มีพื้นที่รับแสง p^+ และ n^+ ที่เท่ากัน พบว่าพื้นที่รับแสง p^+ สามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่าพื้นที่รับแสง n^+ ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ สาเหตุเพราะว่าเมื่อวิเคราะห์

ถึงจำนวนอิเล็กตรอนในชั้นที่และชั้นอื่นแล้ว พบว่าในชั้นที่มีจำนวนอิเล็กตรอนน้อยกว่าหรือมีอิเล็กตรอนเป็นพาหะส่วนน้อยคั้งนั้นเมื่อชั้นนี้ได้รับแสงที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดคู่พาหะก็จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของพาหะสูงและกลายเป็นกระแสแสงได้ดีกว่ากรณีให้ชั้นอื่นเป็นชั้นรับแสง เนื่องจากมีอิเล็กตรอนมากอยู่แล้วจึงเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงได้น้อยกว่านั่นเอง และกระแสแสง (Photocurrent) จะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงอย่างเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสแสงและความเข้มแสงของโฟโอดีไดโอด

คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณแสงทางความถี่ของโฟโอดีไดโอด วัดได้โดยใช้สัญญาณคลื่นรูปไซน์ขนาด 400 mVp-p ที่ความถี่ค่าต่างๆมอดูเลท (Modulation) กับคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm ซึ่งเป็นคลื่นพาหะ โฟโอดีไดโอดที่มีขนาดพื้นที่ส่วน p^+ เล็กที่สุด 0.8 mm² จะได้แบนด์วิดท์สูงที่สุด 1.5 MHz และขนาดพื้นที่ส่วน p^+ ใหญ่ที่สุด 2.0 mm² จะได้แบนด์วิดท์ต่ำที่สุด 350 kHz ดังในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ลักษณะการตอบสนองสัญญาณแสงทางความถี่ของโฟโอดีไดโอดชนิด $p-i-n$ แบบพลาแนร์

ดังนั้นการออกแบบโฟโตนิกไดโอดเพื่อใช้งานในระบบสื่อสารหรือระบบตรวจจับสัญญาณแสงที่ต้องการความเร็วสูงๆตัวไดโอดต้องมีขนาดของพื้นที่รอยต่อเล็กเพื่อลดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อเนื่องจากค่าความจุไฟฟ้านี้แปรผันโดยตรงกับพื้นที่รอยต่อนั่นเอง ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ไดโอดทำงานได้ช้าลง

5. สรุปและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ลักษณะเด่นของโฟโตนิกไดโอดชนิด p-i-n คือ มีกระแสมืดต่ำ[3] ซึ่งจากผลการทดลองมีกระแสมืด 32nA/mm^2 ที่แรงดันไบอัส -5 V ขนาดของกระแสมืดจะเพิ่มขึ้นกับพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i และแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยที่ความกว้างของชั้น i ที่อยู่ระหว่างรอยต่อ p⁺-i และ n⁺-i มีผลต่อกระแสมืดน้อยมาก เนื่องจากกระแสมืดส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณรอยต่อมากกว่าในเนื้อสาร[4] ดังนั้นขนาดของพื้นที่รอยต่อจึงมีผลต่อกระแสรั่วโดยตรง

กระแสแสงของโฟโตนิกไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง ซึ่งวัดได้ $52.4\ \mu\text{A/mm}^2$ ที่ความเข้มแสง 12000 lx และสังเกตเห็นว่าระยะห่างระหว่างรอยต่อ p⁺-i และ n⁺-i ที่เพิ่มขึ้น จะทำให้กระแสแสงมีค่าลดลง เนื่องจากความกว้างของชั้น i หรือระยะห่างของรอยต่อทั้งสองนี้ทำให้ความต้านทานภายในเนื้อสารมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสแสงมีค่าลดลง

สำหรับพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพของโครงสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ ซึ่งมีผลทำให้เกิดกระแสแสงได้ดีที่สุดคือชั้นรับแสงที่เป็นรอยต่อ p⁺-i ซึ่งเหมาะสำหรับเป็นชั้นรับแสงได้ดีกว่ารอยต่อ n⁺-i และพื้นที่รับแสงชั้น i

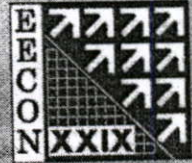
นอกจากนี้ยังพบว่าโฟโตนิกไดโอดที่ต้องการความเร็วในการทำงานสูงๆหรือมีแบนด์วิทสูงจะต้องควบคุมพื้นที่รอยต่อที่เอินให้มีค่าน้อยที่สุด

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนักวิจัยของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน ที่ช่วยเหลือด้านอุปกรณ์เครื่องมือในการทดลองให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Bhattacharya, "Semiconductor Optoelectronic Devices," 2nd Ed., Prentice-Hall, pp.359- 3460, 1997
- [2] J.D.Schaub, D.L.Rogers, M.Yang, S. M. sutak, B.Yang, J.C.Campbell, "Lateral PIN photodiodes for high-speed silicon optical receivers," LEOS Volume16 Number 6, December 2002
- [3] N.Tisnek, V.Sokolov, M.Yli-Koski and P.Kuivalainen, "Detector development," Electron Physics Laboratory (El.Phys.Lab.) April 27, 2004
- [4] สมเกียรติ สุขเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัดน์ ปรวบเขต สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตนิกไดโอดชนิดp-i-n,"การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่28 เล่ม หน้า 1097-1100, 2548



The EECON-29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne

29th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙

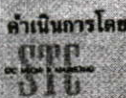
Volume II

- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๕๙

ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี



ดำเนินการโดย ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนาร์ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

Planar p-i-n Silicon Photodiode with Porous Silicon as Anti-Reflection layer

คงศักดิ์ อิมูไร จิรวัดน์ ปราบเขต และสมเกียรติ ศุกเดช

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร. 0-2739-0643 Email:aimurai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนาร์ ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอน ซึ่งสร้างด้วยวิธีการกัดข้อมล (stain etching) เป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) และทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (anti-reflection layer) ของโฟโตไดโอด เนื่องจากชั้นของพอร์ซิลิคอนมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำ และยังสามารถดูดกลืนโฟตอนได้ดี ทำให้โฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) ซึ่งผลการทดลองพบว่า ชั้นพอร์ซิลิคอนสามารถเพิ่มกระแสแสงได้ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในกรณีแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นหลอดฮาโลเจน และสามารถเพิ่มได้มากยิ่งขึ้น ในกรณีของยูวี (UVC: 220-290 nm) คือมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของชั้นกักรัง (p-guard ring) ที่ล้อมรอบชั้นรับแสง p⁻ และตำแหน่งที่เหมาะสมของชั้นกักรัง จากผลการทดลองพบว่า ชั้นกักรังสามารถลดกระแสรั่ว ซึ่งเป็นกระแสรั่วที่ผิวสัมผัสระหว่าง Si/SiO₂ ของโฟโตไดโอดได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : ฟินโฟโตไดโอด, พอร์ซิลิคอน, การกัดข้อมล

