

ศึกษากระบวนการสร้างและโครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n  
STUDY ON FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF  
SILICON PHOTO p-i-n DIODES



นายจิรวัดน์ ปราบเขต  
นายวสุ สังข์ทอง

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 61997  
วัน,เดือน,ปี 25 ก.ค. 2549

b.....  
n.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษากระบวนการสร้างและโครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n  
STUDY ON FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF  
SILICON PHOTO p-i-n DIODES



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2547

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2547

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ ศึกษากระบวนการสร้างและ โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอด แบบ p-i-n

STUDY ON FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF  
SILICON PHOTO p-i-n DIODES

นักศึกษาผู้จัดทำ

1. นายจิรวัดน์ ปราบเขต รหัส 45015227
2. นายวสุ สังข์ทอง รหัส 45015250

ปริญญาานิพนธ์นี้ ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(รศ. ดร. สมเกียรติ สุภเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์

ศึกษากระบวนการสร้างและโครงสร้างซิลิคอน โฟโตไดโอด แบบ P-I-N  
STUDY ON FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF  
SILICON PHOTO P-I-N DIODES

นักศึกษาผู้จัดทำ

1. นาย จิรวัดน์ ปราบเขต รหัส 45015227

2. นาย วสุ สังข์ทอง รหัส 45015250

โครงการได้รับการตรวจสอบแล้ว พร้อมทั้งจะทำการสอบได้

( รศ. ดร. สมเกียรติ สุภเดช )

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์      ศึกษากระบวนการสร้างและ โครงสร้างซิลิคอน โฟโตไดโอด แบบ p-i-n

นักศึกษาผู้จัดทำ      นายจิรวัดน์    ปราบเขต    รหัส 45015227  
    นายวสุ            สัจข์ทอง    รหัส 45015250

อาจารย์ที่ปรึกษา      รศ. ดร. สมเกียรติ    ศุภเดช  
 ปีการศึกษา              2547



มีการศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ซึ่งสามารถตอบสนองต่อความถี่สูงและนำไปประยุกต์ใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ได้ดี เนื่องจากเป็น โครงสร้างที่มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำจึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจทำการศึกษา ในโครงการนี้จะกล่าวถึงการออกแบบและกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n และผลของพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยที่โฟโตไดโอดที่มีกระแสสูงสุดสร้างโดยการใช้เวลาขั้วลิกชั้น p เป็นเวลา 50 นาที ใช้เวลาขั้วลิกชั้น n เป็นเวลา 7 ชั่วโมง และขนาดของพื้นที่รอยต่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร มีกระแสมีดเท่ากับ  $1 \mu A$ . เมื่อวัดที่ความเข้มแสง 8000 lx. มีกระแสแสงเท่ากับ 1 mA. และโฟโตไดโอดที่มีการตอบสนองความถี่สูงสุดโดยขนาดของพื้นที่รอยต่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร มีความต้านทานโหลด  $1K \Omega$  มีค่าความถี่ตอบสนองเท่ากับ 250 KHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Thesis Title** STUDY ON FABRICATION AND CHARACTERIZATION OF SILICON PHOTO p-i-n DIODES

**Authors** Mr. Jirawat Prabket 45015227

Mr. Wasu Sangtong 45015250

**Thesis Advisor** Assoc.Prof.Dr. Somkiat Supadech (Advisor)

**Year** 2004

### ABSTRACT

There have been extensive studies of the silicon photo p-i-n diodes characteristics it can be response at high frequency and apply for electronics circuit. Because of low capacitance in structure then device is interesting for studied. So that in the project deals with design and fabrication process of silicon photo p-i-n diodes and the result of optimum parameters. The maximum output current of photo p-i-n diodes in this project was fabrication on i-type silicon with p-layer drive-in 50 minutes, n-layer drive-in 7 hours and a 3 mm. diameter of junction area has dark current 1  $\mu$  A. For case of photo effect at 8000 lx., the photodiode has photocurrent 1 mA. The maximum frequency responses of photodiode with a 0.5 mm. diameter of junction area has frequency responses 250 KHz.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณ  
 อาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. สมเกียรติ คุภเดช ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา  
 รวมทั้งรายละเอียดต่างๆที่เกี่ยวข้องกับปริญญานิพนธ์นี้

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท สำหรับความช่วยเหลือและดูแลการทำงานใน  
 ทุกๆเรื่อง ทั้งคำปรึกษา ตลอดจนคำชี้แนะ รวมทั้งรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกัปริญญานิพนธ์  
 รวมถึงเพื่อนๆทุกคน และทุกกำลังใจที่ให้ตลอดมา

ขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้ปริญญานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

จิรายุทธ งามวิมล

( นายจิรายุทธ งามวิมล )

ดร. สัมฤทธิ์

( นายวสุ สัมฤทธิ์ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

|  | หน้า |
|--|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย  | I    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ   | II   |
| กิตติกรรมประกาศ  | III  |
| สารบัญ   | IV   |
| สารบัญรูป  | V    |
| สารบัญตาราง  | VI   |
| บทที่ 1 บทนำ   | 1    |
| 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย  | 1    |
| 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย   | 2    |
| บทที่ 2 ทฤษฎี  | 3    |
| 2.1 สารกึ่งตัวนำ   | 3    |
| 2.2 รอยต่อพี-เอ็น  | 8    |
| 2.2.1 รอยต่อพี-เอ็น ในภาวะสมดุลย์  | 9    |
| 2.2.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับ โบอิ์ตรง  | 13   |
| 2.2.3 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับแรงดันโบอิ์ย้อนกลับ  | 14   |
| 2.2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อ                                   | 16   |
| 2.3 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจจับแสง   | 19   |
| 2.4 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n   | 22   |
| 2.5 ความเร็วตอบสนอง  | 25   |
| บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง   | 27   |
| 3.1 การสร้างกระจกต้นแบบ  | 27   |
| 3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n  | 31   |
| บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง   | 41   |
| 4.1 การทดลองหาคูณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแส<br>และแรงดันของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n | 41   |
| 4.1.1 ศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อมีผลต่อกระแสขณะมืด ( $I_{\text{DARK}}$ )                | 41   |
| 4.1.2 ศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อมีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ )                               | 47   |
| 4.1.3 ศึกษาผลของความถี่ของรอยต่อ p-i ที่มีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ )                        | 52   |
| 4.1.4 ศึกษาผลของระยะของชั้น i ที่มีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ )                               | 54   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| 4.2 การทดลองหาคณสมบัติการตอบสนองความถี่ของซิติคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n | 56   |
| 4.2.1 การศึกษาผลขนาดพื้นที่รอยต่อการตอบสนองความถี่                   | 56   |
| 4.2.2 การศึกษาผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่             | 57   |
| บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง                                     | 59   |
| บรรณานุกรม   | 61   |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 1.1 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n  | 2    |
| รูปที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำ (ก) และ<br>(ข) แสดงภาพสองมิติของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ  | 4    |
| รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแบบ 3 มิติ  | 5    |
| รูปที่ 2.3 แสดงภาพสองมิติของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก   | 5    |
| รูปที่ 2.4 แสดงสัญลักษณ์ของอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและพี   | 6    |
| รูปที่ 2.5 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดเอ็น และ<br>(ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ 0 K | 7    |
| รูปที่ 2.6 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดพี และ<br>(ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ 0 K     | 8    |
| รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น  | 8    |
| รูปที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น   | 10   |
| รูปที่ 2.9 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน  | 12   |
| รูปที่ 2.10 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น   | 12   |
| รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะ<br>ได้รับแรงดันไบอัสตรง $V_A$  | 13   |
| รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะ<br>ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ   | 14   |
| รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะ<br>ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ  | 15   |
| รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น  | 16   |
| รูปที่ 2.15 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด (ก) การให้ไบอัสแก่โฟโตไดโอดและ<br>(ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง                              | 17   |
| รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n  | 22   |
| รูปที่ 2.17 แสดงภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n  | 22   |
| รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอด<br>พาหะ สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและศักดาไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับ               | 23   |
| รูปที่ 2.19 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอดแบบ p-i-n (ก) การให้ไบอัส<br>แก่ไดโอดและ (ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง                        | 24   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

|  | หน้า |
|--|------|
| รูปที่ 3.1 ลักษณะมาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร์สารเจือ   | 28   |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะ มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ   | 28   |
| รูปที่ 3.2 ลักษณะมาส์กที่ 3 สร้างลวดตายอะลูมิเนียม   | 28   |
| รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n   | 40   |
| รูปที่ 3.5 ลักษณะซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ได้จากการสร้าง   | 41   |
| รูปที่ 3.6 ลักษณะซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ต่อสายแล้ว   | 41   |
| รูปที่ 4.1 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล  | 42   |
| รูปที่ 4.2 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 303 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง  | 42   |
| รูปที่ 4.3 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 305 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง  | 43   |
| รูปที่ 4.4 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 307 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง  | 43   |
| รูปที่ 4.5 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 503 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง  | 44   |
| รูปที่ 4.6 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 505 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง  | 44   |
| รูปที่ 4.7 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 507 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง   | 45   |
| รูปที่ 4.8 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 703 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง  | 45   |
| รูปที่ 4.9 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 705 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง  | 46   |
| รูปที่ 4.10 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 707 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง | 46   |
| รูปที่ 4.11 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 303 305 และ 307  | 47   |
| รูปที่ 4.12 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 503 505 และ 507   | 47   |
| รูปที่ 4.13 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ $I_{DARK}$ ของหมวด 703 705 และ 707   | 48   |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

|   |    |
|---|----|
| รูปที่ 4.14 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 303                  | 48 |
| รูปที่ 4.15 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 305                  | 49 |
| รูปที่ 4.16 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 307                  | 49 |
| รูปที่ 4.17 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 503                  | 50 |
| รูปที่ 4.18 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 505                  | 50 |
| รูปที่ 4.19 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 507                  | 51 |
| รูปที่ 4.20 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 703                  | 51 |
| รูปที่ 4.21 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 705                  | 52 |
| รูปที่ 4.22 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ $I_L$ ขณะที่มีความเข้มต่างกันของ<br>หมวด 707                  | 52 |
| รูปที่ 4.23 แสดงผลของความสัมพันธ์ของรอยต่อ $p-i$ ที่มีผลต่อค่าของ $I_L$ ของหมวด<br>303 503 และ 703 ตามลำดับ | 53 |
| รูปที่ 4.24 แสดงผลของความสัมพันธ์ของรอยต่อ $p-i$ ที่มีผลต่อค่าของ $I_L$ ของหมวด<br>305 505 และ 705 ตามลำดับ | 54 |
| รูปที่ 4.25 แสดงผลของความสัมพันธ์ของรอยต่อ $p-i$ ที่มีผลต่อค่าของ $I_L$ ของหมวด<br>307 507 และ 707 ตามลำดับ | 54 |
| รูปที่ 4.26 แสดงผลของระยะของชั้น $i$ ที่มีผลต่อค่าของ $I_L$ ของหมวด 303 305<br>และ 307 ตามลำดับ             | 55 |
| รูปที่ 4.27 แสดงผลของระยะของชั้น $i$ ที่มีผลต่อค่าของ $I_L$ ของหมวด 503 505<br>และ 507 ตามลำดับ             | 56 |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

หน้า

|  |    |
|--|----|
| รูปที่ 4.28 แสดงผลของระยะของชั้น $i$ ที่มีผลต่อค่าของ $I_L$ ของหมวด 703 705 และ 707 ตามลำดับ | 56 |
| รูปที่ 4.29 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของซิลิคอนโพโตไดโอดแบบ p-i-n                     | 57 |
| รูปที่ 4.30 แสดงผลของขนาดพื้นที่รอยต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 503                           | 57 |
| รูปที่ 4.31 แสดงผลของขนาดพื้นที่รอยต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 507                           | 58 |
| รูปที่ 4.32 แสดงผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 307                        | 58 |
| รูปที่ 4.33 แสดงผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 503                        | 59 |
| รูปที่ 4.34 แสดงผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 507                        | 59 |



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ 300 K

หน้า

20



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

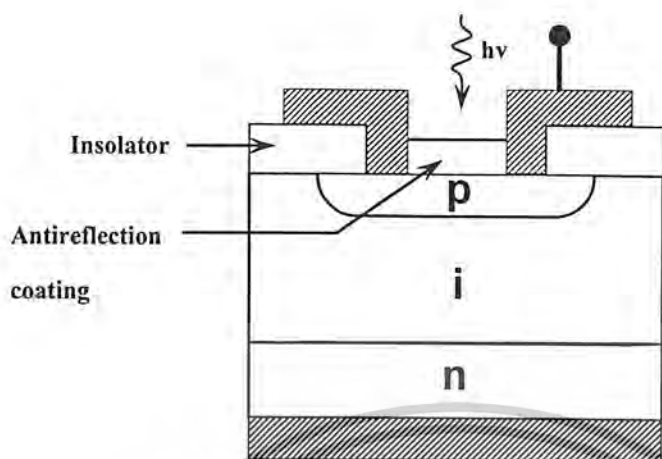
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพลังแสง ( Optical Semiconductor Device ) และงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ( Optical Electronics ) เป็นงานที่ได้รับการพัฒนา และก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทั้งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทุกๆ ด้านอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง ( Opto-Communication System ) การสื่อสารระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งความเร็ว ความแม่นยำ และความประหยัด เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิม สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพลังแสงที่สำคัญได้แก่ โฟโตดีเทกเตอร์ ( Photo Detector ) หรือตัวตรวจวัดแสง โฟโตไดโอด ( Photo Diode ) หรือไดโอดพลังงานแสงชนิดต่างๆ เช่น โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ( p-i-n Photo Diode ) โฟโตไดโอดแบบอะวาแลนซ์ ( Avalanche Photo Diode :APD ) โฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพลังแสงมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือกระแสซึ่งจะนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พลังแสงจะต้องมีคุณสมบัติการดูดกลืนแสง ( Optical absorption ) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ดี และสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ในวงจรได้ดี เช่น เยอรมันเนียม ( Ge ) ซิลิคอน ( Si ) และแกลเลียมอาเซไนด์ ( GaAs ) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงมากที่สุดเพราะ ตอบสนองความถี่ที่สูงๆ ได้ดีกว่าซิลิคอน ในงานนี้เราจะมาทำการศึกษากระบวนการสร้างโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ p-i-n ซึ่งเป็นการใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างเป็น ซิลิคอน ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ ( GaAs ) และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง

โฟโตไดโอดแบบ p-i-n เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง และอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา มีลักษณะโครงสร้างประกอบด้วย p ส่วน i และส่วน n แต่มีมีขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้ว คือขั้ว p เป็นแอโนด และขั้ว n เป็นขั้วแคโทด สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงคือ แกลเลียมอาเซไนด์เพราะว่ามีคุณสมบัติที่ดีคือ มีแถบพลังงานแบบช่องตรง ( Direct Band Gap ) ซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนที่แถบพลังงานเป็นแบบช่องไม่ตรง ( Indirect Band Gap ) พลังงานแสงที่ต้องการจะให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในการนำกระแสของแกลเลียมอาเซไนด์จึงน้อยกว่าของซิลิคอนและการตอบสนองความถี่ที่ดีกว่าอีกด้วย แต่ถึงอย่างไรซิลิคอนก็มีข้อดีที่น่าสนใจหลายอย่างเช่น กระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า ราคาที่ถูกกว่า อีกทั้งกระบวนการสร้างวงจรรวมที่ใช้ในปัจจุบันก็ใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 โครงสร้างซีลิกอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานมีดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n
2. ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n
3. ศึกษาการออกแบบโฟโตไดโอดแบบ p-i-n
4. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบ p-i-n ด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2 ทฤษฎี

### 2.1 สารกึ่งตัวนำ

ปัจจุบันนี้เป็นยุคของสารกึ่งตัวนำโดยแท้จริง เพราะอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำคือจักรกลสำคัญของไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ทุกสาขา อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลายชนิดแต่ชนิดจะให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้ในหน้าที่ต่างๆอย่างกว้างขวาง เพื่อความเข้าใจในเรื่องราวของอุปกรณ์สารกึ่งนำอย่างถ่องแท้ จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและความรู้ทั่วไปของสารกึ่งตัวนำ

วัสดุต่างๆที่มีอยู่ในโลกนี้ อาจพิจารณาจัดแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 หมู่ คือ

1. วัสดุตัวนำ (Conductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
2. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวนแต่เลวกว่าตัวนำ เช่น ซิลิคอน เยอรมันเนียม เป็นต้น
3. วัสดุฉนวน (Insulator) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดี เช่น แก้ว เบกาไลต์ ไมกา เป็นต้น

สารกึ่งตัวนำอาจพิจารณาจัดกลุ่มและจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ๆที่สำคัญได้เป็น 3 ประเภทดังนี้คือ

#### 1. สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว (Element semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ ธาตุต่างๆในหมู่ที่ IV ของตารางพีริออดิกของธาตุ (Periodic table of element) เช่น ซิลิคอน (Si) เยอรมันเนียม (Ge) เป็นต้น สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวที่นิยมนำไปใช้มากที่สุดได้แก่ ซิลิคอน โดยสามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้แทบทุกชนิด

#### 2. สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ (Compound semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้เกิดขึ้นจากสารประกอบของธาตุสองธาตุ ได้แก่ สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ III และหมู่ที่ V เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs), แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP) เป็นต้น สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ II และหมู่ที่ VI เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), แคดเมียมซีรีไนด์ (CdSe) เป็นต้น สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ IV และหมู่ที่ VI เช่น ลีดซัลไฟด์ (PbS), ลีดเทลลูไรด์ (PbTe) เป็นต้น สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ IV สองชนิด เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

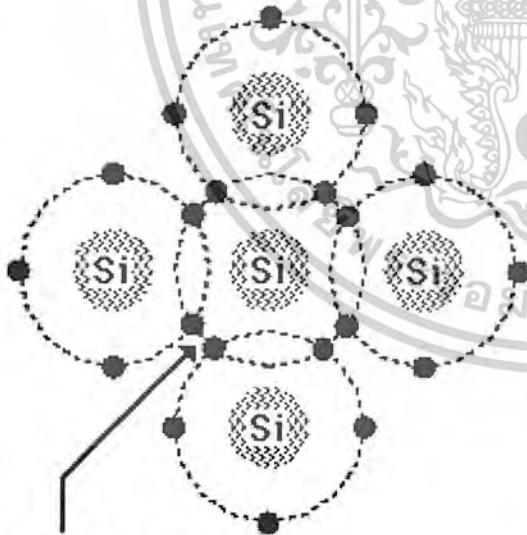
### 3. สารกึ่งตัวนำประเภทสารอัลลอย (Alloy semiconductor)

ได้แก่อัลลอยที่เกิดจากธาตุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป

ในบรรดาวัสดุไฟฟ้า เช่น ตัวนำ, ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจมากที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆ แตกต่างจากตัวนำและฉนวน คุณสมบัติที่เห็นได้ชัดก็คือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ จะเปลี่ยนแปลงได้โดยง่ายกับอุณหภูมิหรือแสงจากภายนอก และที่สำคัญเมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือปนลงไปแม้เพียงเล็กน้อย ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีเฉพาะในสารกึ่งตัวนำเท่านั้น

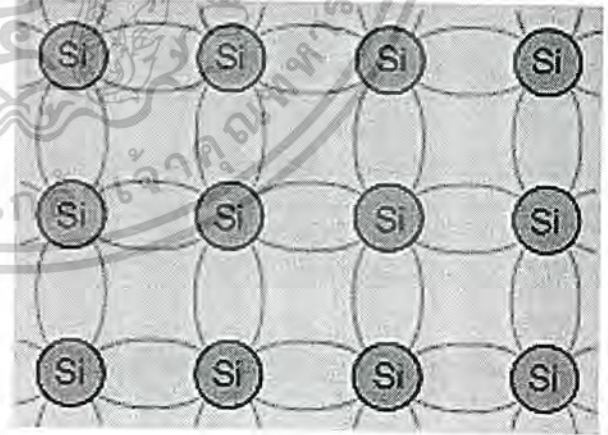
#### โครงสร้างผลึกสารกึ่งตัวนำ

เมื่ออะตอมหลายๆ อะตอมเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกัน อะตอมดังกล่าวจะยึดเกาะเกี่ยวซึ่งกันและกัน เพื่อรวมตัวเป็นโมเลกุล การเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมของธาตุนี้เรียกว่า บอนด์ (bond) ซึ่งบอนด์ดังกล่าว จะเกิดระหว่างอะตอมที่อยู่ใกล้เคียง สำหรับกรณีของสารกึ่งตัวนำการเกาะเกี่ยวของอะตอมจะเป็นแบบที่เรียกว่า โควาเลนต์บอนด์ (covalent bond) โดยที่อะตอมซึ่งอยู่ใกล้เคียงกันจะใช้ อิเล็กตรอนร่วมกันเพื่อให้อะตอมอยู่ในสถานะที่มั่นคง



Shared electrons  
of a covalent  
bond.