Abstract

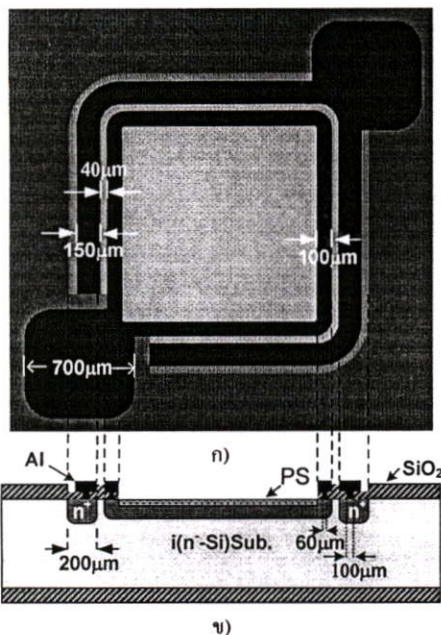
This paper presents the design and fabrication of a silicon planar p-i-n photodiode with stain-etched porous silicon layer as window layer and anti reflection layer. According to the low reflectance and high absorption properties of porous silicon layer then the photodiode with porous silicon layer as anti-reflection layer shows high responsivity. From experimental results it was found that porous silicon layer can increase photocurrent about 40% for the halogen light source, and more than 100% for uvc source (220nm-290nm). In addition, p-guard ring which surrounds the p⁻ active layer can reduce the large surface leakage current of photo diode.

Keyword: p-i-n photodiode, Porous silicon, Stain-etching

1. บทนำ

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n เป็นตัวตรวจจับแสงที่มีสมรรถนะสูง ทั้งคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) ความเร็วในการทำงานสูง (high speed) กระแสรั่วต่ำ (Low dark current) และทนต่อแรงดันไบอัสสูง (high breakdown voltage) [1] ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม การพัฒนาเพื่อให้มีสมรรถนะสูงยิ่งขึ้นก็ยังคงเป็นสิ่งจำเป็น ชั้นพอร์ซิลิคอน (porous silicon) ซึ่งเป็นเนื้อซิลิคอนที่มีรูพรุนจำนวนมาก สามารถสร้างได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายที่สุดและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่ำสุดได้แก่วิธีการกัดข้อมล (stain-etched) ผลึกซิลิคอนในสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริกและกรดไนตริก [2-3] จะทำให้ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นรูพรุนลึกประมาณ 40-100 nm. และชั้นนี้ถูกเรียกว่า พอร์ซิลิคอน จากการศึกษาพบว่าชั้นพอร์ซิลิคอนมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงต่ำ ($\approx 20\%$) และยังมีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนหรือการดักจับแสง (Light trapping) [4-5] ได้ดี ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสง และชั้นลดการสะท้อนแสงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงต่างๆไป

ในการวิจัยนี้ได้ทดลองออกแบบและสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนาร์ ลักษณะเป็นรูปวงแหวน โดยมีชั้น p⁻ เป็นชั้นไวแสง (active region) มีชั้น i และชั้น n⁺ ล้อมรอบเป็นวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 1 ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ได้โฟโตไดโอดที่มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง และยังสามารถนำเอาชั้นของพอร์ซิลิคอนที่สร้างได้จากการกัดข้อมล มาประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงและทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอีกด้วย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของชั้นกักรัง p⁻ (p-guard ring) ที่สร้างขึ้นล้อมรอบชั้นไวแสง p⁻ และศึกษาตำแหน่งที่เหมาะสมของชั้นกักรังที่จะทำให้กระแสรั่วมีค่าต่ำสุด

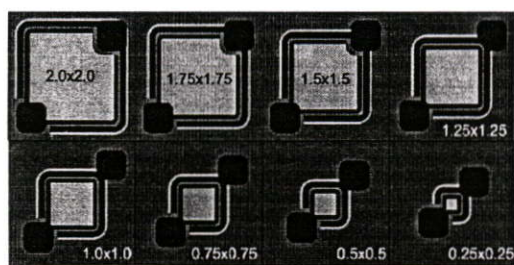


ข)

รูปที่ 1 โฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนียร์ลักษณะรูปร่างวงแหวน ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ก) รูปด้านบน ข) รูปตัดขวาง

2. การออกแบบและการสร้าง

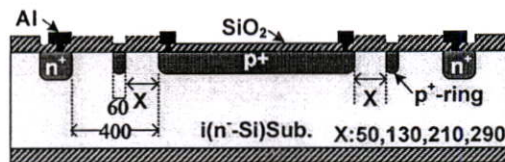
ในการทดลองนี้ได้ออกแบบลวดลายของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนียร์ มีลักษณะเป็นรูปร่างวงแหวน ซึ่งมีขนาดของพื้นที่รับแสงชั้น p⁺ ค่าต่างๆ กัน ดังในรูปที่ 2 โดยมีชั้น n⁺ ล้อมรอบและอยู่ห่างเป็นระยะคงที่ 40 μm หรือก็คือ มีชั้น i⁺ กว้าง 40 μm นั่นเอง และชั้นของพอร์สซิลิคอนถูกสร้างขึ้นบนพื้นที่รับแสงของชั้น p⁺ เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และในการศึกษาผลของชั้นการครีง p⁺ ได้ออกแบบให้ชั้นของการครีงมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบและห่างจากชั้นรับแสง p⁺ ที่ระยะต่างกันคือ 50, 130, 210 และ 290 μm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3



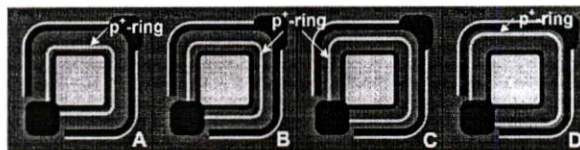
รูปที่ 2 โฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นมีขนาดพื้นที่รับแสงต่างกัน

ขั้นตอนของกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนียร์ เริ่มต้นจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (n⁺ or i-type) ที่มีสภาพต้านทานสูง 2,000 Ω.cm. ระนาบ (111) ชั้นที่ (p⁺-region) และชั้นเอ็น (n⁺-region) ของโฟโตไดโอดสร้างได้โดยการแพร่อะตอม

สารเจือโบรอนและฟอสฟอรัสเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิกโดยใช้เทคนิคการแพร่ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 °C ทำให้ได้ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือในชั้นที่ $7.13 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ และในชั้นเอ็น $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ ตามลำดับ



ก) รูปตัดขวาง

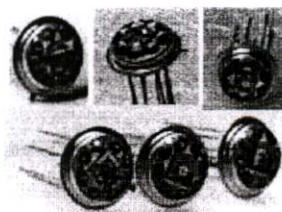


ข) ลักษณะลวดลายด้านบน

รูปที่ 3 โฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีชั้นการครีง p⁺ ล้อมรอบและห่างจากชั้นรับแสง p⁺ ที่ระยะต่างๆ กัน

ชั้นของโลหะอลูมิเนียมถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคการระเหยสารที่ความดัน $2 \times 10^{-6} \text{ Torr}$. และทำการซินเตอร์ริง (Sintering) ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 12 นาที เพื่อให้ได้รอยสัมผัสอหิมะระหว่าง Al-Si ที่ดี และชั้นอะลูมิเนียม ถูกสกัดทำเป็นลวดลายขั้วไฟฟ้าของไดโอดด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ขั้นตอนสุดท้าย ชั้นของพอร์สซิลิคอนถูกสร้างขึ้นเฉพาะบนส่วนผิวของชั้นรับแสง p⁺ ด้วยเทคนิคการเลือกกัดข้อมสึลลิกซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ (selective stain-etching) [6] โดยใช้น้ำยาไวแสง เบอร์ AZ P1818 เป็นชั้นหน้ากากป้องกันผิวหน้า (masking layer) สารสกัดข้อมสึ (stain etching solution) ที่ใช้ประกอบด้วย กรด HF (47 wt.%) กรด HNO₃ (60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3:5 ใช้เวลาในการกัดประมาณ 45 วินาที