(ก)



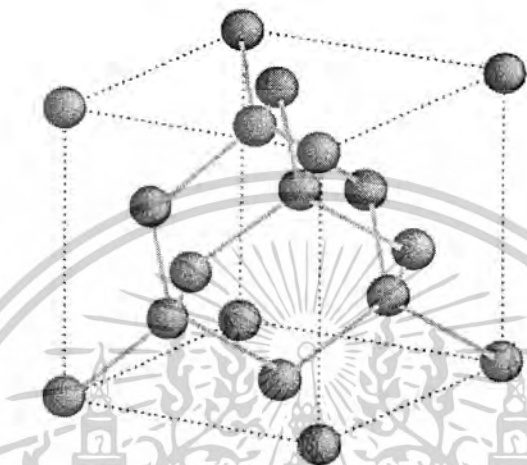
(ข)

รูปที่ 2.1 แสดงสัญลักษณ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำ (ก) และ(ข)แสดงภาพสองมิติของโครงสร้างผลึก

ของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

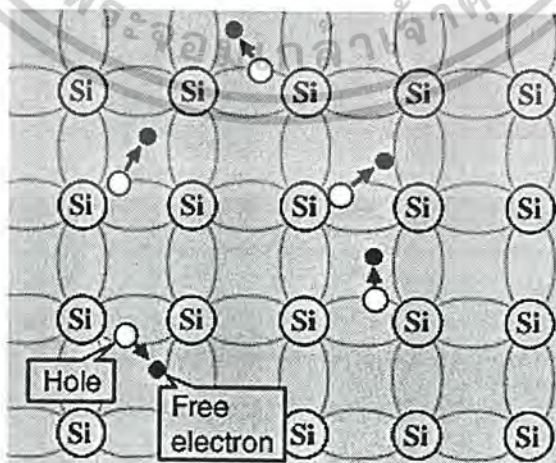
แต่ละอะตอมของสารกึ่งตัวนำจะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นนอกสุดจำนวน 4 อิเล็กตรอนหรือที่นิยมเรียกว่า วาเลนซ์อิเล็กตรอน (valence electron) เมื่ออะตอมเข้ามาเกาะเกี่ยวกันและอยู่ในลักษณะผลึก (Crystal) อะตอมหนึ่งๆจะเกาะเกี่ยวแบบโควาเลนต์กับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม



รูปที่ 2.2 แสดงลักษณะ โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแบบ 3 มิติ

ชนิดของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิด คือ

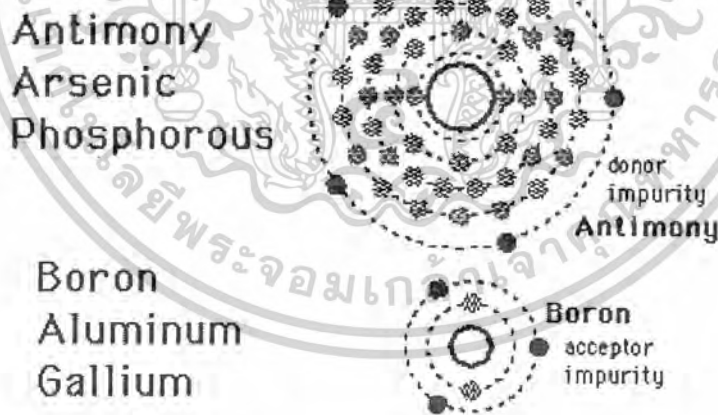
1. สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (Intrinsic semiconductor) บางครั้งถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิด i (i-Type Semiconductor) หมายถึง สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ กล่าวคือ ปราศจากการเจือปนด้วยอะตอมแปลกปลอม หรืออะตอมเจือปน (Impurity atom)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่มอบไว้สำหรับเรียนรู้และใช้เพื่อการศึกษานี้ ไม่สามารถนำออกนอกห้องเรียนได้โดยไม่ได้รับอนุญาต  
รูปที่ 2.3 แสดงภาพสองมิติของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และโฮลมีค่าน้อย ซึ่งถ้าคำนวณเป็นค่าความนำไฟฟ้าแล้วจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุตัวนำมาก และในทางปฏิบัติ เพื่อให้สารกึ่งตัวนำสามารถถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น การนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ จำเป็นที่จะต้องเติมอะตอมสารเจือ ซึ่งผลของอะตอมสารเจือที่เติมจะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นอย่างมากมาย และยังสามารถควบคุมค่า ความนำไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งสามารถเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุอื่นว่าสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor)

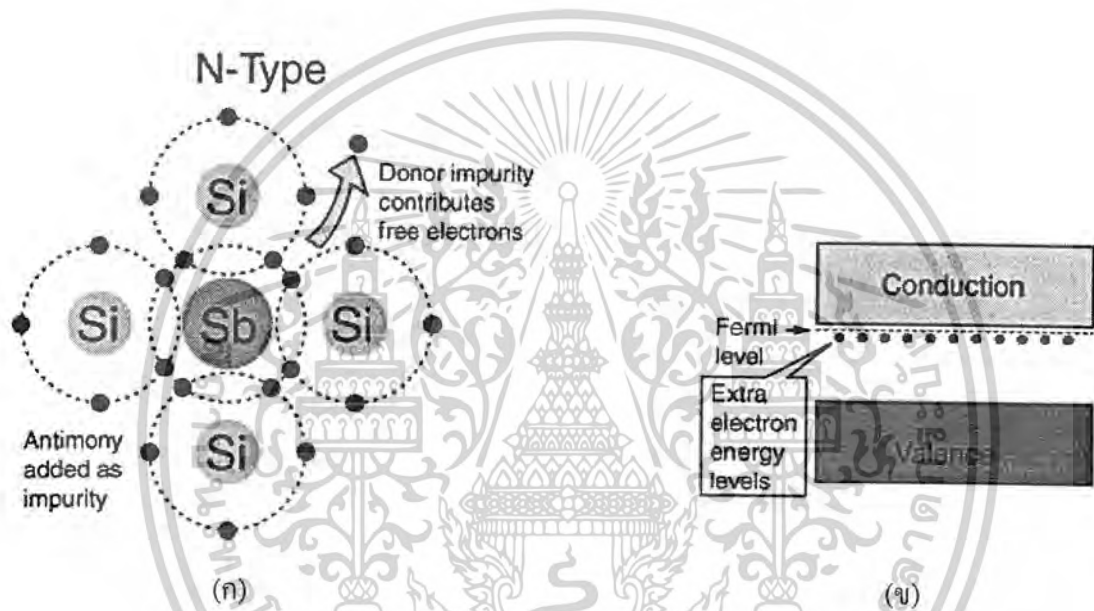
อะตอมสารเจือ (Impurity atoms) หมายถึง อะตอมของธาตุในกลุ่มที่ III หรือกลุ่ม V ของตารางพีริออดิกของธาตุ ซึ่งใช้เติมลงไปผลึกสารกึ่งตัวนำ ด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้พาหะ เช่น อิเล็กตรอนหรือโฮล และปริมาณของพาหะตามที่ต้องการ อะตอมที่นำมาเป็นสารเจือควรจะต้องมีขนาดของอะตอม และคุณสมบัติกายภาพที่ใกล้เคียงกับอะตอมสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำได้ อะตอมสารเจืออาจถูกจัดแบ่งเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คือ



รูปที่ 2.4 แสดงสัญลักษณ์ของอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและพี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

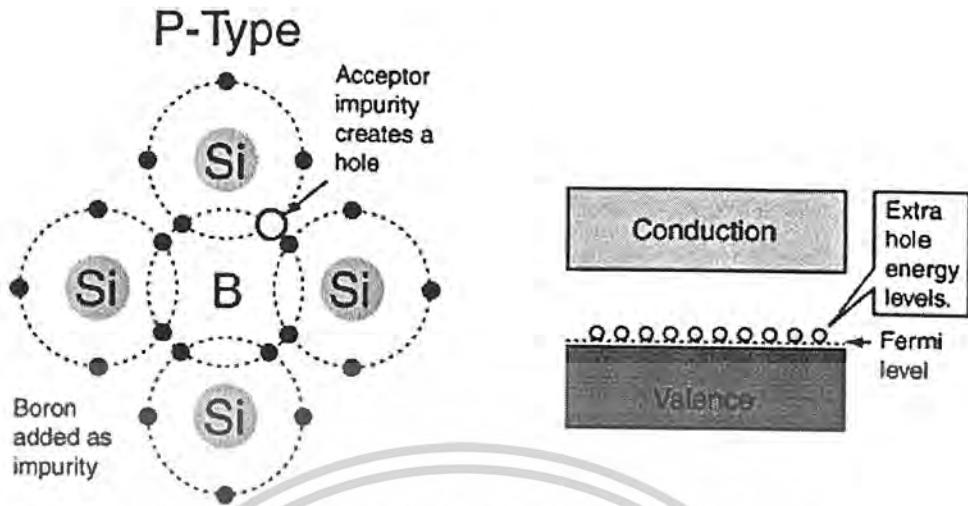
(ก) อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (n-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส (P), สารหนู (As), พลวง (Sb) และบิสมัท (Bi) เป็นต้น และที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน ดังนั้น บางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้ให้” (Donor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ ถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้จะมีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมาก อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้าทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น” (n-Type Semiconductor) คำว่า เอ็น (n: Negative charge) หมายถึง ประจุลบ



รูปที่ 2.5 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดเอ็น และ (ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ 0 K

(ข) อะตอมสารเจือชนิดพี (p-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ III ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น โบรอน (B), อะลูมิเนียม (Al), อินเดียม (In) และแกลเลียม (Ga) เป็นต้น และที่นิยมใช้งานมาก ได้แก่ โบรอน (B) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้โฮลหรือผู้รับอิเล็กตรอน ดังนั้น บางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้รับ” (Acceptor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้รับจะมีปริมาณโฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โฮลจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า ทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดพี” (p-Type Semiconductor) คำว่า พี (p: Positive charge) หมายถึง ประจุบวก

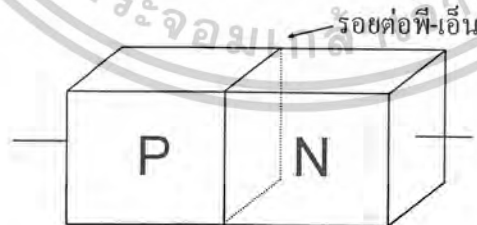
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดพี และ (ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ 0 K

## 2.2 รอยต่อพี - เอ็น

การสร้างรอยต่อพี-เอ็นในการสร้างไดโอด มักใช้วิธีการแพร่สารเจือปน (impurity) ชนิด เอ็นหรือพีเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดที่ตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.7 แสดงลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น

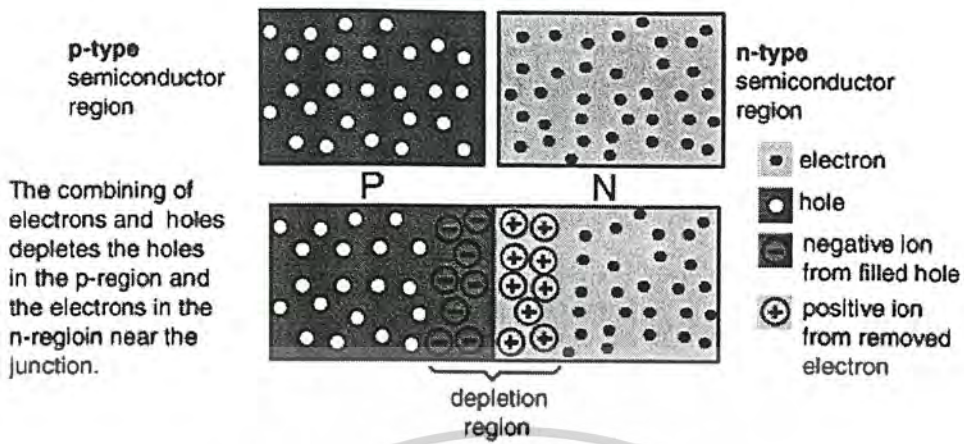
### 2.2.1 รอยต่อพี - เอ็นในภาวะสมดุลย์

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น และพอสรุปได้ดังนี้คือ เนื่องจากโหนดทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P-type) มีความหนาแน่นมากกว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิด พี (n-type) มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นด้วยความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกันนี้เอง จะทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่ซึ่งมีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านที่ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า กล่าวคือ โฮลทางด้านพีในบริเวณใกล้รอยต่อ จะแพร่เข้าไปในด้านเอ็นและอิเล็กตรอน ทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้รอยต่อ จะแพร่เข้าไปทางด้านพี การแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อ พี-เอ็น และสิ่งที่ตามมาคือจะมีการรวมตัว(recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนผลจากการรวมตัวของประจุพาหะทั้งสองนี้ จะทำให้อะตอมของสารเจือบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อ พี - เอ็น กลายเป็นไอออน (ion) และแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาได้ กล่าวคืออะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอน อะตอมนี้จึงแสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้อะตอมนี้แสดงตัวเป็นไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้ จะทำให้เกิดสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น ณ บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยที่อำนาจของสนามไฟฟ้านี้จะขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะทั้งสองชนิด จะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีอำนาจมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสอง รอยต่ออยู่ในภาวะ “สมดุล” (equilibrium)

นอกจากนี้แล้ว ปรากฏการณ์ ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อนั้น ไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิด คงมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็น ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพไอออนลบและไอออนที่มีอยู่ในบริเวณดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “บริเวณปลอดพาหะ” (depletion region) สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้า นี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นของประจุ สนามไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้า ที่บริเวณรอยต่อแสดงได้ ดังในรูปที่ 2.8 แรงดันไฟฟ้าที่คกคร่อมบริเวณรอยต่อหรือที่เรียกว่า “ศักย์สัมผัส” (contact potential) แสดงได้ด้วยสมการ 2.1



รูปที่ 2.8 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ pn

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.1)$$

- ซึ่ง  $V_0$  : ศักย์สัมผัส (โวลต์)  
 $k$  : ค่าคงตัวของโบสตันน์มีค่า =  $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$   
 $T$  : อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ ( $^\circ\text{K}$ )  
 $q$  : ประจุอิเล็กตรอน =  $1.6 \times 10^{-19}$  คูลอมป์  
 $N_A$  : ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $N_D$  : ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $\text{cm}^{-3}$ )  
 $n_i$  : ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ( $\text{cm}^{-3}$ )

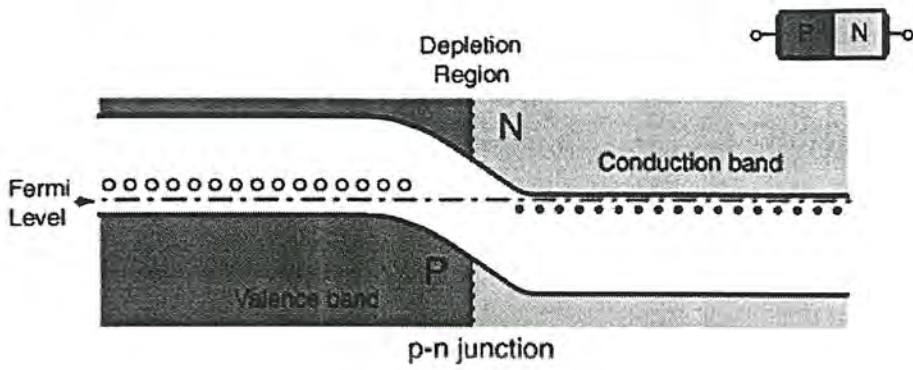
ในกรณีที่เราพิจารณาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน จะพบว่าขณะที่รอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น เนื่องจากระดับเฟอร์มี ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เราสามารถนิยามไว้ว่า โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนี้จะมีค่าเป็น 1/2 ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น ระดับเฟอร์มีในสารทั้งสองจะต้องปรับให้มีความระดับเดียวกัน ขณะที่ระดับเฟอร์มีของสารทั้งสองกำลังปรับให้เท่ากัน จะตรงกับภาวะที่โฮล และอิเล็กตรอนแพร่ข้ามรอยต่อ จนกระทั่งเกิดสนามไฟฟ้าภายในต่อต้านการแพร่ของประจุพาหะ และในที่สุดอิเล็กตรอนและโฮลก็ไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้ ซึ่งเป็นภาวะสมดุลย์ของรอยต่อ ในขณะที่เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่า ระดับเฟอร์มี (Fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะมีความระดับเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.9 และในภาวะสมดุลย์ ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังในสมการ 2.2

$$X_m = \sqrt{\frac{2\varepsilon V_0(N_A + N_D)}{q \cdot N_A \cdot N_D}} \quad \text{cm.} \quad (2.2)$$

โดยที่  $\varepsilon$  : permittivity ของสารกึ่งตัวนำ

$V_0$  : ศักย์สัมผัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

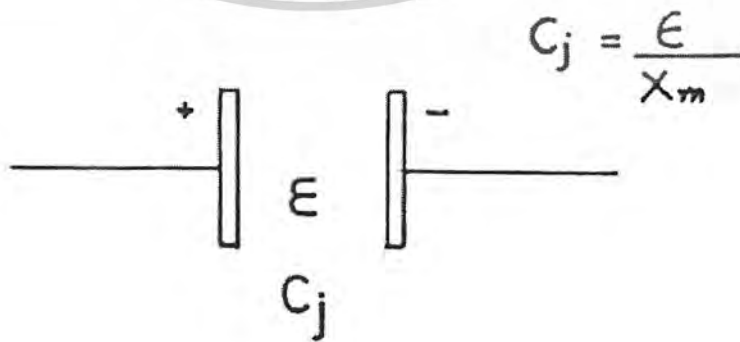
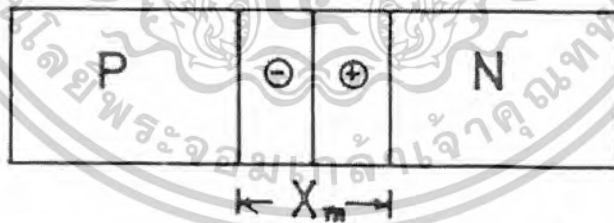


รูปที่ 2.9 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน

และนอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับ โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ( capacitor ) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังในสมการ 2.3

$$C_j = \frac{\epsilon \cdot q \cdot N_A \cdot N_D}{\sqrt{2(N_A + N_D)V_0}} \quad F/m^2 \quad (2.3)$$

โดยที่  $C_j$  ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ, ฟาห์รัด/ตร.เมตร



รูปที่ 2.10 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี - เอ็น

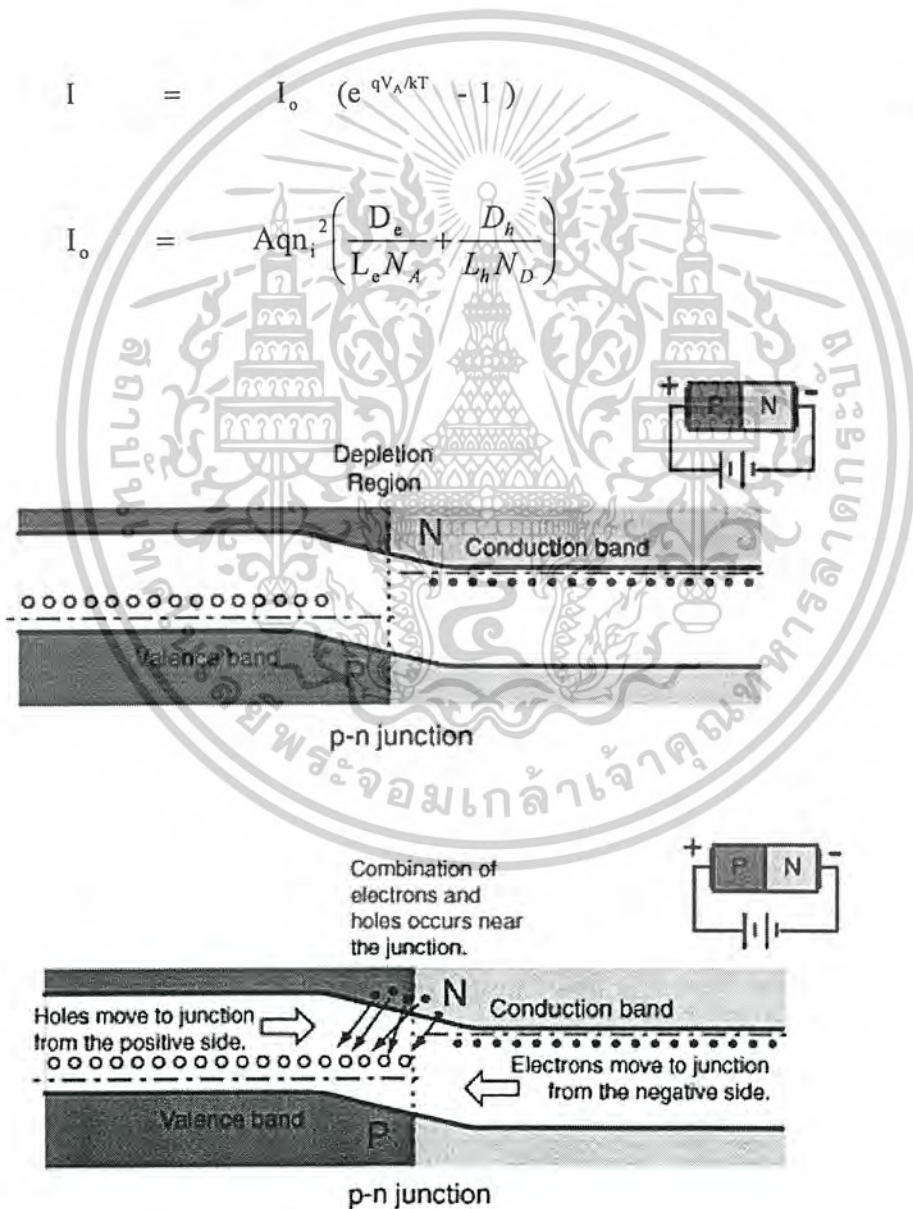
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับไบอัสตรง

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แรงดันไบอัสจากภายนอกค่า  $V_A$  จะไปปรากฏที่รอยต่อพี - เอ็น และอยู่ในลักษณะโวลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นถูกฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพีเอ็นได้ปริมาณของโวลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสในลักษณะของเอกโปเนนเชียล (exponential function) จากการฉีดของโวลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เองจะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ (2.4)

$$I = I_0 (e^{qV_A/KT} - 1) \tag{2.4}$$

$$I_0 = Aq n_i^2 \left( \frac{D_e}{L_e N_A} + \frac{D_h}{L_h N_D} \right) \tag{2.5}$$



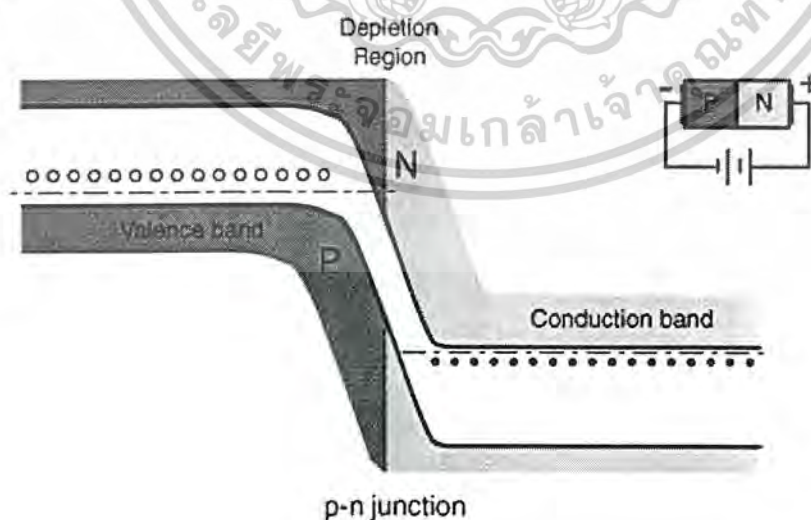
รูปที่ 2.11 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง  $V_A$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ การเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

|        |            |  |
|--------|------------|--|
| โดยที่ | $I$        | : คือกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น                     |
|        | $I_0$      | : คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ                            |
|        | $V_A$      | : คือแรงดันไบอัสที่ให้                               |
|        | $A$        | : คือพื้นที่ของรอยต่อพีเอ็น                          |
|        | $D_e, D_h$ | : คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ |
|        | $L_e, L_h$ | : คือระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ          |

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ ( $E_F$ ) ของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลงดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้

### 2.2.3 รอยต่อพีเอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.12 กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพีเอ็น มีค่า  $V_A$  โวลต์แล้ว จะพบว่า แรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายใน ซึ่งปรากฏที่บริเวณ



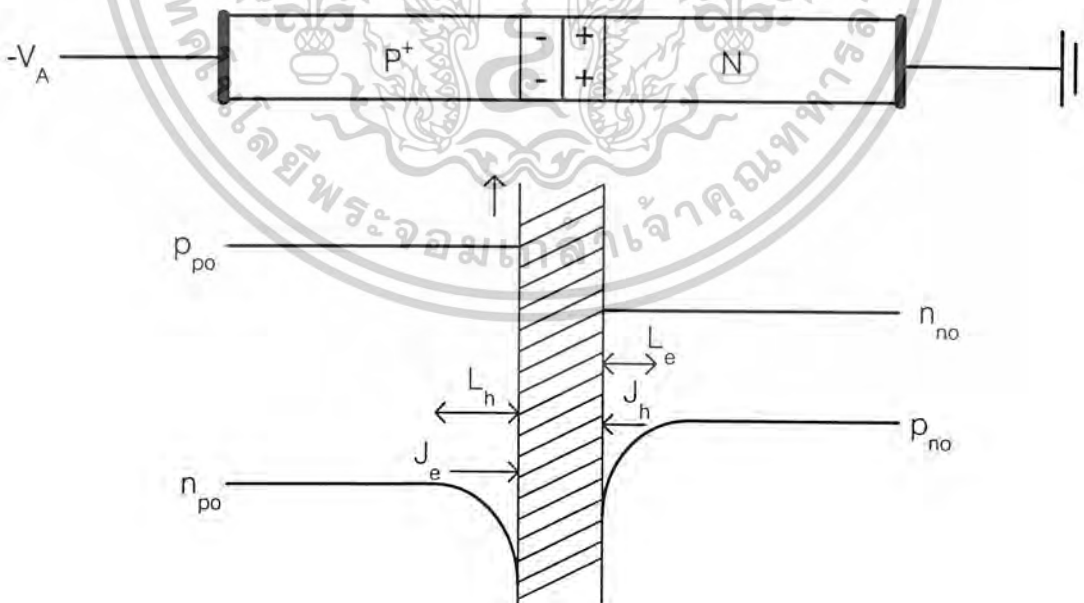
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้นี้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นเข้าไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รอยต่อ ( $V_0$ ) ดังนั้น จะทำให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวนไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ อย่างไรก็ตามจะพบว่าในขณะนี้โฮลทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านพี ซึ่งมีจำนวนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับกระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการ 2.4 เมื่อแทนค่าของ  $V_A$  ด้วย  $-V_A$

ดังนั้นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

$$I \approx -I_0 \quad (2.6)$$

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะนี้แสดงได้ดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิคู่อื่นๆ



รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

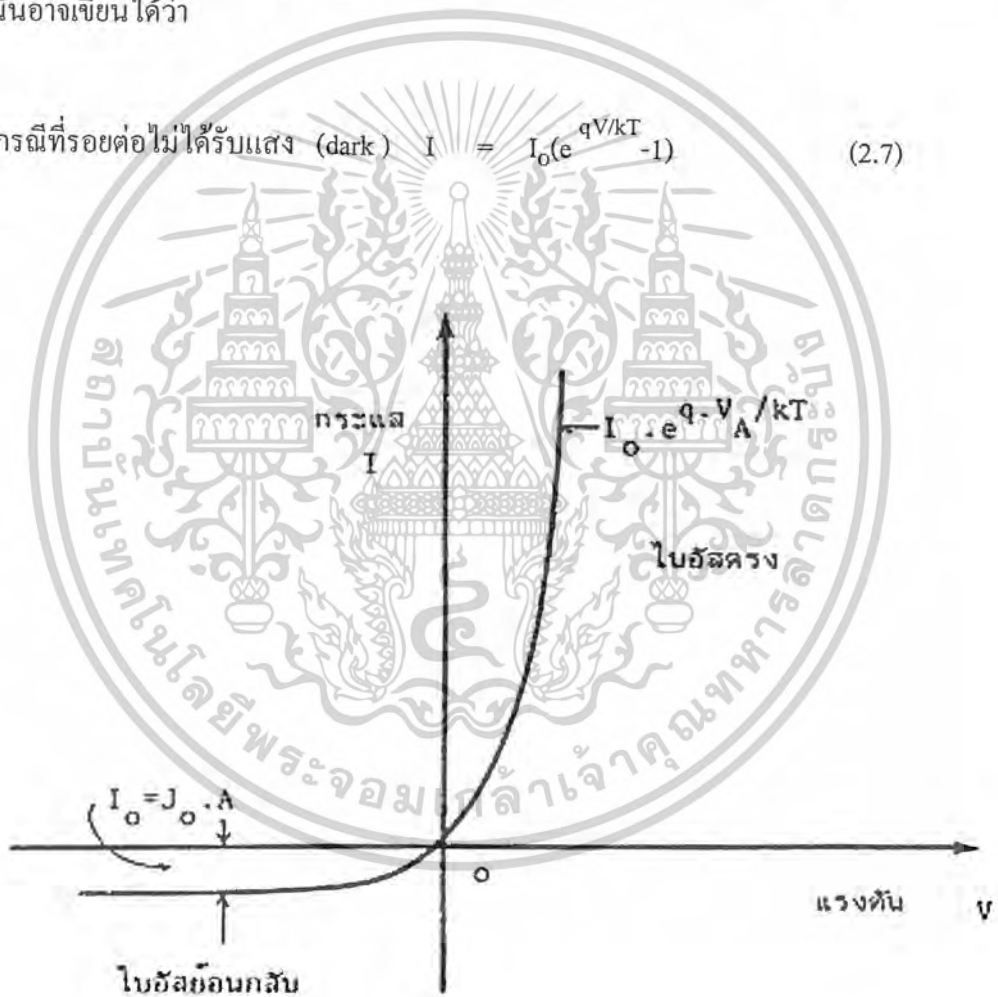
## 2.2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

### 1) ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

ดังที่กล่าวมาแล้วในตอนๆ 2.2.2 และ 2.2.3 เมื่อยรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 2.14 ซึ่งกราฟนี้ได้มาจากสมการที่ 2.4

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

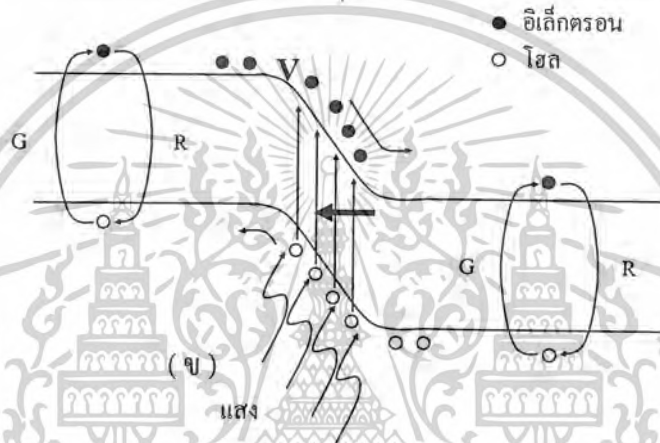
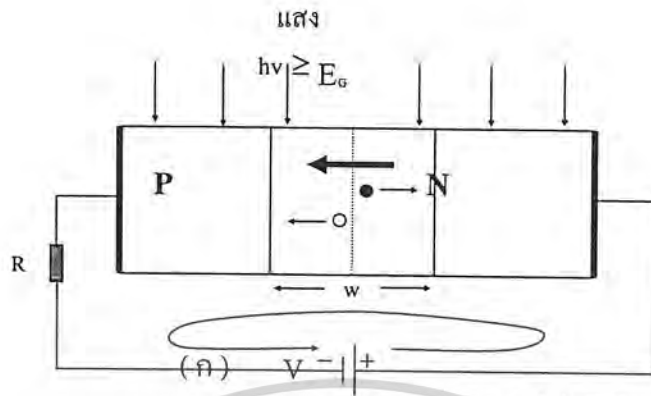
$$\text{กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark) } I = I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.7)$$



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2) ในภาวะที่รอยต่อพีเอ็นได้รับแสง (illumination)



รูปที่ 2.15 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด (ก) การให้ไบอัสแก่ไดโอดและ (ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

ในขณะที่รอยต่อพีเอ็นได้รับแสง เราพิจารณาว่าในลำแสง ประกอบไปด้วยกลุ่มของโฟตอน ( Photon ) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่งดังแสดงในสมการ

$$E_{\text{photon}} = hv$$

$E_{\text{photon}}$  : คือ พลังงานของโฟตอน

$h$  : ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.624 \times 10^{-34}$  joule-sec.

$V$  : ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบรรยากาศที่อินทรีย์ ซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อยู่ในแถบความนำได้ และทิ้งให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิสรระที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้ ๆ กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ยุติรอยต่อได้รับไปอัสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.15

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง” (Photo current) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า  $I_L$  ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแสง แสดงได้ดังในรูปที่ 3.10 ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

กรณีรอยต่อได้รับแสง (illumination)

$$I = I_0 (e^{qVA/KT} - 1) - I_L \quad (2.8)$$

โดยที่

$I_L$  : กระแสเนื่องจากแสง (photo current)

และกระแสเนื่องจากแสงสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.9

$$I_L = q \cdot A \cdot g_{op} (L_p + L_n) \quad (2.9)$$

$q$  : ประจุของอิเล็กตรอน คูลอมบ์

$A$  : พื้นที่ของรอยต่อ-เอ็นที่ถูกแสง

$g_{op}$  : อัตราการเกิด ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง  
(Optical Generation rate)

$L_n, L_p$  : คือระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง (Optical detector principle)

พื้นฐานของการเกิดการตรวจวัดแสง (Optical detection) คือการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole pair) ในส่วนที่เรียกว่า “Intrinsic absorber” โดยแสงที่เข้ามาสำหรับโฟโตรีซิสเตอร์จะต้องได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะเป็นบริเวณกว้างตรงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและเป็นตัวบ่งชี้การเคลื่อนที่ของพาหะส่วนมาก (Majority carrier) ที่จะข้ามรอยต่อพี-เอ็น แต่สังเกตได้ว่าสนามไฟฟ้านี้จะเป็นการเร่งให้พาหะส่วนน้อย (Minority Carriers) เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพี-เอ็นได้ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับ (Reverse leakage Current) ของไดโอด ในบริเวณปลอดพาหะนี้เองจะมีลักษณะของ “Intrinsic Condition” เนื่องจากไม่มีพาหะส่วนเกิน (Excess charge) เกิดขึ้น

เมื่อโฟตอน (Photon) ภายนอกเข้ามาในบริเวณหรือใกล้ๆ กับบริเวณปลอดพาหะ โดยโฟตอนนั้นต้องมีพลังงานหนึ่งที่ยากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารที่ใช้สร้างไดโอดนั้นคือ  $h\nu \geq E_g$  ก็จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า ได้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น พาหะที่เกิดขึ้นนี้จะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ผลักให้เคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน โดยโฮลจะไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะไปทางด้านเอ็น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้นจากกระแสรั่วไหลย้อนกลับเดิมที่มีอยู่เรียกว่ากระแสแสง (Photo current) ในบริเวณปลอดพาหะทำให้ความเร็วของการทำงานของไดโอดลดลงดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการจำกัดความกว้างของบริเวณนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นพิจารณาในทางสวนกันระหว่างจำนวนของโฟตอนที่จะเกิดการดูดกลืน ซึ่งหมายถึงความไว (Sensitivity) กับความเร็วของการทำงานซึ่งหมายถึงแบนด์วิดท์นั่นเอง

#### การดูดกลืน (Absorption)

การดูดกลืนโฟตอนในโฟโตรีซิสเตอร์จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งจะส่งผลทำให้เกิดกระแสแสงตามมา การดูดกลืนของแสงจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ในการดูด (Absorption Coefficient ( $\alpha$ )) ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้สร้างไดโอด การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำจะเป็นไปตามสมการ

$$P(x) = P_0(1 - e^{-\alpha x})$$

โดยที่  $P(x)$  คือ กำลังงานของแสงที่ถูกดูดกลืนในช่องว่างระยะทาง

$P_0$  คือ กำลังงานของแสงที่เข้ามา

$\alpha_0$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงซึ่งขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างไดโอด และความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจะทำให้เกิดกระแสแสง ( $I_L$ ) ตามสมการ

$$I_L = \frac{e(1-r)}{h\nu} P_0 (1 - e^{-\alpha_0 d})$$

- โดยที่  $e$  คือ จำนวนประจุอิเล็กตรอน  
 $r$  คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับพื้นผิวด้านหน้าของไดโอด  
 $h\nu$  คือ พลังงานของ โฟตอนที่เข้ามา  
 $d$  คือ ความกว้างของบริเวณการดูดกลืน (Absorption Region)

จะเห็นว่า  $\alpha_0$  ของสารแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามาและสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดใช้ได้กับความยาวคลื่นเพียงช่วงเดียวเท่านั้น ซึ่งเนื่องมาจากความแตกต่างของแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap Energy)

|      | Bandgap (eV) at 300K |        |
|------|----------------------|--------|
|      | Indirect             | direct |
| Si   | 1.14                 | 4.10   |
| Ge   | 0.67                 | 0.81   |
| GaAs | -                    | 1.43   |
| InP  | -                    | 1.35   |
| InAs | -                    | 0.35   |
| GaSb | -                    | 0.73   |

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ 300 K

โดยการพิจารณาความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถดูดกลืนได้ของสารแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน โดยค่าความยาวคลื่นสูงสุดนี้เรียกว่า Long wavelength cutoff ซึ่งเกิดเนื่องจากผลของพลังงานช่องว่างพลังงานก็ไม่เท่ากันนั่นเอง ดังสมการ

$$h\nu \geq E_g$$

$$\frac{hc}{\lambda} \geq E_g$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

นั่นคือ Long wavelength cutoff ( $\lambda_c$ ) จะเป็นไปตามสมการ

$$\lambda \leq \frac{hc}{E_g}$$

### ค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม ( $\eta$ ) คือ ประสิทธิภาพของการเกิดโฟโตอิเล็กตรอน (Photo Electron) เนื่องจากโฟตอนที่เข้ามาดังสมการ

$$\eta = \frac{\text{number of electron collection at terminal}}{\text{number of incident photon}} = \frac{r_e}{r_p}$$

โดยที่  $r_p$  คือ Incident photon rate (Photon/sec)  
 $r_e$  คือ Electron rate (Electron/sec)

เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไฟฟ้าแสง (Photo electric effect) คือ โฟตอนหนึ่งตัวจะชนกับอิเล็กตรอนเพียงหนึ่งตัวเท่านั้นแต่โฟตอนทั้งหมดที่เข้ามาไม่ได้ชนกับอิเล็กตรอนทุกตัว นั่นหมายความว่าไม่ใช่โฟตอนทุกตัวที่เข้ามาจะถูกดูดกลืนแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลได้ทั้งหมด ดังนั้นค่าของประสิทธิภาพทางควอนตัมจะน้อยกว่า 1 ซึ่งมีผลโดยตรงมาจากค่าของ  $\alpha$  นั้นเอง

### ผลการตอบสนอง (Responsivity)

ผลการตอบสนอง ( $R$ ) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญของโฟโตดีเทคเตอร์ (Photo detector) โดย

$$R = \frac{I_L}{P_o} \quad \text{A/W}$$

โดยที่  $I_L$  คือ ค่ากระแสแสงหน่วยเป็นแอมแปร์ (Amperes)  
 $P_o$  คือ Incident Optical Power หน่วยเป็น (Watt)

จาก  $r_p$  คือ Incident photon rate

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$r_p = \frac{P_o}{hv}$$

และ  $r_e$  คือ Electron rate

$$r_e = \eta r_p$$

$$= \eta \frac{P_o}{hv}$$

จาก  $r_e$  เท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนต่อวินาที  
ดังนั้น

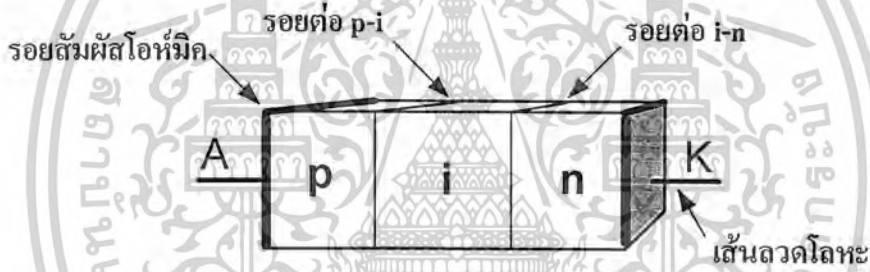
$$I_p = r_e e$$

$$= \eta \frac{P_o e}{hv}$$

และ

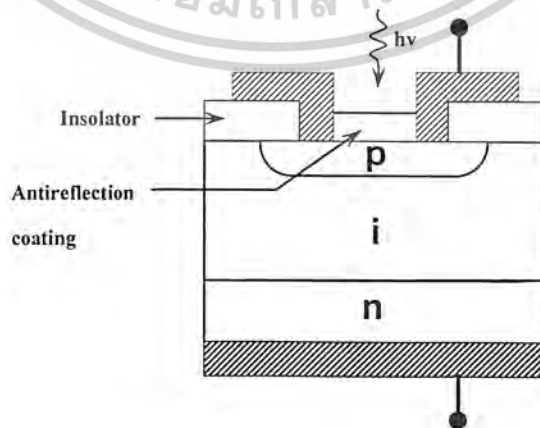
$$R = \frac{he\lambda}{hc}$$

### 2.4 ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n



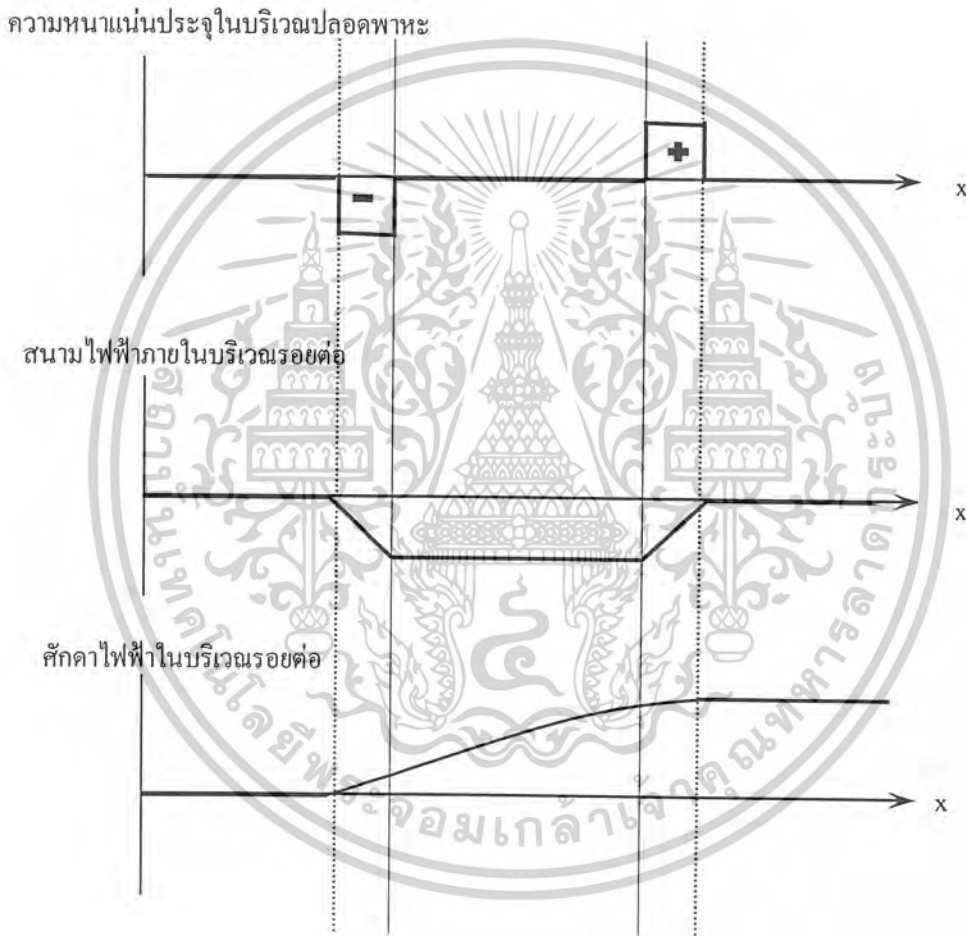
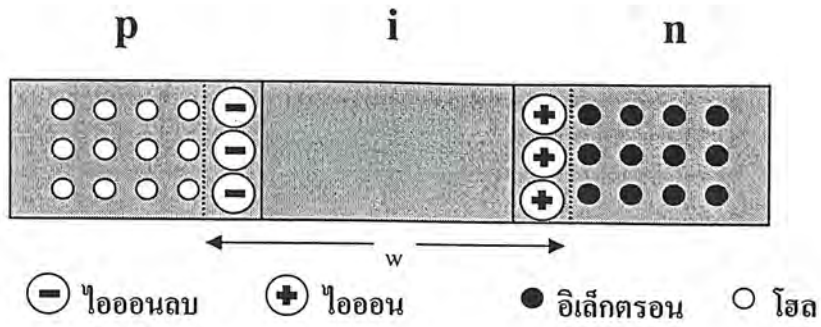
รูปที่ 2.16 แสดงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n

โฟโตไดโอดแบบ p-i-n เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนสูงและอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา เนื่องจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้



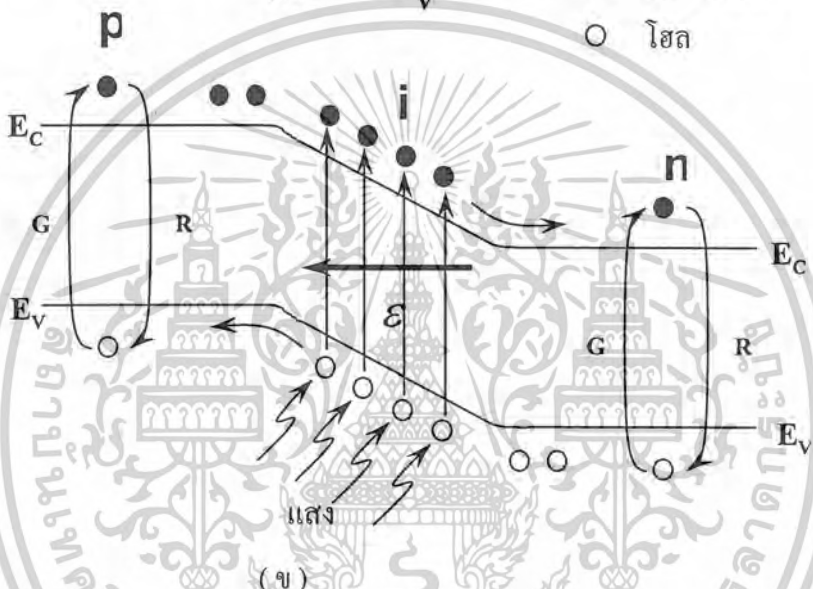
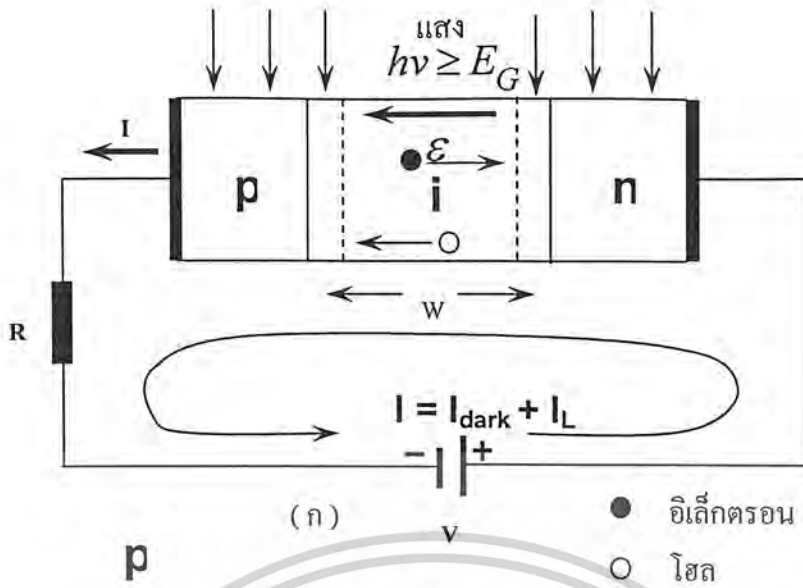
รูปที่ 2.17 แสดงภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและศักดาไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอดแบบ p-i-n (ก) การให้ไบอัสแก่ไดโอดและ (ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

เมื่อได้รับแรงดันไบอัสแบบย้อนกลับของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะและบริเวณการแพร่ (Diffusion Region) โดยปกติการแพร่อะตอมสารเจือของสารชนิดพีจะมากกว่าของสารชนิดเอ็น โฟตอนที่เข้ามาจะถูกดูดกลืนทั้งในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณการแพร่ ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณการดูดกลืน ความกว้างของบริเวณการดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของโฟตอนที่เข้ามาและคุณสมบัติของสารที่ใช้สร้างไดโอด ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน - โฮลจะเกิดขึ้นทั้งในบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณการดูดกลืน ในบริเวณปลอดพาหะนั้น คู่พาหะจะถูกแยกออกจากกัน และครีฟท์ (Drift) โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ส่วนในบริเวณการแพร่ เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เข้าหาบริเวณปลอดพาหะ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วของไดโอด การเคลื่อนที่ในบริเวณนี้จะเป็นแบบการแพร่ (Diffusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือที่นั่นก็คือ ความหนาแน่นของประจุ การแพร่นี้ผลเบื้องต้นพบว่าโฟตอนส่วน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นว่าเป็นประโยชน์ในการนำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใหญ่จะถูกดูดกลืนในบริเวณปลอดพาหะเป็นบริเวณกว้าง โดยเทคนิคการเติมอะตอมสารเจือในสารชนิดอื่นให้มีค่าน้อย ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีความจำเป็นเนื่องจากการดูดกลืนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ ดังนั้นโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จะถูกออกแบบให้บริเวณที่เป็นสารชนิด i นั้นมีค่าเข้มข้นของการเติมอะตอมสารเจือต่ำมากๆ เพื่อให้เกิดบริเวณปลอดพาหะกว้าง ดังนั้นสารชนิดอื่นในส่วนนี้จะประพุดตัวเหมือนกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ส่วนที่ขั้วต่อของสารชนิดอื่นนั้นจะให้ความเข้มข้นสูงมาก ( $N^+$ ) เพื่อทำให้เกิดรอยต่อแบบโอมมิคส์ (Ohmic Contact) ดังนั้น โฟโตไดโอดประเภทนี้จะเกิดการดูดกลืนเฉพาะในบริเวณปลอดพาหะเท่านั้น

## 2.5 ความเร็วของการตอบสนอง (Speed of response)

ความเร็วของการตอบสนองนั้นขึ้นอยู่กับ 3 ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. ช่วงเวลาของการครีฟท์ของพาหะ ในบริเวณปลอดพาหะ ส่วนที่จะเป็นปัญหาหลักของการเพิ่มความเร็วของโฟโตไดโอด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการครีฟท์ของพาหะในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากสนามไฟฟ้านี้อยู่ในช่วงอิ่มตัว สามารถประมาณได้ว่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของพาหะจะมีค่าคงที่ ดังนั้นช่วงเวลาการครีฟท์ที่สูงสุดที่เกิดขึ้นได้ คือ

$$T_{drift} = \frac{w}{vd}$$

โดยที่

$w$  คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

$vd$  คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของพาหะ

แต่ถ้าค่า  $w$  นั้นต้องมากเพื่อให้ค่าประสิทธิภาพทางควอนตัมมีค่ามาก ดังนั้น การลดค่า  $T_{drift}$  จึงทำได้ยาก

2. ช่วงเวลาของการแพร่ของพาหะ ทำให้เกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะดังที่กล่าวไปแล้ว การเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮล อาจเกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะได้และเนื่องจากความเร็วของการแพร่ จะช้ากว่าการครีฟท์เนื่องจากสนามไฟฟ้ามาก ดังนั้นช่วงเวลาของการแพร่จึงเป็นปัญหาที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง

$$T_{diff} = \frac{d^2}{2Dc}$$

โดยที่  $d$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่

$Dc$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของพาหะส่วนน้อย

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้  $d$  มีค่าน้อยที่สุดหรือ ไม่มีเลย เช่นในโฟโตไดโอด แบบ p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ค่าเวลาคงที่ ที่เกิดขึ้นระหว่างคาปาซิแตนซ์ของโฟโตไดโอดกับค่าความต้านทานของโหลดที่ใช้ เนื่องจากการใช้งานโฟโตไดโอดจะต้องได้รับแรงดันไบอัสแบบย้อนกลับ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณปอดพาหะจะประพุดิตัวเป็นคาปาซิแตนซ์ เรียกว่า คาปาซิแตนซ์ที่รอยต่อ (Junction Capacitance:  $C_j$ )

$$C_j = \frac{\epsilon A}{w}$$

โดยที่  $\epsilon$  คือ ค่าเปอร์มิติวิตี (Permittivity) ของสารกึ่งตัวนำ  
 $A$  คือ พื้นที่รอยต่อ  
 $w$  คือ ความกว้างบริเวณปอดพาหะ

จากเหตุผลดังกล่าวทั้ง 3 ข้างต้น หากเราพิจารณาเฉพาะในข้อที่ 1 จะได้ว่าค่า Maximum photodiode 3 dB band width ( $B_m$ ) จะมีค่าเป็น

$$B_m = \frac{1}{2\pi T_{drift}} = \frac{vd}{2\pi w}$$

เมื่อเปรียบเทียบผลของความกว้างและค่าคาปาซิแตนซ์ที่มีรอยต่อความเร็วของการตอบสนองจะเห็นได้ว่า คาปาซิเตอร์มีส่วนสำคัญมากต่อการเกิดผลของการแพร่ของพาหะนอกบริเวณปอดพาหะ ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าคาปาซิแตนซ์น้อยๆ หรือให้โหนดมีค่าความต้านทานน้อยและความกว้างต้องมากกว่า  $\frac{1}{\alpha_0}$  มากๆ

## บทที่ 3

### การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ในการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เพื่อการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบโครงสร้างและกระบวนการสร้าง โดยการออกแบบจะกล่าวถึงการออกแบบกระเจกต้นแบบเพื่อใช้ในการสร้าง และรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

#### 3.1 การสร้างกระเจกต้นแบบ

ในการออกแบบจะเป็นการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n โดยเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ซึ่งอาศัยเงื่อนไขของพารามิเตอร์จากสมการทั่วไปของไดโอดดังสมการ 3.1 มาสร้างพารามิเตอร์ในการออกแบบ

$$I_0 = Aq n_i^2 \left( \frac{D_h}{L_h N_D} + \frac{D_e}{L_e N_A} \right) \\ I = I_0 (e^{qV_A/kT} - 1) \quad (3.1)$$

$I$  : คือกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น

$I_0$  : คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

$V_A$  : คือแรงดันไบอัสที่ให้

$A$  : คือพื้นที่ของรอยต่อพีเอ็น

$D_e, D_h$  : คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

$L_e, L_h$  : คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

จากสมการดังกล่าวพบว่ากระแส  $I$  นั้นจะแปรผันกับ  $I_0$ ,  $V_A$  และ  $T$  ซึ่งจะเห็นว่า  $V_A$  และ  $T$  ไม่ใช่ผลของการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจึงต้องพิจารณา  $I_0$  และ  $I_0$  จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อโครงสร้างคือ  $A$ ,  $L_p$  และ  $L_n$  ซึ่งหมายถึง พื้นที่ของรอยต่อ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ ดังนั้นจึงนำพารามิเตอร์เหล่านี้มาใช้ในการพิจารณาในการออกแบบ

ออกแบบโครงสร้างของไดโอดและทำการถ่ายลงฟิล์มแล้วนำมาติดบนกระเจกโฟโตมาส์กกระเจกต้นแบบทั้งหมดมี 3 มาส์กคือ

- มาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ
- มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ
- มาส์กที่ 3 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โฟโตไดโอดแบบ p-i-n หมวดต่างๆ

หมวดที่ 1 (303) ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง

|      |                             |                |               |
|------|-----------------------------|----------------|---------------|
| A303 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 มิลลิเมตร |
| B303 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 มิลลิเมตร |
| C303 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 มิลลิเมตร |
| D303 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 มิลลิเมตร |
| E303 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 มิลลิเมตร |
| F303 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 มิลลิเมตร |

หมวดที่ 2 (503) ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง

|      |                             |                |               |
|------|-----------------------------|----------------|---------------|
| A503 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 มิลลิเมตร |
| B503 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 มิลลิเมตร |
| C503 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 มิลลิเมตร |
| D503 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 มิลลิเมตร |
| E503 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 มิลลิเมตร |
| F503 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 มิลลิเมตร |

หมวดที่ 3 (703) ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง

|      |                             |                |               |
|------|-----------------------------|----------------|---------------|
| A703 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 มิลลิเมตร |
| B703 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 มิลลิเมตร |
| C703 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 มิลลิเมตร |
| D703 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 มิลลิเมตร |
| E703 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 มิลลิเมตร |
| F703 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 มิลลิเมตร |

หมวดที่ 4 (305) ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง

A305 เป็นเอพินเอซีทีที่มีเส้นผ่านกลาง 0.5 มิลลิเมตร ญาติแนะนำให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

|      |                             |                |     |           |
|------|-----------------------------|----------------|-----|-----------|
| B305 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 | มิลลิเมตร |
| C305 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 | มิลลิเมตร |
| D305 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 | มิลลิเมตร |
| E305 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 | มิลลิเมตร |
| F305 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 | มิลลิเมตร |

หมวดที่ 5 (505) ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง

|      |                             |                |     |           |
|------|-----------------------------|----------------|-----|-----------|
| A505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 | มิลลิเมตร |
| B505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 | มิลลิเมตร |
| C505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 | มิลลิเมตร |
| D505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 | มิลลิเมตร |
| E505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 | มิลลิเมตร |
| F505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 | มิลลิเมตร |

หมวดที่ 6 (705) ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง

|      |                             |                |     |           |
|------|-----------------------------|----------------|-----|-----------|
| A705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 | มิลลิเมตร |
| B705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 | มิลลิเมตร |
| C705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 | มิลลิเมตร |
| D705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 | มิลลิเมตร |
| E705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 | มิลลิเมตร |
| F705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 | มิลลิเมตร |