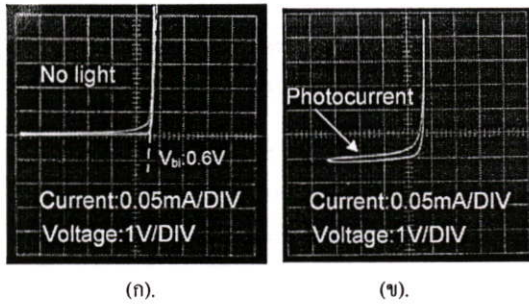
ลักษณะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนียร์ที่สร้างเสร็จ และถูกนำไปติดตั้งลงบนตัวถังแบบกระป๋องเพื่อการวัดและทดสอบคุณสมบัติแสดงดังในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนียร์ที่สร้างเสร็จ และถูกนำไปติดตั้งลงบนตัวถังแบบกระป๋อง

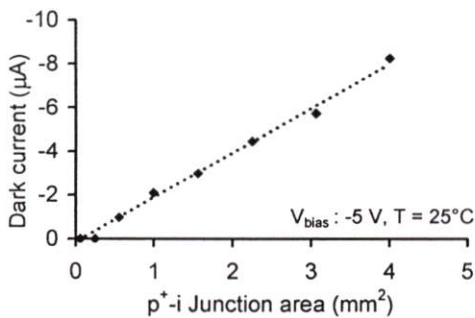
3. การทดลองและผลการทดลอง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่สร้างได้ ถูกนำไปวัดและทดสอบ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงด้วยเครื่อง Transistor-Curve tracer ที่สามารถวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันได้ ทั้งขณะไม่ได้รับแสงและขณะได้รับความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีลักษณะสมบัติเป็นโฟโตไดโอดที่ดี มีกระแสมืดต่ำและแรงดันพังทลายสูงกว่า 100 โวลต์



รูปที่ 5 ภาพถ่ายกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด (ก) ขณะไม่ได้รับแสง และ (ข) ขณะได้รับความเข้มแสงค่าหนึ่ง

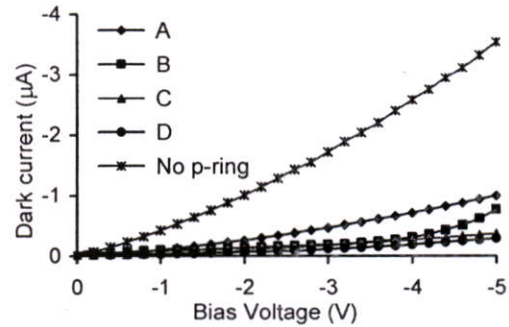
จากการทดลองในกรณีโฟโตไดโอดไม่ได้รับการฉายแสง กระแสมืดของโฟโตไดโอด จะเพิ่มขึ้นตามขนาดพื้นที่ของรอยต่อ ดังผลการทดลองในรูปที่ 6



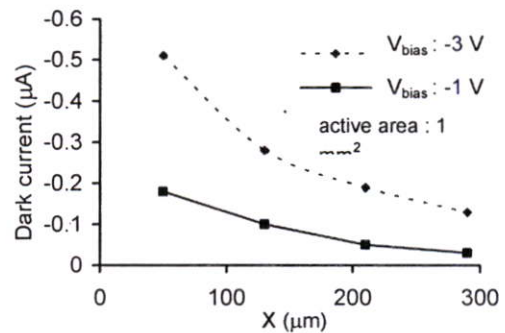
รูปที่ 6 กระแสมืดของโฟโตไดโอดแบบพลาเนอร์ที่มีขนาดพื้นที่ของรอยต่อ p⁺-i ค่าต่างๆ

และเพื่อการศึกษาผลของชั้นการ์คริง p⁺ ที่อยู่ล้อมรอบชั้นรับแสง p⁻ ของโฟโตไดโอด กระแสมืดของโฟโตไดโอดที่มีชั้นการ์คริงซึ่งอยู่ห่างจากชั้นรับแสง p⁺ เป็นระยะต่างๆ คือ 50, 130, 210 และ 290µm ตามลำดับ และไดโอดที่ไม่มีชั้นการ์คริงถูกวัดที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ และนำมาเปรียบเทียบ ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7

ผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าชั้นการ์คริง p⁺ สามารถลดกระแสมืด ซึ่งเป็นกระแสรั่วที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นซิลิคอนกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Si/SiO₂ interface leakage) [7] ของโฟโตไดโอดแบบพลาเนอร์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสมืดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อชั้นการ์คริง p⁺ อยู่ห่างจากชั้นรับแสง p⁻ หรือเมื่อมีระยะเข้าไปใกล้ชั้น n⁺ ดังแสดงในรูปที่ 8

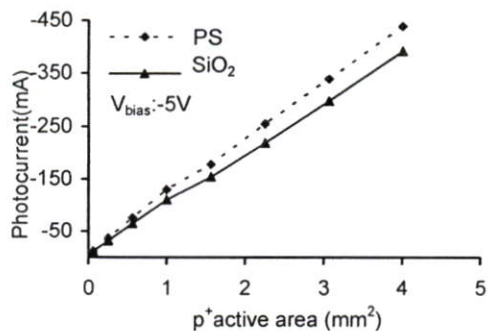


รูปที่ 7 กระแสมืดที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆของโฟโตไดโอดที่มีชั้นการ์คริงอยู่ห่างจากชั้นรับแสง p⁺ เป็นระยะต่างๆและไดโอดที่ไม่มีชั้นการ์คริง



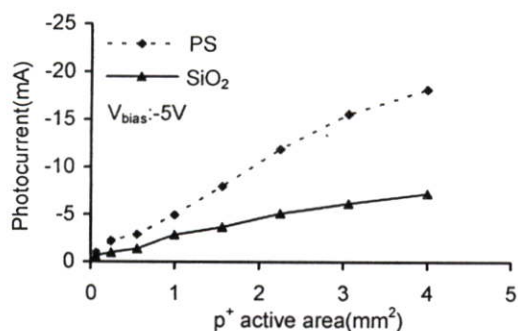
รูปที่ 8 กระแสมืดของโฟโตไดโอดที่มีชั้นการ์คริง p⁺ ล้อมรอบและอยู่ห่างจากชั้นรับแสงเป็นระยะต่างๆ

ในกรณีที่โฟโตไดโอดได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 9000 lux กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด และโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นหน้าต่าง และชั้นลดการสะท้อนแสง จะสามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง กล่าวคือโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสง p⁺ ตั้งแต่ 0.5 mm² ถึง 4.0 mm² มีกระแสเพิ่มประมาณ 10% ถึงและ 40% ดังผลการทดลองในรูปที่ 9



รูปที่ 9 กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอน และชั้น SiO₂ หนา 700 Å เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และมีพื้นที่รับแสง p⁺ ขนาดต่างๆ

ในกรณีที่โฟโตไดโอดได้รับแสงยูวี (UVC) กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง จะมีค่าสูงกว่า โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นได้ว่าพื้นที่รับแสง p⁺ 2.0 mm² มีกระแสเพิ่มประมาณ 130% และเมื่อพื้นที่รับแสง p⁺ เพิ่มขึ้นเป็น 4.0 mm² มีกระแสเพิ่มขึ้นประมาณ 150.89% ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอน และชั้น SiO₂ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และมีพื้นที่รับแสง p⁺ ขนาดต่างๆ ขณะได้รับแสงยูวี (UVC)

ผลการทดลองในรูปที่ 9 และ 10 จะเห็นว่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีค่าสูงกว่าของโฟโตไดโอดแบบทั่วไปที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยสูงกว่าประมาณ 10% ขึ้นไป ในกรณีของแสงจากหลอดฮาโลเจน และสูงกว่าประมาณ 100% ขณะได้รับแสงยูวี (UVC) ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอร์ซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนที่ต่ำและใกล้เคียงกับของซิลิคอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังเป็นชั้นที่สามารถดักจับแสงได้ดีอีกด้วย โดยเฉพาะแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV)