หมวดที่ 7 (307) ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง

|      |                             |                |     |           |
|------|-----------------------------|----------------|-----|-----------|
| A307 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 | มิลลิเมตร |
| B307 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 | มิลลิเมตร |
| C307 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 | มิลลิเมตร |
| D307 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 | มิลลิเมตร |
| E307 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 | มิลลิเมตร |
| F307 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 | มิลลิเมตร |

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**หมวดที่ 8 (507)** ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง

|      |                             |                |     |           |
|------|-----------------------------|----------------|-----|-----------|
| A505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 | มิลลิเมตร |
| B505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 | มิลลิเมตร |
| C505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 | มิลลิเมตร |
| D505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 | มิลลิเมตร |
| E505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 | มิลลิเมตร |
| F505 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 | มิลลิเมตร |

**หมวดที่ 9 (707)** ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง

|      |                             |                |     |           |
|------|-----------------------------|----------------|-----|-----------|
| A705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 0.5 | มิลลิเมตร |
| B705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.0 | มิลลิเมตร |
| C705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 1.5 | มิลลิเมตร |
| D705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.0 | มิลลิเมตร |
| E705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 2.5 | มิลลิเมตร |
| F705 | พื้นที่รับแสง (Active area) | มีเส้นผ่านกลาง | 3.0 | มิลลิเมตร |

### 3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

#### 3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

โดยเริ่มต้นการเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิด i หนา  $\lambda$  (111) ความหนาของแผ่น ซิลิคอน ประมาณ 500 ไมครอน

การตัดแบ่งแผ่นซิลิคอน จะใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษที่เรียกว่า Diamond-edged saw การลดความคมของแผ่นซิลิคอน โดยการ ใช้ผงขัดของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีหลายเบอร์หลายขนาดดังนี้

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

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน

การทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. กรทำความสะอาดครั้งแรก เพื่อล้างสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนแผ่นซิลิคอน
2. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอน และกำจัดไขมัน และสิ่งแปลกปลอม

### 3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันคือ กระบวนการสร้างชั้น ซิลิคอน ไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งนั้น เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะ โปร่งแสง เพื่อเคลือบผิวหน้า และใช้ควบคุมการแพร่ของ สารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยความหนาของชั้น ( $\text{SiO}_2$ ) ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ, เวลา และกระบวนการสร้าง ซึ่งการสร้างโดยวิธี ออกซิเดชันแบบแห้งนั้น จะใช้เวลามากกว่าวิธี ออกซิเดชันแบบชื้น แต่ลักษณะการเกิดชั้น ( $\text{SiO}_2$ ) จะมีข้อดี และมีผลกระทบต่อผิวหน้าของ ซิลิคอนน้อยกว่า

การสร้างชั้น ( $\text{SiO}_2$ ) ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. ออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



หมายเหตุ Wet Oxidation เกิดชั้น  $\text{SiO}_2$  เร็วกว่า Dry Oxidation โมเลกุล  $\text{H}_2\text{O}$  เล็กกว่าโมเลกุล  $\text{O}_2$

### 3.2.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟี เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่ายภาพกระจกมาสก์ลงบนแผ่น ซิลิคอน เพื่อเตรียมเปิดช่องออกไซด์เฉพาะบริเวณที่ต้องการแพร่สารเจือ โดยเคลือบผิวของแผ่น ซิลิคอนด้วยน้ำยาไวแสง (Photo-resist) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

1. สารไวแสงชนิดลบ (Negative photo resist)

โดยเมื่อถูกแสงแล้วจะแข็งตัวไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (Developer) ปล่อยให้ถูกแสงส่วนที่ไม่ต้องการให้ละลายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. สารไวแสงชนิดบวก (Positive photo resist)

โดยเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะอ่อนตัว และสามารถละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

### 3.2.6 การฉายแสง (Exposure)

อัตราความไวต่อแสงของความยาวคลื่น  $\lambda$  อยู่ในช่วง 300-500 nm คือแสงที่เรามองเห็น สีม่วง และ น้ำเงินนั่นเอง กรณีแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda > 500$  nm คือแสงสีเหลืองในห้องปฏิบัติการเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี

Negative resist ไวต่อสเปกตรัม 405 nm

Positive resist ไวต่อสเปกตรัม 365 nm

### 3.2.7 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)

#### 3.2.7.1 กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (Boron)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือ โบรอน ด้วยแหล่งสารเจือ BN ลงไปบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ไว้

#### 3.2.7.2 กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus)

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

### 3.2.8 Metallization Process

Metallization Process คือ กระบวนการทำขั้ว โลหะ (Metal contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน (Metal wire interconnection)

คุณสมบัติโลหะที่ดี

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

### 3.2.9 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อสร้างรอยสัมผัส โหมดมีกระวางอะลูมิเนียม และซิลิกอน และทำให้เกิดส่วนอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิกอนขึ้นในขณะเดียวกัน โดยการนำแผ่นซิลิกอนไปไว้ในเตาแพร่สารในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ซีซี / นาที เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 500°C

### 3.2.10 กระบวนการสร้าง Si Photodiode แบบ (p-i-n)

#### 1. การเตรียมแผ่นซิลิกอน และ การตรวจสอบคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิกอนชนิด อินทรินซิก ระบาย (111)
- พิกัดความต้านทาน  $\cong 2000 \Omega\text{-cm}$
- ความหนา  $\cong 500 \mu\text{m}$

#### 2. ทำความสะอาดผิว

- Ultrasonic ในน้ำ DI (น้ำบริสุทธิ์) 2 นาที (เพื่อกำจัดฝุ่นละออง)
- ล้างในน้ำ DI เป่าแห้งด้วยก๊าซ ( $\text{N}_2$ )
- ดมใน  $\text{HNO}_3 \cong 10$  นาที (เพื่อกำจัดโลหะหนัก เช่น เศษ Si)
- ล้างในน้ำ DI
- ดมน้ำ DI (I) 5 นาที
- ดมน้ำ DI (II) 5 นาที
- ล้าง ในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### 3. ทำความสะอาดผิคน้ำ

- ดมใน Trichol 5 นาที (กำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน)
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### 4. Slice etching (เพื่อกำจัด $\text{SiO}_2$ ที่อยู่บนผิว Si ก่อนการ Oxidation)

- ล้างใน HF 5% 10 นาที
- ดมน้ำ DI (I)
- ดมน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$

#### 5. Oxidation

- Dry ด้วย  $\text{O}_2$  1200 cc / min 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารของวิทยาลัยอาชีวศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc / min 1 ชั่วโมง
- อุณหภูมิเตา  $1050^\circ C$  , อุณหภูมิน้ำ  $90^\circ C$
- 6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี
  - อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  30 นาที
  - เคลือบฟิล์มด้านหลัง
  - อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $95^\circ C$  30 นาที
- 7. การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching) , (ด้านหลัง)
  - จุ่มในสารละลาย Buffer
  - ล้างในน้ำ DI (I)
  - ล้างในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- 8. ลอกฟิล์ม (ด้านหลัง)
  - ดมใน  $H_2SO_4$  (I) 5 นาที
  - ดมใน  $H_2SO_4$  (II) 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI
  - ดมในน้ำ DI (I) 5 นาที
  - ดมในน้ำ DI (II) 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- 9. ทำความสะอาดผิวหน้า (ด้านหลัง)
  - ดมใน Trichol 5 นาที
  - Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI (I)
  - ล้างในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- 10. Slice etching (ด้านหลัง)
  - จุ่มใน HF 5 % 11 วินาที
  - ล้างในน้ำ DI (I)
  - ล้างในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- 11. Pre – deposition (ด้านหลัง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Pre – dep  $1000^{\circ}\text{C}$  ด้วย  $\text{N}_2$  1000 cc / min , 30 นาที
- 12. ลอกชั้น Phosphorus
  - จุ่มใน HF 5 % 11 วินาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$
- 13. ทำความสะอาดผิว (ด้านหลัง)
  - ต้มใน Trichol 5 นาที
  - Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$
- 14. Drive – in (ด้านหลัง)
  - Drive – in ( Phosphorus )  $1000^{\circ}\text{C}$
  - Dry  $\text{O}_2$  1200 cc / min.
  - Wafer ( 1-3 ) 3 ชั่วโมง
  - Wafer ( 4-6 ) 5 ชั่วโมง
  - Wafer ( 7-9 ) 7 ชั่วโมง
- 15. Photo Mask # 1 ( diffusion ), (ด้านหน้า)
  - อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  30 นาที
  - เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( AZ ) ด้วยการ ( spin ) 5000 rpm.
  - อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $90^{\circ}\text{C}$  30 นาที ( prebake )
  - Alignment Expose
  - Developer พิสูจน์โดย
    - AZ Developer ( I ) 30 วินาที
    - AZ Developer ( II ) 30 วินาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$
  - นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ  $120^{\circ}\text{C}$  10 นาที ( post bake )
  - เคลือบฟิล์มด้านหลัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่อุทธรณ์ 90°C 30 นาที ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 16. Oxide etching

- แช่ใน Buffer for Oxidation 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

## 17. ลอกฟิล์ม

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

## 18. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

## 19. Slice etching

- จุ่มใน HF 5 % 11 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N

## 20. Pre – deposition (ด้านหน้า)

Boron ( สารเจือชนิด p )

- Pre – dep  $1000^{\circ}C$  ด้วย  $N_2$  1000 cc/min , 30 นาที

## 21. ลอกชั้น Pre – deposition , Boron

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

## 22. ทำความสะอาดผิว (ด้านหน้า)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

#### 23. Drive - in

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

- Wafer ( 1-3 )                    30    นาที
- Wafer ( 4-6 )                    50    นาที
- Wafer ( 7-9 )                    70    นาที

#### 24. Photo Mask # 2 ( contact window )

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( AZ ) ด้วยการ ( spin ) 5000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที ( prebake )
- Alignment Expose
- Developer ฟลิ้มโดย
  - AZ Developer ( I )                    30    นาที
  - AZ Developer ( II )                    30    นาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- อบฟลิ้มที่อุณหภูมิ 85°C 30 นาที

#### 25. Oxide etching

- แช่ใน Buffer for Oxidation 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI ( I )
- ล้างในน้ำ DI ( II )
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 26. ลอกฟลิ้ม

- แช่ใน Acetone ( I )                    1    วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

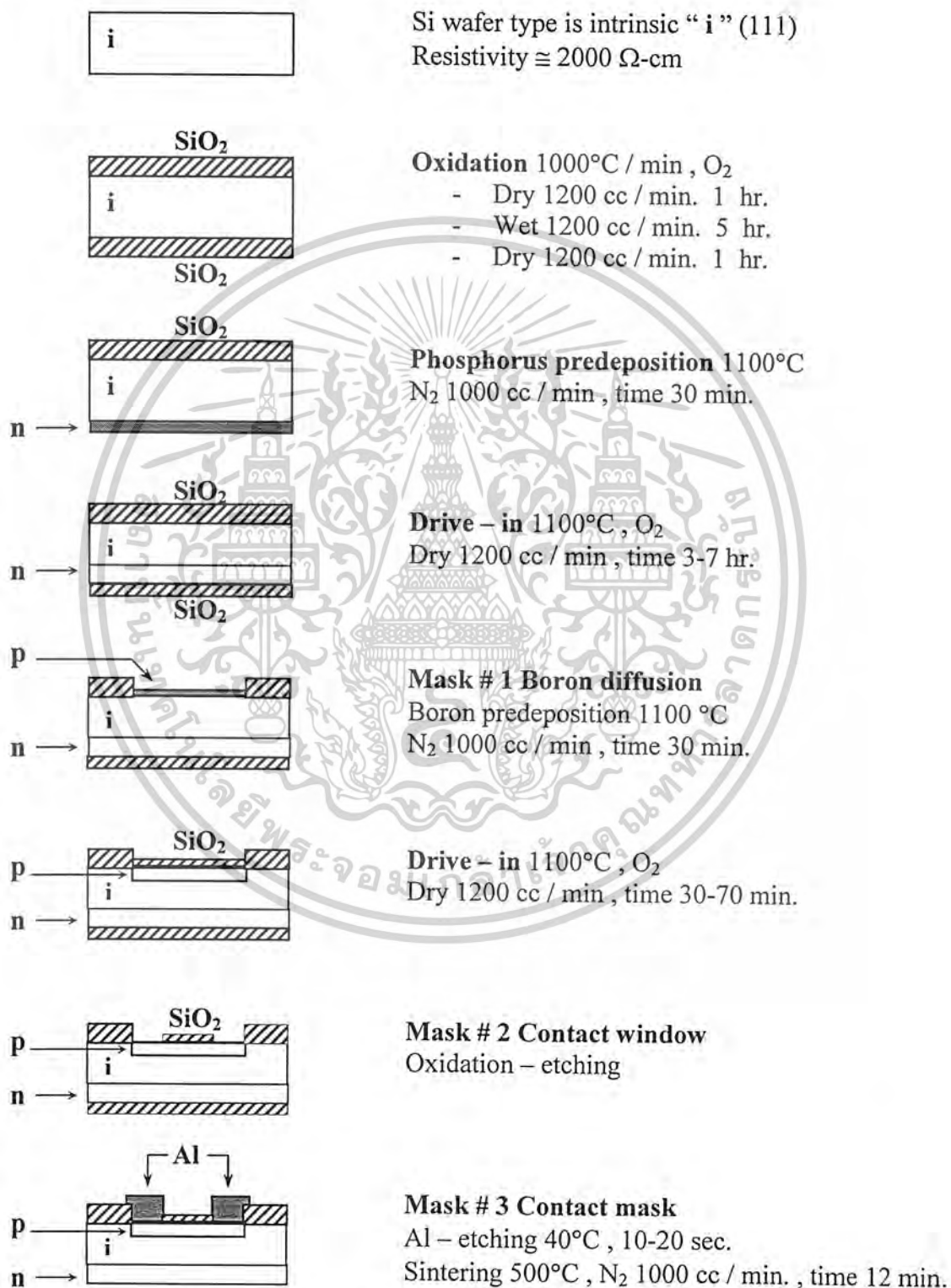
- ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
27. ทำความสะอาดผิวหน้า
- ต้มใน Trichol 5 นาที
  - Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
28. Aluminium Evaporation ที่ความดัน  $2 \times 10^{-6}$  มม.ของปรอท ( torr )
29. Photo Mask # 3 ( contact mask )
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ( AZ ) ด้วยการ ( spin ) 5000 rpm.
  - อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $85^\circ C$  20 นาที ( perbake )
  - Alignment Expose
  - Developer ฟิล์มโดย
    - AZ Developer ( I ) 30 วินาที
    - AZ Developer ( II ) 30 วินาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
  - อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $85^\circ C$  30 นาที
30. Al etching
- นำแผ่นจุ่มในสารละลาย Al etching ที่  $40^\circ C$  ( ประมาณ 10 – 20 วินาที )
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
31. ลอกฟิล์ม
- แช่ใน Acetone ( I ) 1 วินาที
  - แช่ใน Acetone ( II ) 1 วินาที
  - ล้างในน้ำ DI ( I )
  - ล้างในน้ำ DI ( II )

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 32. Sintering 500°C

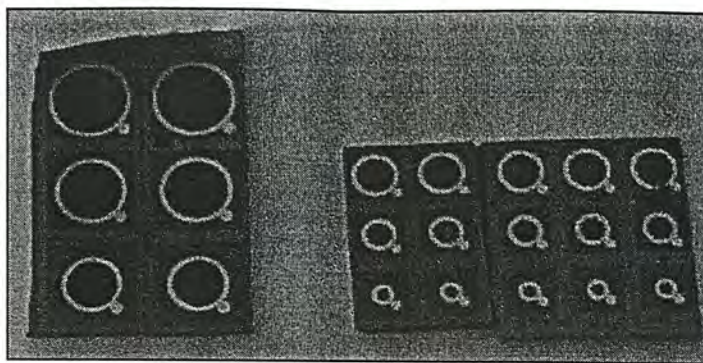
- Dry N<sub>2</sub> 1000 cc / min 12 นาที

โดยลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n แสดงดังนี้

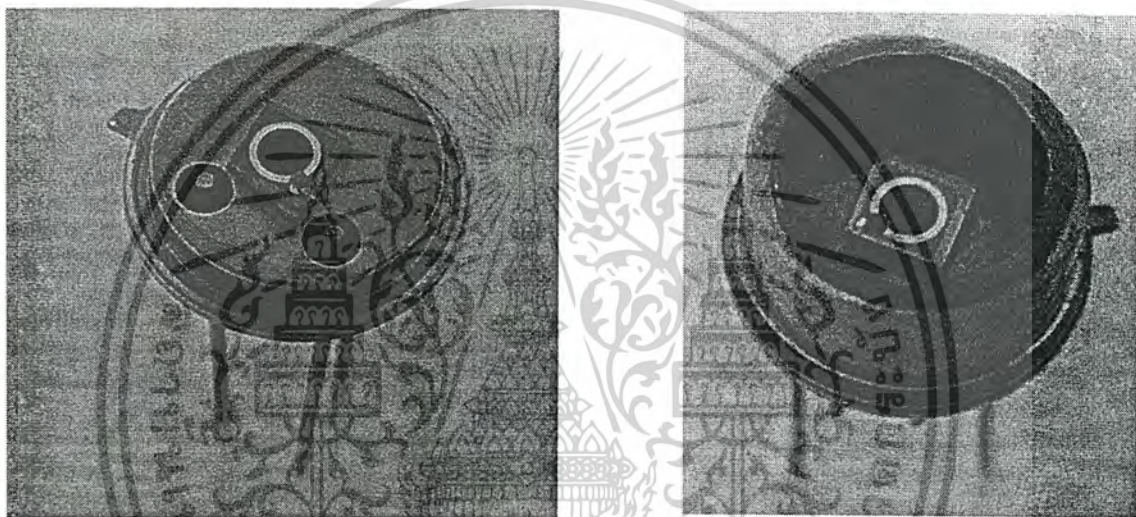


รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 ลักษณะซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ได้จากการสร้าง



รูปที่ 3.6 ลักษณะซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ต่อสายแล้ว

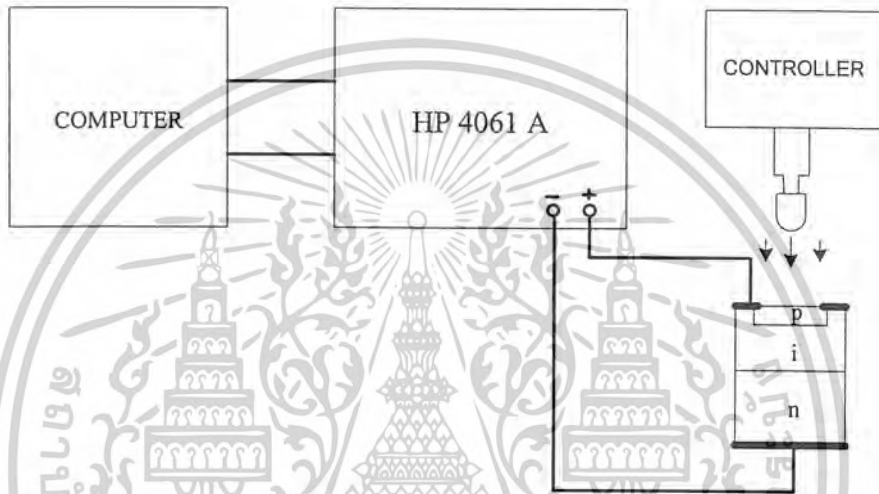
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 4.1 การทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