4.สรุปผลการทดลอง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน จากการ

ทดลองพบว่า เมื่อโฟโตไดโอดไม่ได้รับแสง กระแสมืดหรือกระแสรั่วของโฟโตไดโอดจะเพิ่มขึ้นกับขนาดของไดโอด และชั้นการเรียง p⁺ ที่เป็นวงแหวนล้อมรอบชั้นรับแสง p⁺ สามารถลดกระแสรั่วที่ชั้นผิวสัมผัส Si/SiO₂ ได้เป็นอย่างดี และตำแหน่งของชั้นการเรียงที่อยู่ห่างออกไปจากชั้นรับแสง p⁺ จะทำให้กระแสมืดยังมีค่าต่ำ ในกรณีที่โฟโตไดโอดได้รับแสง กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นกับขนาดพื้นที่รับแสง และโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง จะสามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่า โฟโตไดโอดแบบทั่วไปที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง นอกจากนี้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาเนอร์ ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ยังสามารถตอบสนองกับสเปกตรัมช่วงกว้าง (wide spectrum) ได้ดี เช่นตอบสนองกับแสงยูวีได้ดีกว่า ผลการทดลองนี้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอด หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงอื่นๆ โดยใช้ชั้นพอร์ซิลิคอนที่ได้จากการกัดด้วยซี

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ สุขเกษ คงศักดิ์ อัมอุไร จิรวัดน์ ปรานเขต สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, หน้า1097-1100..2548
- [2] A. Gee. J. Electrochem. Soc. (USA). vol.107. 1960. pp.787
- [3] R.J. Archer. J. Phys. Chem. Solids (UK). vol.35. 1956. pp.333
- [4] A. Uhlir, “Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid,” Tech. J., vol.35, pp. 333,1956
- [5] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb, “Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics,” Photovoltaics Specialists Conference., pp.287-293, 10-14 May 1993
- [6] สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ สุขเกษ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ การเลือกสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดด้วยซี,” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 , Vol.2. page1109-1112. 2548
- [7] Wang, Hongbo, “Silicon X-ray smart sensor micromodule and microsystem,” University of Oulu, Finland Oulu, Finland 2002



คงศักดิ์ อัมอุไร ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



จิรวัดน์ ปรานเขต ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



รศ.ดร.สมเกียรติ สุขเกษ, รองศาสตราจารย์ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ประวัติผู้เขียน

| | |
|--------------------|--|
| ชื่อ-นามสกุล | นายคงศักดิ์ อิ่มอุไร |
| วัน เดือน ปีเกิด | 9 กรกฎาคม 2522 จังหวัดตราด |
| ที่อยู่ | 23 หมู่ 1 ต. เนินทราย อ. เมือง จ. ตราด 23000 โทรศัพท์ 0-3954-0195 |
| ประวัติการศึกษา | พ.ศ. 2546 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง |
| ความชำนาญเฉพาะด้าน | - สิ่งประดิษฐ์ สารกึ่งตัวนำ - การออกแบบและกระบวนการสร้างซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด p-i-n |

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] สมเกียรติ สุขเดช, คงศักดิ์ อิ่มอุไร, จิรวัดน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “กระบวนการสร้างและ คุณสมบัติของซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด p-i-n” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 (EECON 28), Vol.2, หน้า 1109-1112, โรงแรม เฟิร์ล วิจเล็จ, ภูเก็ต, 20-21 ตุลาคม, 2548.
- [2] คงศักดิ์ อิ่มอุไร และ สมเกียรติ สุขเดช. “การศึกษาพื้นที่ไวแสงประสิทธิภาพของซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์” วิศวกรรมลาดกระบัง ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน 2549.
- [3] คงศักดิ์ อิ่มอุไร, จิรวัดน์ ปราบเขต และ สมเกียรติ สุขเดช. “ซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาแนร์ที่มีชั้นพอร์ตซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON 29), Vol.2, หน้า 1181-1184, โรงแรมแอมบาสเคอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา, 9-10 พฤศจิกายน, 2549.