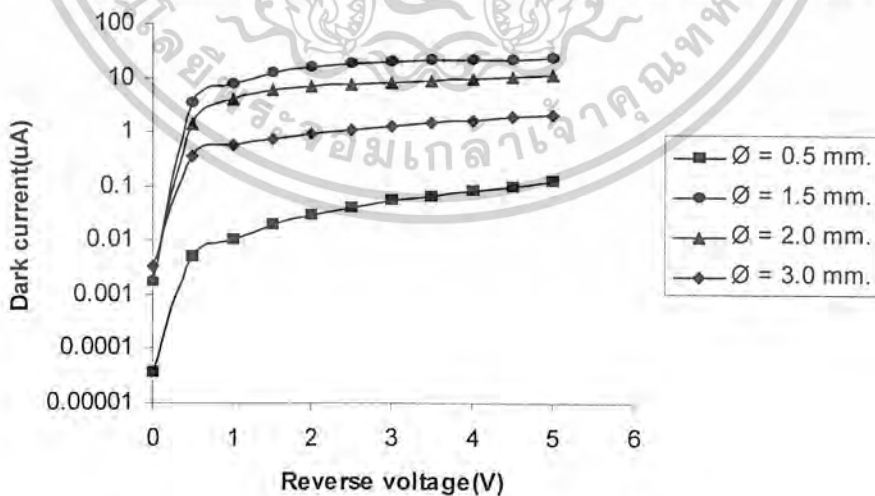
เพื่อศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จึงนำโฟโตไดโอดที่สร้างไปทำการทดลองการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดจากเครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล

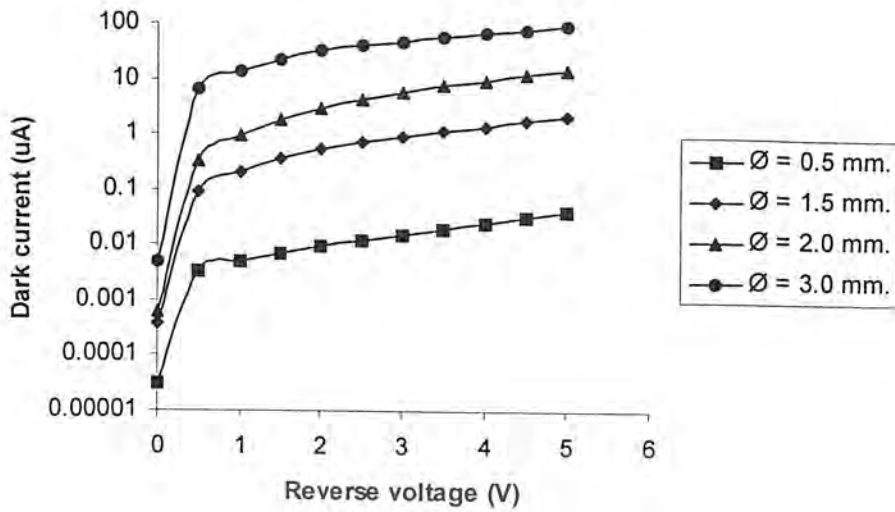
#### 4.1.1 ศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อมีผลต่อกระแสขณะมืด ( $I_{\text{DARK}}$ )

เราจะทำการเปรียบเทียบ โดยให้ขนาดพื้นที่ที่ต่างกันในขณะที่ไม่ได้รับแสง

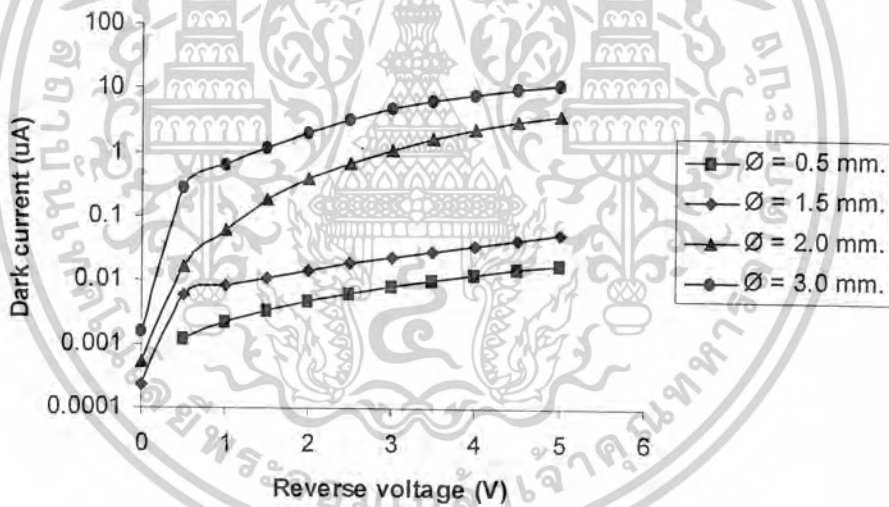


รูปที่ 4.2 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ของหมวด 303 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

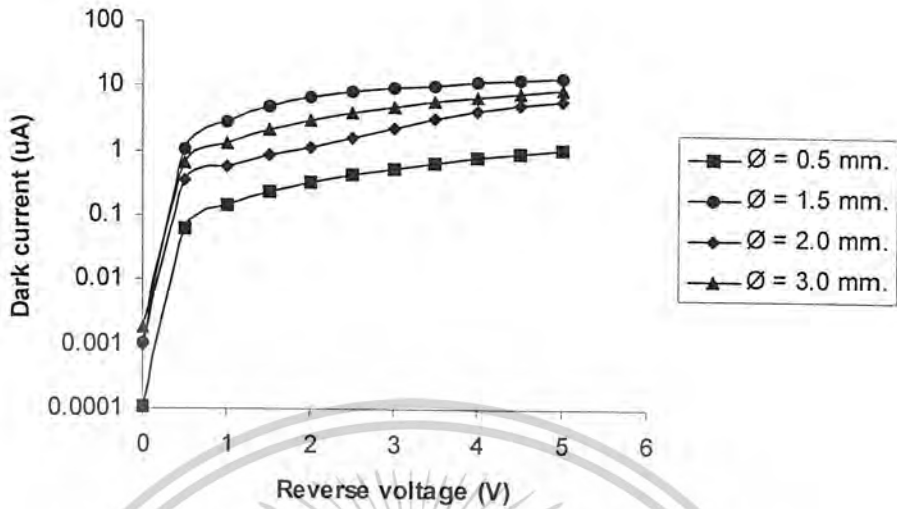


รูปที่ 4.3 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{DARK}$  ของหมวด 305 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง

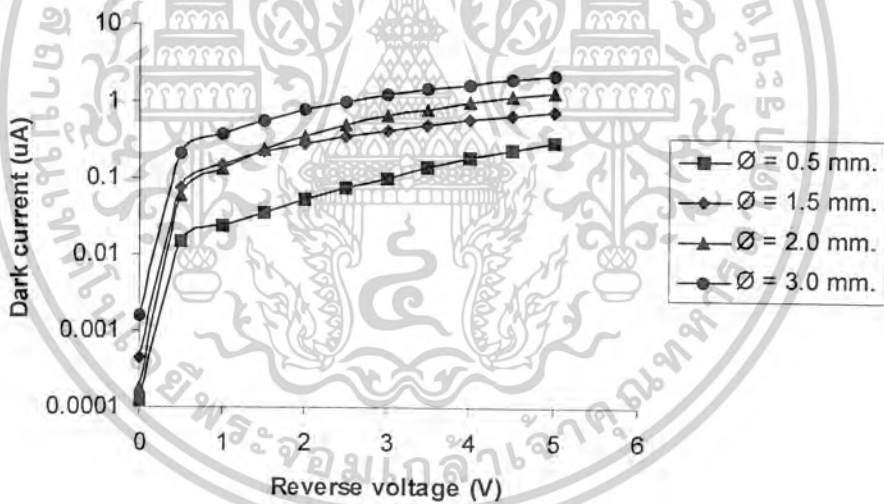


รูปที่ 4.4 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{DARK}$  ของหมวด 307 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 30 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

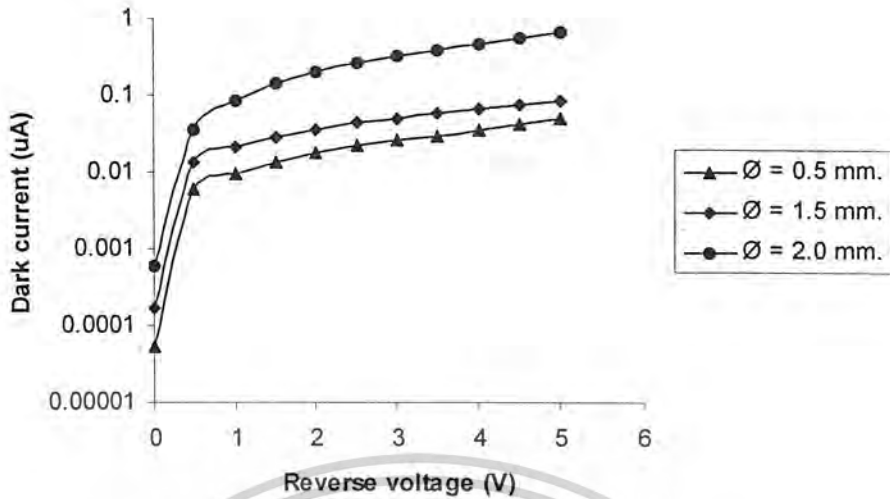


รูปที่ 4.5 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ของหมวด 503 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง

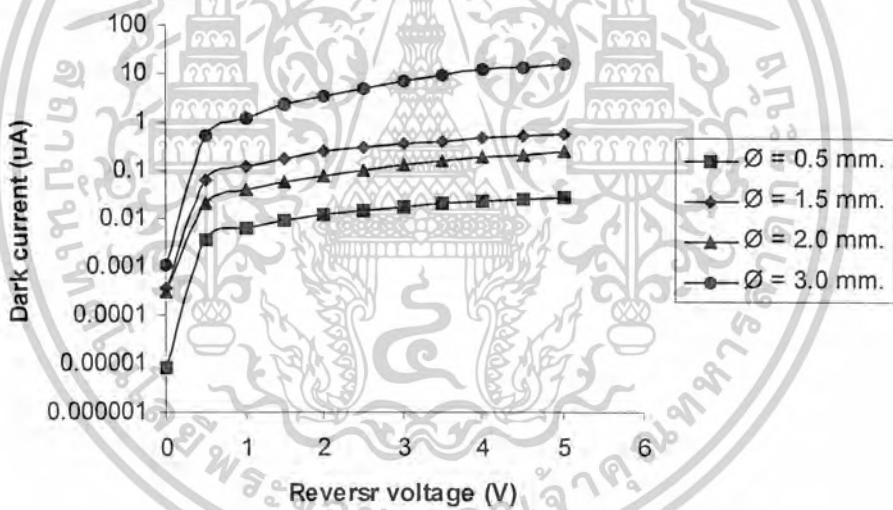


รูปที่ 4.6 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ของหมวด 505 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

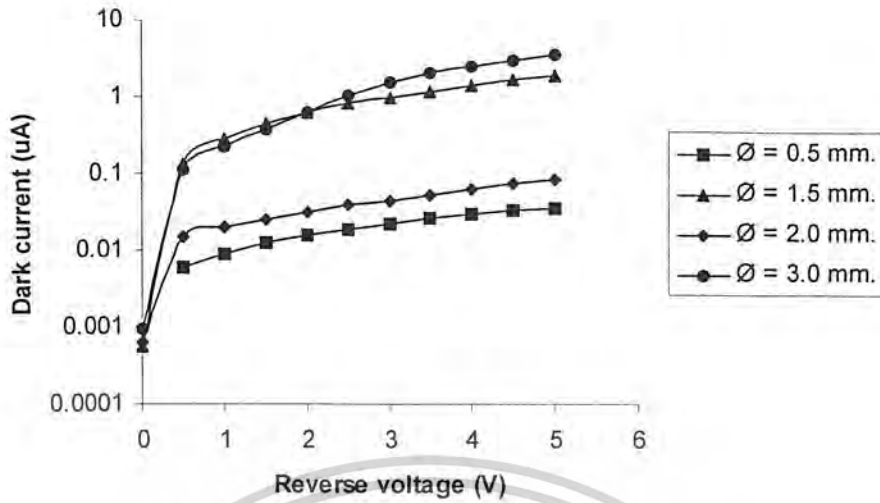


รูปที่ 4.7 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ของหมวด 507 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 50 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง

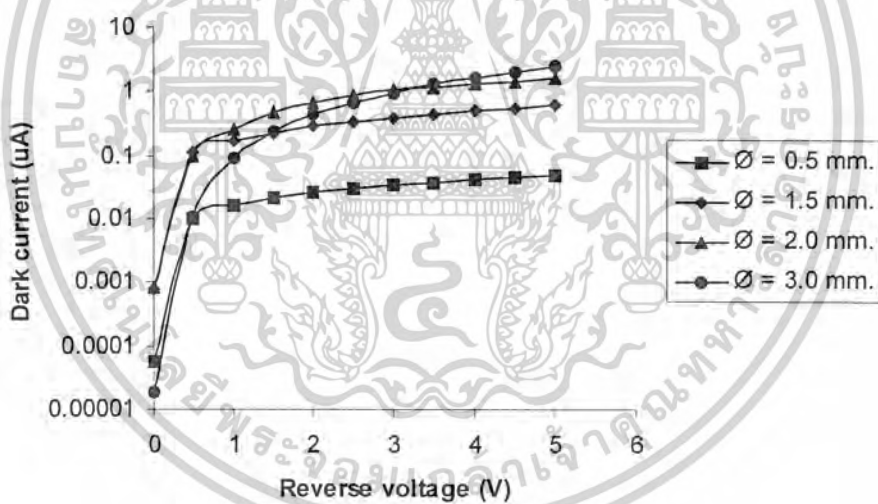


รูปที่ 4.8 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ของหมวด 703 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 3 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



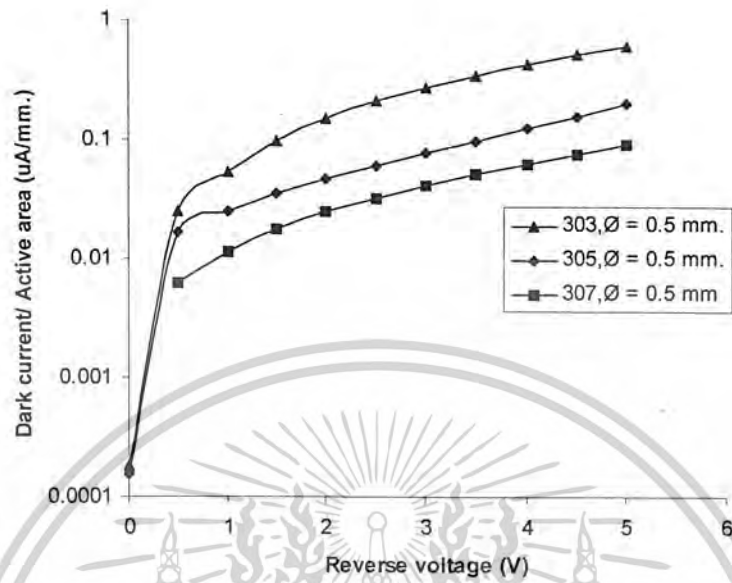
รูปที่ 4.9 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{DARK}$  ของหมวด 705 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 5 ชั่วโมง



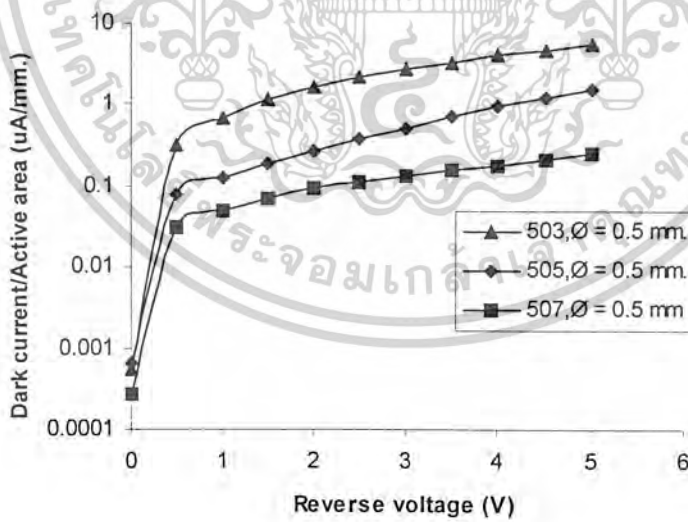
รูปที่ 4.10 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{DARK}$  ของหมวด 707 ความลึกของรอยต่อ p-i เท่ากับ 70 นาที่ ระยะของชั้น i เท่ากับ 7 ชั่วโมง

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.2 ถึง 4.10 จะเห็นว่าค่าของ  $I_{DARK}$  มีการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ เมื่อขนาดของพื้นที่รอยต่อเพิ่มขึ้นค่าของ  $I_{DARK}$  จะเพิ่มขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าค่าของ  $I_{DARK}$  จะแปรผันกับพื้นที่รอยต่อ และหากนำผลแต่ละหมวดมาเปรียบเทียบกันสามารถสรุปได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

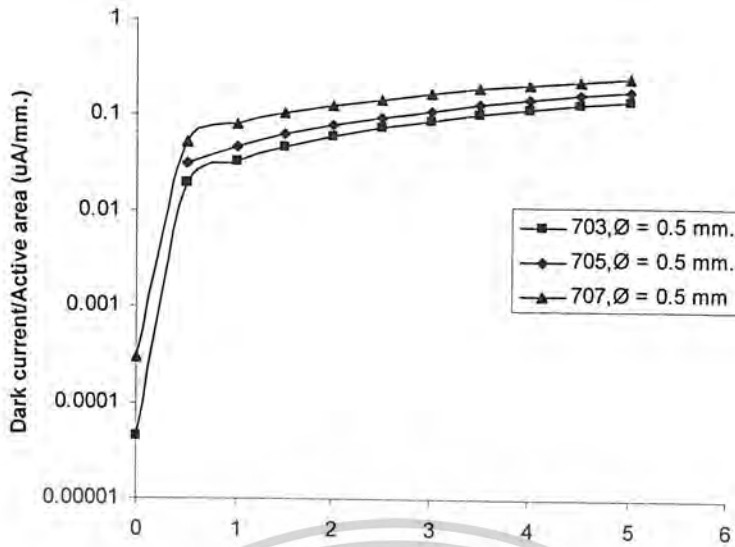


รูปที่ 4.11 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ของหมวด 303 305 และ 307



รูปที่ 4.12 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อ  $I_{\text{DARK}}$  ของหมวด 503 505 และ 507

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

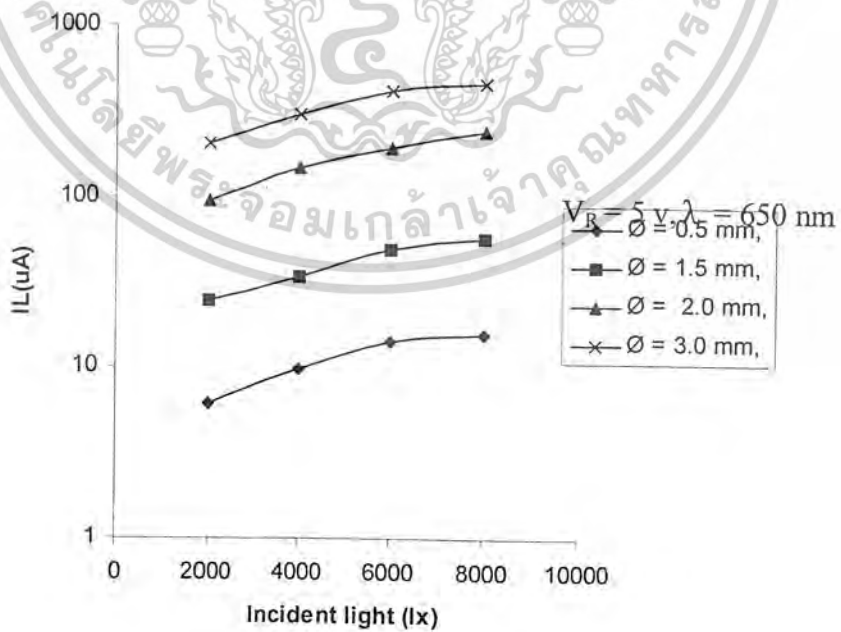


รูปที่ 4.13 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีผลต่อ  $I_{DARK}$  ของหมวด 703 705 และ 707

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.11 ถึง 4.13 เป็นการเปรียบเทียบระหว่างหมวดจะเห็นว่า นอกจากพื้นที่รอยต่อแล้ว ระยะของชั้น  $i$  ยังมีผลต่อค่าของ  $I_{DARK}$  กล่าวคือหมวดที่มีระยะของชั้น  $i$  แลบจะมีค่าของ  $I_{DARK}$  น้อยกว่าหมวดที่มีระยะของชั้น  $i$  กว้าง แต่ความแตกต่างน้อยมาก

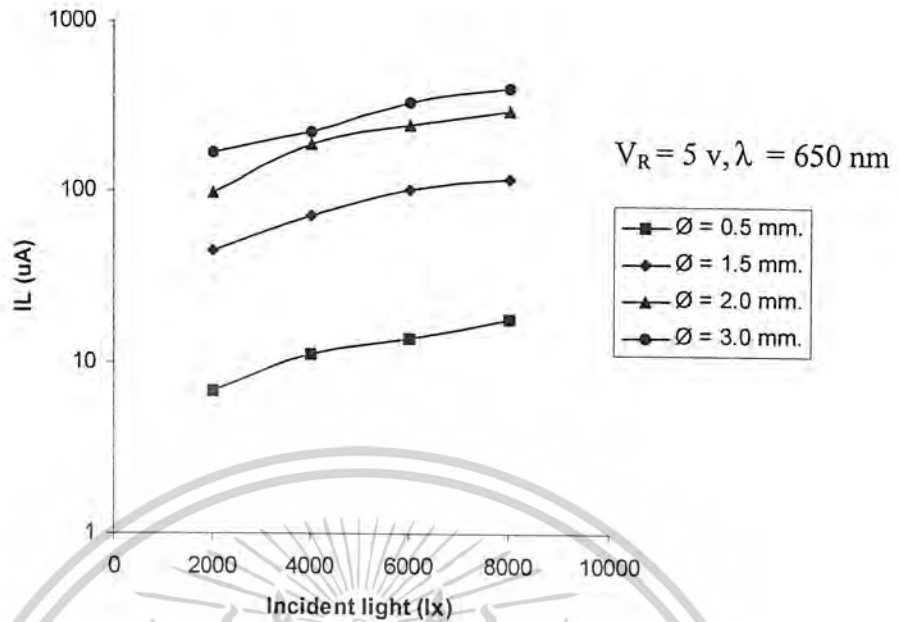
4.1.2 ศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อมีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ )

เราจะทำการเปรียบเทียบ โดยให้ขนาดพื้นที่รอยต่อต่างกัน ในขณะที่ได้รับแสงที่มีความเข้มต่างกัน

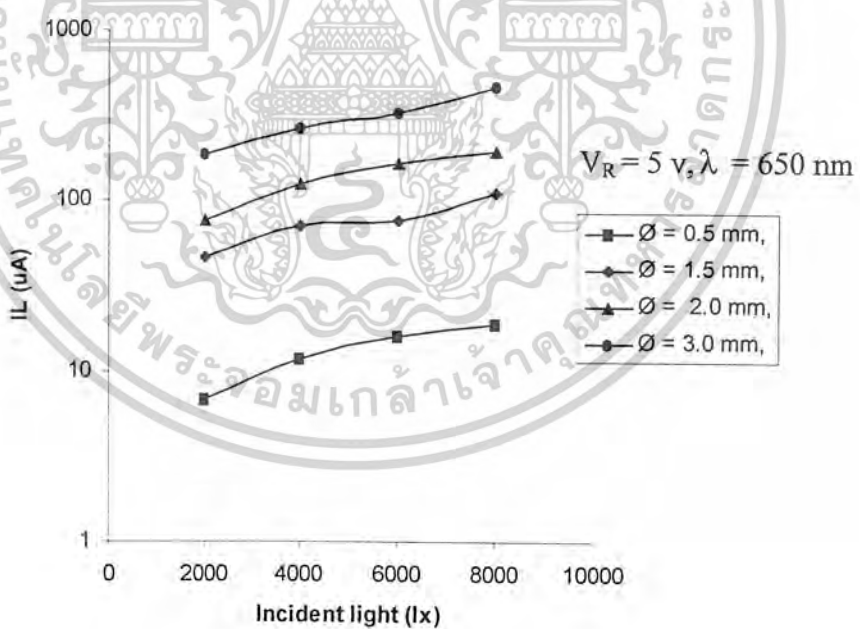


รูปที่ 4.14 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มแสงต่างกันของหมวด 303

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

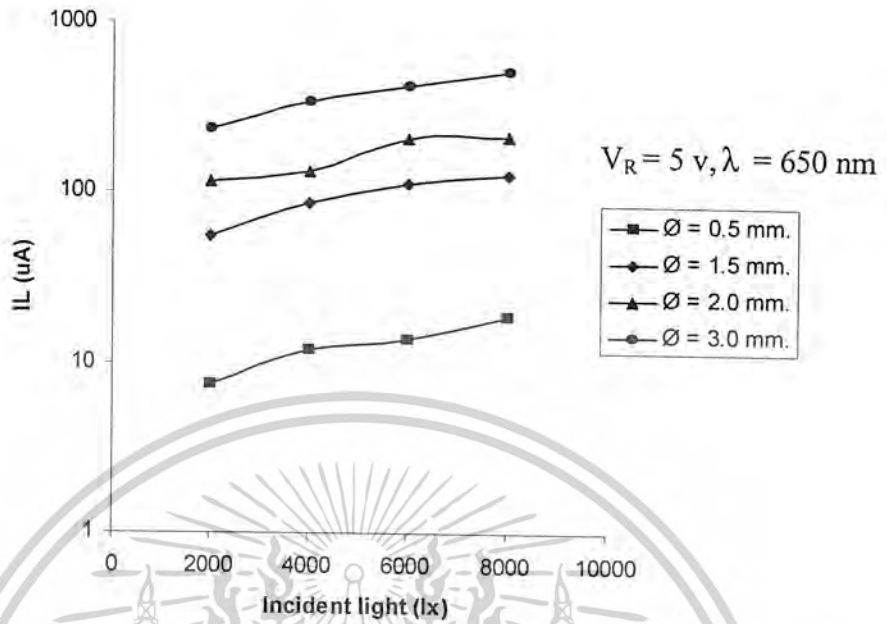


รูปที่ 4.15 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 305

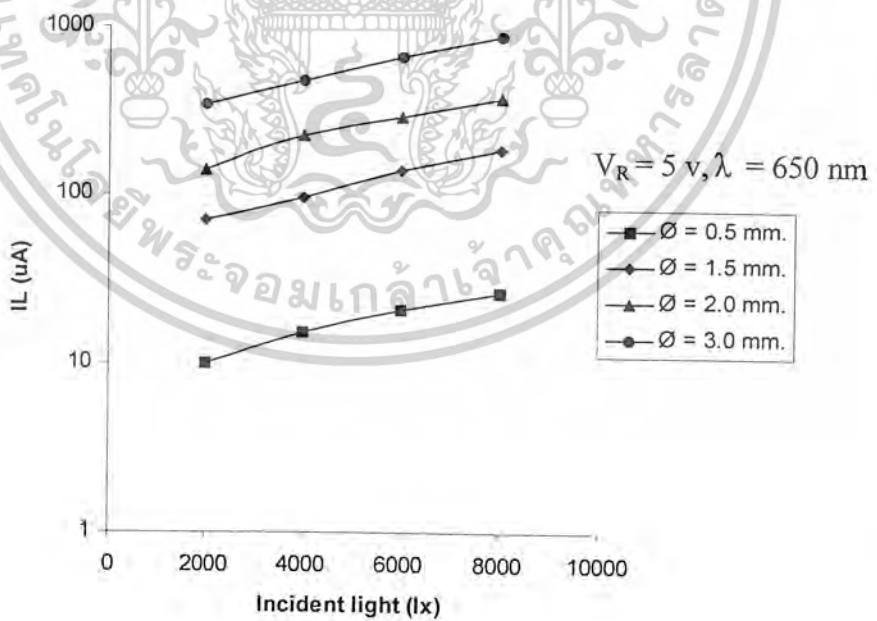


รูปที่ 4.16 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 307

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

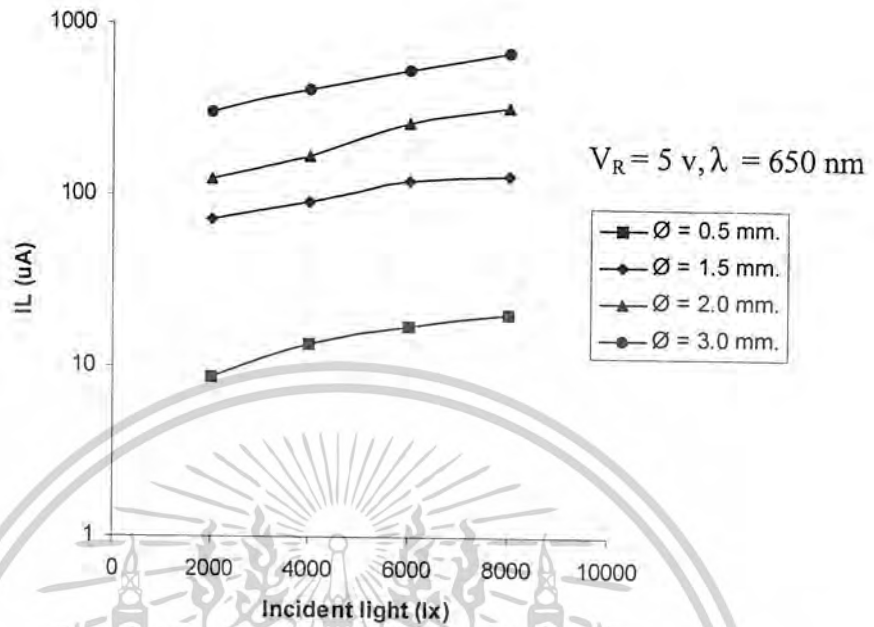


รูปที่ 4.17 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 503

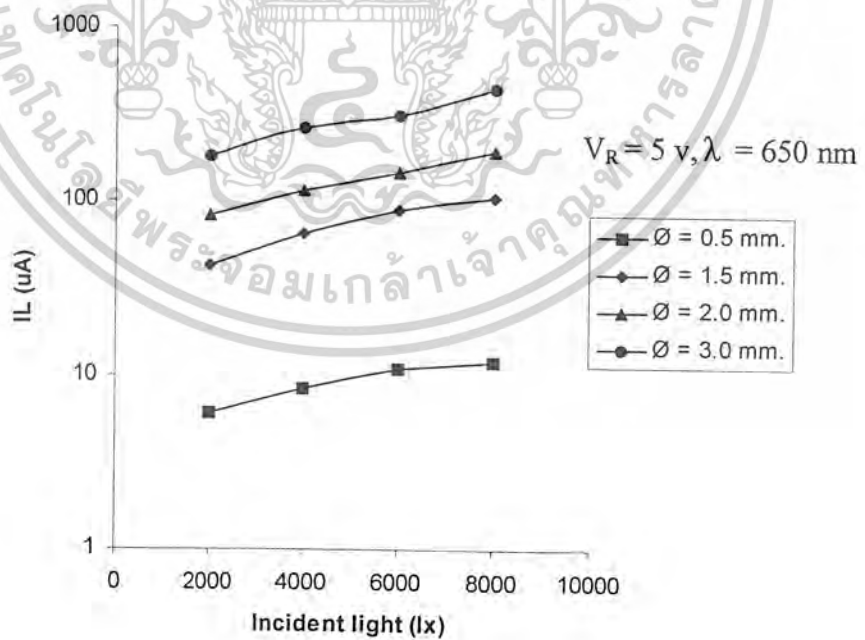


รูปที่ 4.18 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 505

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

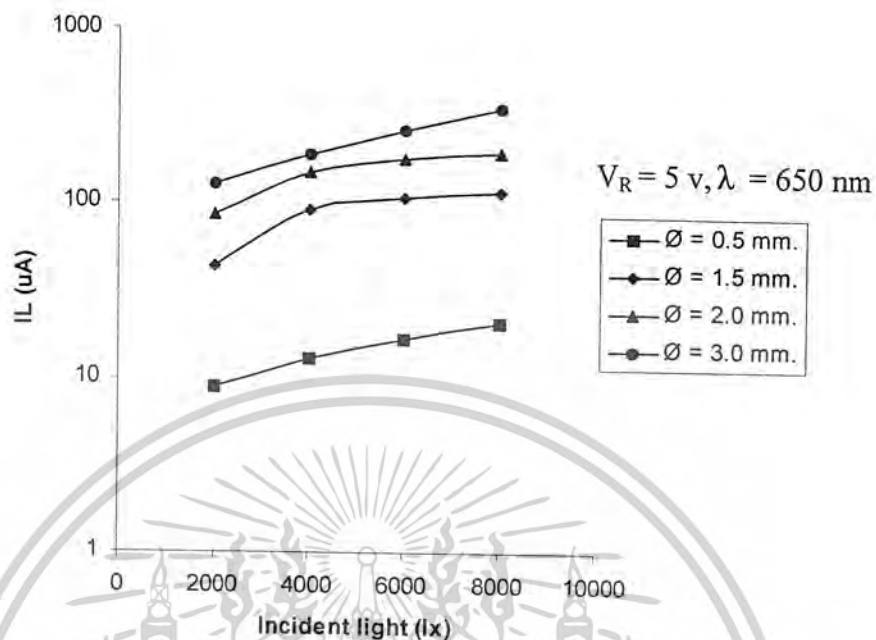


รูปที่ 4.19 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 507

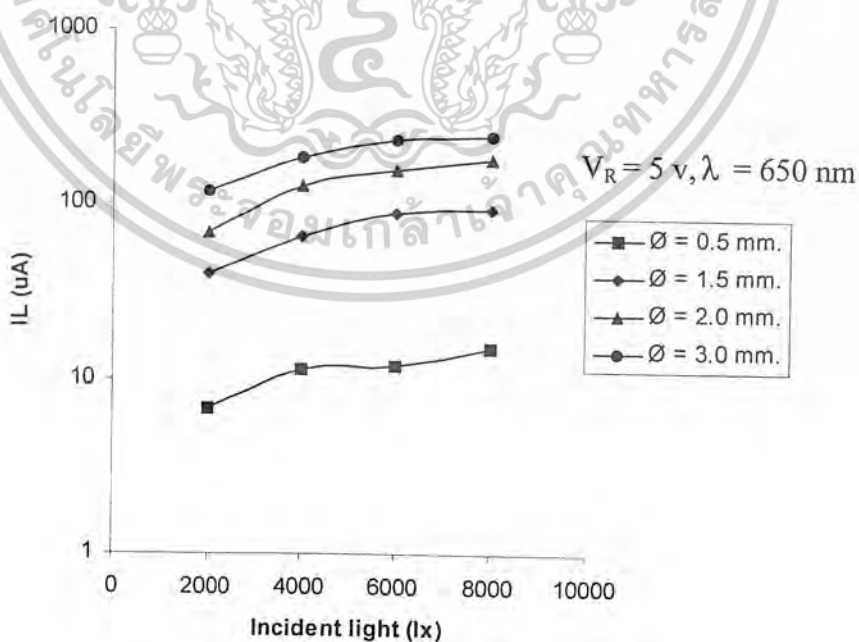


รูปที่ 4.20 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 703

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 705



รูปที่ 4.22 แสดงผลของพื้นที่รอยต่อมีต่อค่าของ  $I_L$  ขณะที่มีความเข้มต่างกันของหมวด 707

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นด้านการค้า

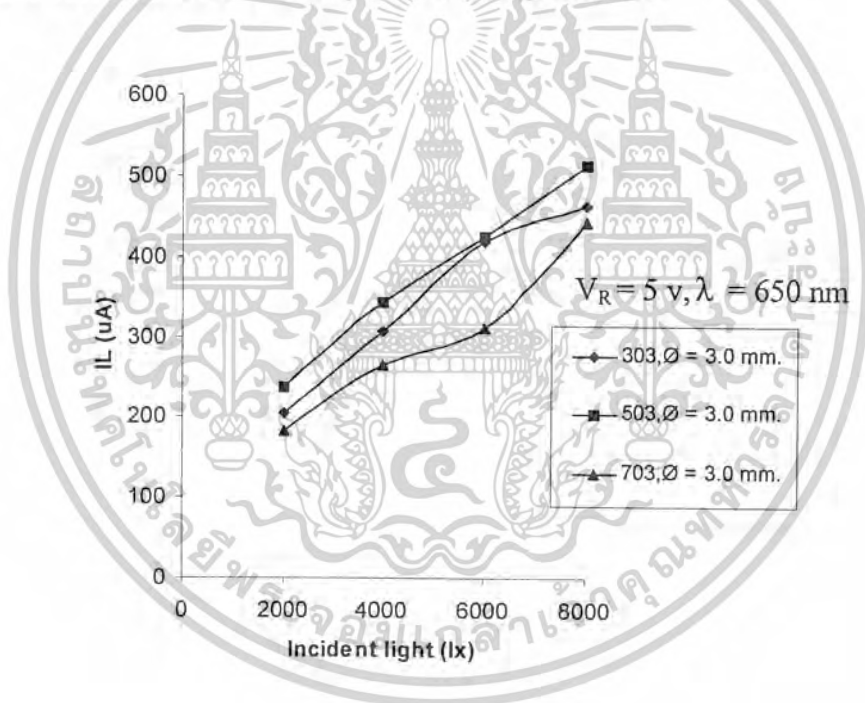
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.14 ถึง 4.22 สามารถสรุปได้ว่า พื้นที่รอยต่อมีผลต่อค่าของ  $I_L$  คือ เมื่อพื้นที่ รอยต่อเพิ่มขึ้นค่าของ  $I_L$  เพิ่มขึ้นด้วย และยังสามารถสรุปได้ว่าความเข้มของแสงมีผลต่อค่าของ  $I_L$  เช่นกัน คือ เมื่อความเข้มของแสงเพิ่มขึ้นค่าของ  $I_L$  เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าค่าของ  $I_L$  แปรผันกับพื้นที่รอยต่อและความเข้มของแสง

$$I_L = f(\text{Active area, Incident light})$$

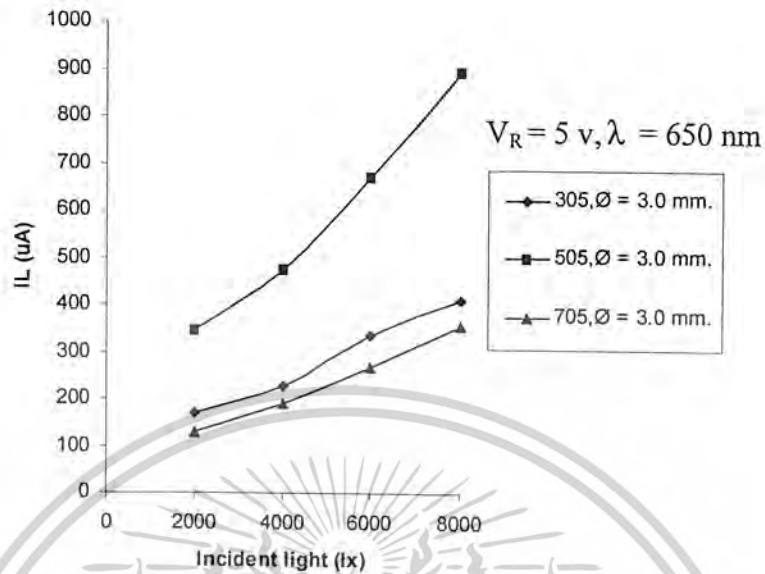
#### 4.1.3 ศึกษาผลของความถี่ของรอยต่อ p-i ที่มีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ )

เพื่อการศึกษาผลของความถี่ของรอยต่อ p-i ที่มีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ ) ของโฟโตไดโอด โดยพิจารณาความถี่ของรอยต่อ p-i ของแต่ละหมวดเปรียบเทียบกัน

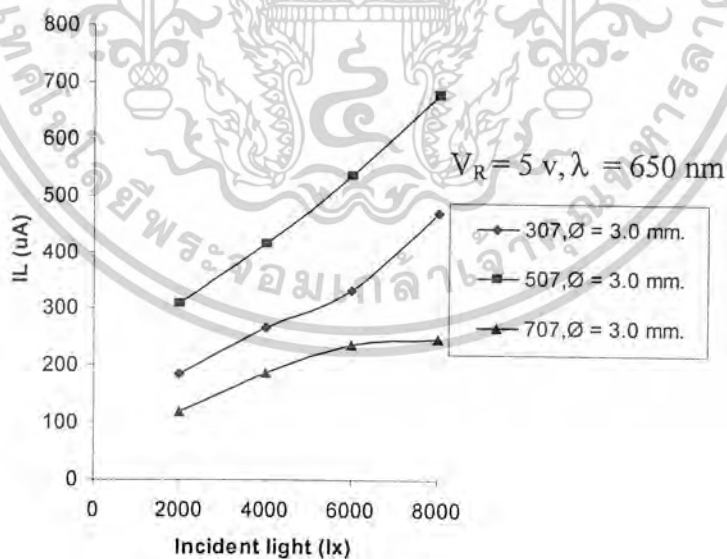


รูปที่ 4.23 แสดงผลของความถี่ของรอยต่อ p-i ที่มีผลต่อค่าของ  $I_L$  ของหมวด 303 503 และ 703 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.24 แสดงผลของความถี่ของรอยต่อ p-i ที่มีผลต่อค่าของ  $I_L$  ของหมวด 305 505 และ 705 ตามลำดับ



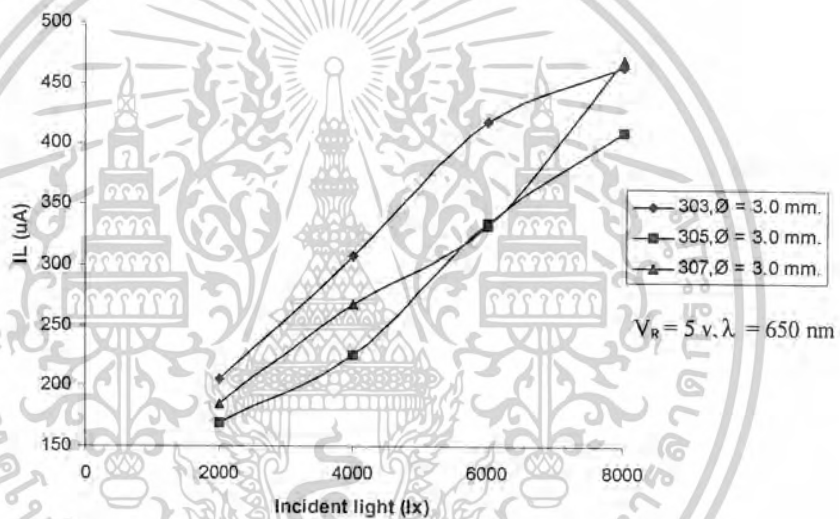
รูปที่ 4.25 แสดงผลของความถี่ของรอยต่อ p-i ที่มีผลต่อค่าของ  $I_L$  ของหมวด 307 507 และ 707 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกราฟรูปที่ 4.23 ถึง 4.25 จะเห็นได้ว่า โฟโตไดโอดที่มีความลึกของรอยต่อ p-i ที่เวลา 50 นาที ให้ค่าของ  $I_L$  สูงสุด รองลงมาเป็น โฟโตไดโอดที่มีความลึกของรอยต่อ p-i ที่เวลา 30 นาที และ โฟโตไดโอดที่มีความลึกของรอยต่อ p-i ที่เวลา 70 นาที มีค่าของ  $I_L$  น้อยที่สุด ดังนั้นสามารถได้ว่าชนิดของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีความลึกของรอยต่อ p-i ที่เวลา 50 นาที มีความเหมาะสมที่สุด

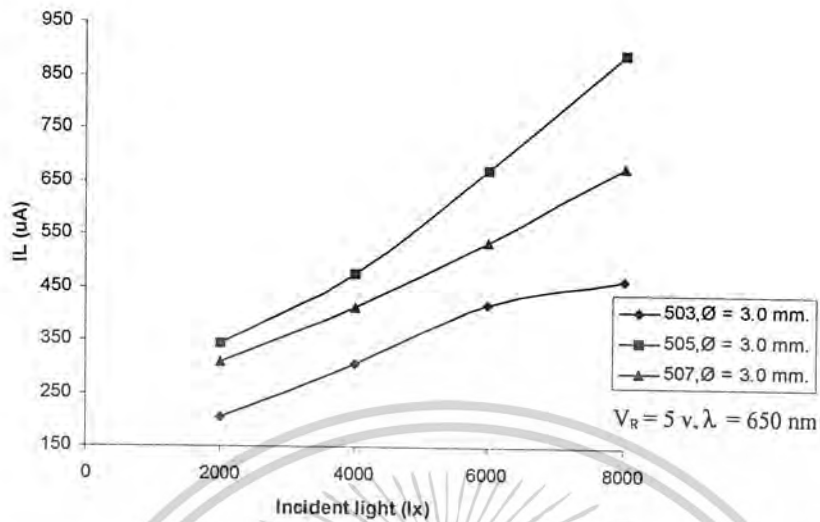
#### 4.1.4 ศึกษาผลของระยะของชั้น i ที่มีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ )

เพื่อการศึกษาผลของระยะของชั้น i ที่มีผลต่อกระแสแสง ( $I_L$ ) ของโฟโตไดโอด โดยพิจารณาระยะของชั้น i ของแต่ละหมวดเปรียบเทียบกัน

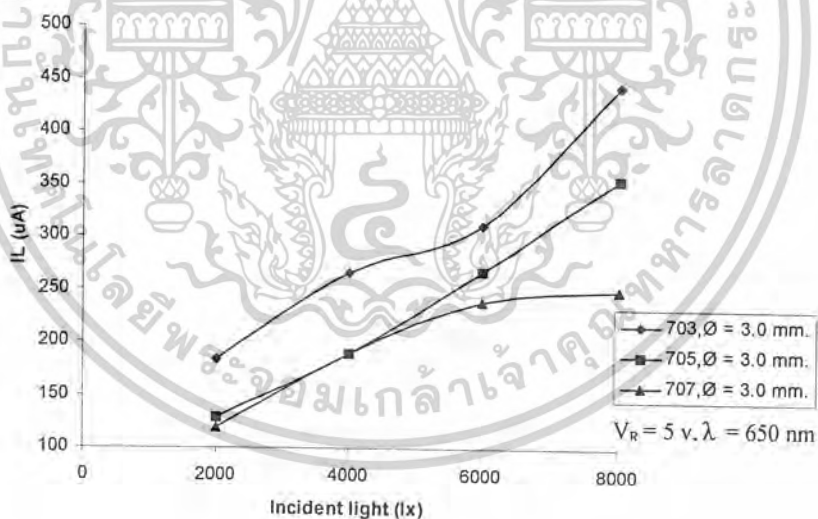


รูปที่ 4.26 แสดงผลของระยะของชั้น i ที่มีผลต่อค่าของ  $I_L$  ของหมวด 303 305 และ 307 ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.27 แสดงผลของระยะของชั้น  $i$  ที่มีผลต่อค่าของ  $I_L$  ของหมวด 503 505 และ 507 ตามลำดับ



รูปที่ 4.28 แสดงผลของระยะของชั้น  $i$  ที่มีผลต่อค่าของ  $I_L$  ของหมวด 703 705 และ 707 ตามลำดับ

จากกราฟรูปที่ 4.26 ถึง 4.28 จะเห็นได้ว่าระยะของชั้น  $i$  ที่มีผลต่อค่าของ  $I_L$  ของโฟโตไดโอดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น โดยค่าของ  $I_L$  มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อระยะของชั้น  $i$  กว้างขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

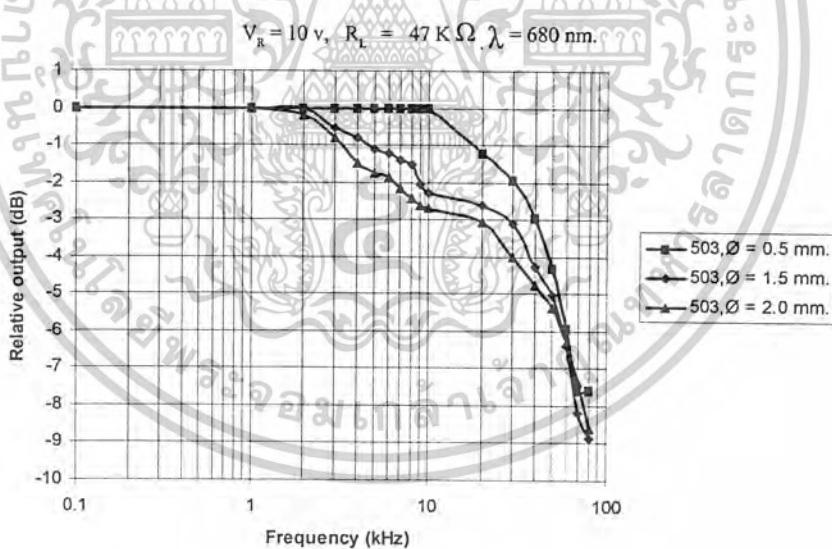
## 4.2 การทดลองหาคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

เพื่อศึกษาคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จึงนำโฟโตไดโอดที่สร้างไปทำการทดลองการทดลองหาคุณสมบัติการตอบสนองความถี่



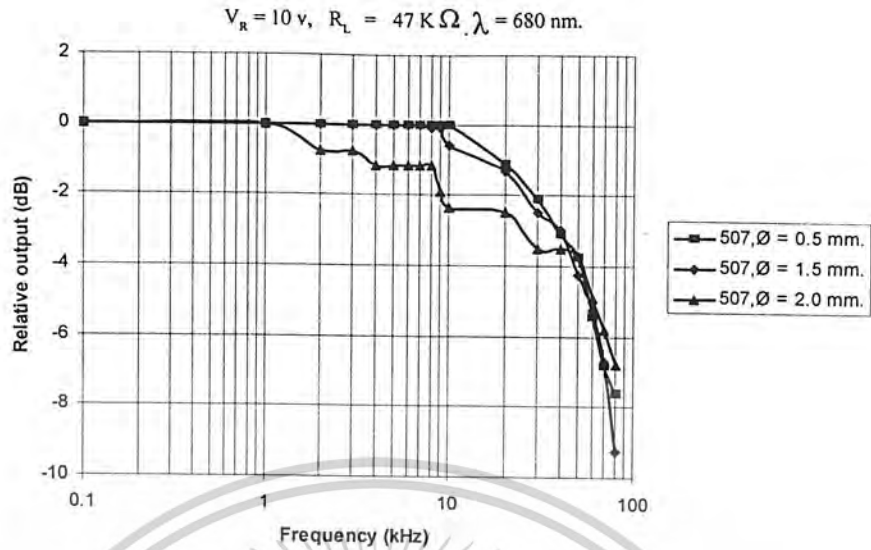
รูปที่ 4.29 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

### 4.2.1 การศึกษาผลขนาดพื้นที่รอยต่อต่อการตอบสนองความถี่



รูปที่ 4.30 แสดงผลของขนาดพื้นที่รอยต่อต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 503

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

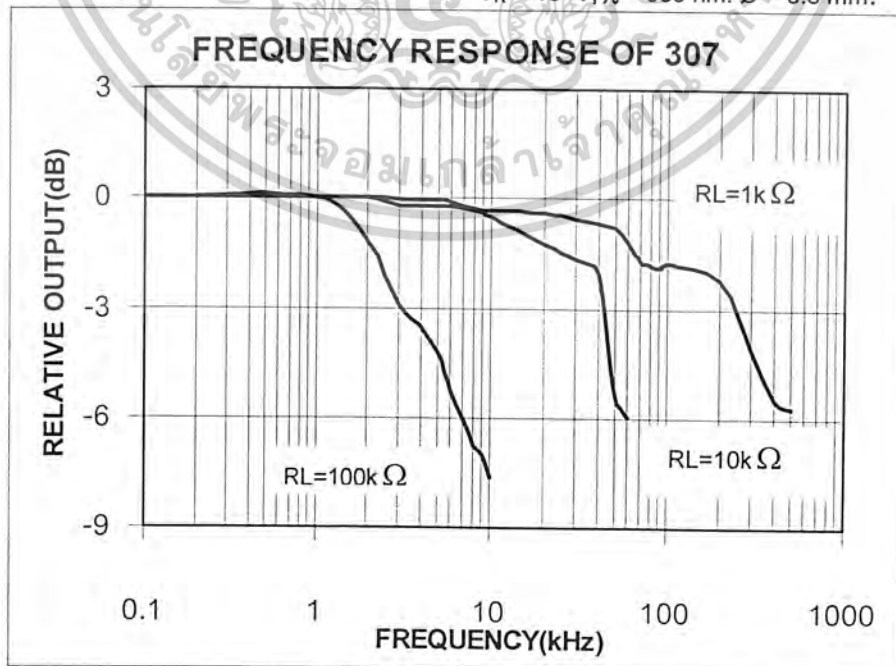


รูปที่ 4.31 แสดงผลของขนาดพื้นที่รอยต่อต่อการตอบสนองความถี่ของหลอด 507

จากกราฟรูปที่ 4.29 และ 4.30 จะเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่รอยต่อต่อการตอบสนองความถี่ โดยค่า Relative output มีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดพื้นที่รอยต่อเพิ่มขึ้น นั่นคืออุปกรณ์ที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อเล็กๆ จะมีความเร็วในการทำงานสูง

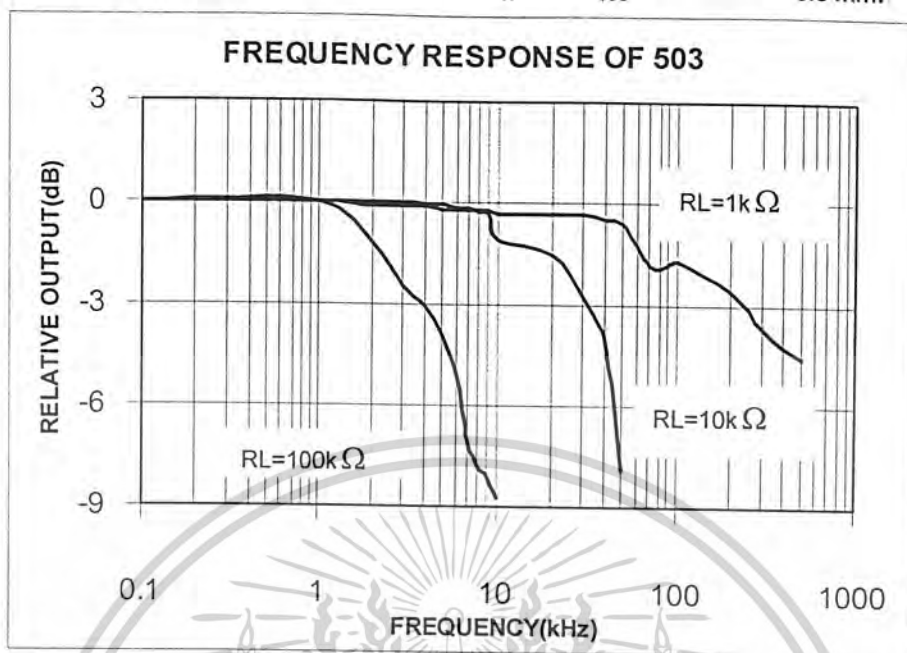
#### 4.2.2 การศึกษาผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่

$V_R = 10 \text{ V}$ ,  $\lambda = 680 \text{ nm}$ ,  $\text{Ø} = 0.5 \text{ mm}$ .



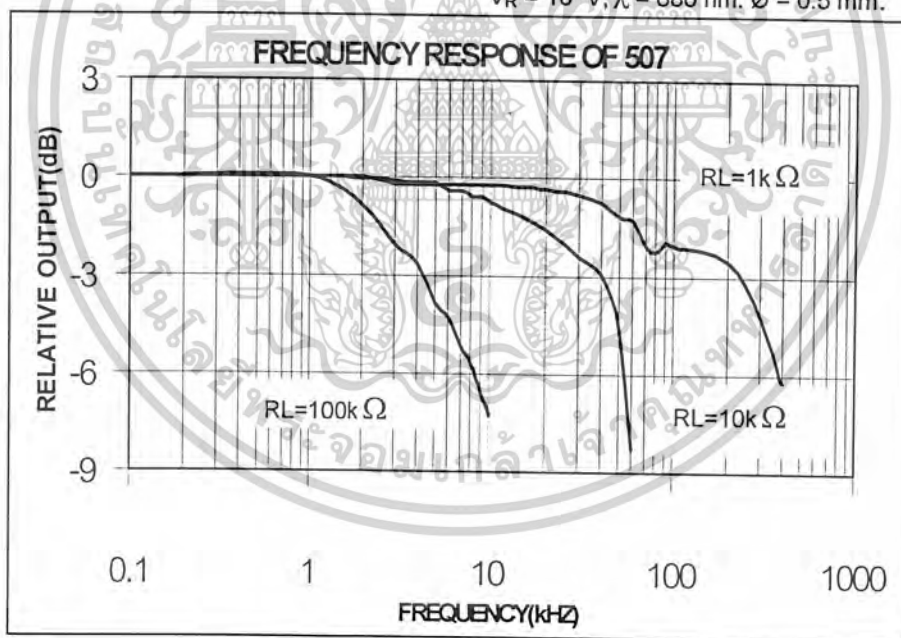
รูปที่ 4.32 แสดงผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่ของหลอด 307 ด้านการค่า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$V_R = 10 \text{ V}, \lambda = 680 \text{ nm}, \varnothing = 0.5 \text{ mm.}$$



รูปที่ 4.33 แสดงผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 503

$$V_R = 10 \text{ V}, \lambda = 680 \text{ nm}, \varnothing = 0.5 \text{ mm.}$$



รูปที่ 4.34 แสดงผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่ของหมวด 507

จากกราฟรูปที่ 4.21 ถึง 4.33 จะเห็นได้ว่าความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่ โดยค่า Relative output มีแนวโน้มลดลงเมื่อค่าความต้านทานภายนอกเพิ่มขึ้น จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าความต้านทานภายนอกน้อยทำให้ความเร็วตอบสนองสูงขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริศยานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ซึ่งในส่วนแรกนี้เป็นการศึกษาคูสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด ในส่วนของการศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อกระแสเมื่อดำเนินการทดลอง เนื่องจากขนาดพื้นที่รอยต่อเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด ดังนั้นเพื่อการศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อกระแสเมื่อดำเนินการ โดยการสร้างโฟโตไดโอดให้มีขนาดพื้นที่รอยต่อต่างกันคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5, 1.5, 2.0 และ 3.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งกระแสมีค่าประมาณ 10, 100, 300 และ 10000 nA. ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าของกระแสเปลี่ยนแปลงตามขนาดพื้นที่รอยต่อกล่าวคือ กระแสจะเพิ่มตามขนาดพื้นที่รอยต่อ ทั้งนี้ขณะโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและไม่ได้รับแสงใดๆ จะมีกระแสอิ่มตัวย้อนกลับไหลผ่าน โฟโตไดโอด ซึ่งกระแสอิ่มตัวย้อนกลับจะแปรผันกับขนาดพื้นที่รอยต่อ นอกจากนี้จากการทดลองดังกล่าวยังพบว่าค่าของกระแสมีค่าขึ้นอยู่กับระยะของชั้น i อีกด้วย แต่ไม่ได้เปลี่ยนแปลงตามระยะของชั้น i มากนัก โดยมีแนวโน้มค่าของกระแสจะเพิ่มตามระยะชั้น i ที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย ระดับพลังงานซึ่งช่วยให้เกิดกระบวนการ R-G

ในส่วนของการศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อกระแสแสง เพื่อการศึกษาผลของขนาดพื้นที่รอยต่อที่มีผลต่อกระแสแสง โดยการสร้างโฟโตไดโอดให้มีขนาดพื้นที่รอยต่อต่างกันคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5, 1.5, 2.0 และ 3.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ที่ความเข้มแสง 8000 lx. ซึ่งกระแสแสงมีค่าประมาณ 20, 200, 400 และ 1000  $\mu$ A. ตามลำดับ เห็นได้ชัดว่าปริมาณของกระแสแสงเพิ่มตามขนาดพื้นที่รอยต่อและความเข้มของแสง โดยอุปกรณ์ขนาดพื้นที่รอยต่อมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร มีกระแสประมาณ 1 mA. ในขณะที่อุปกรณ์ขนาดพื้นที่รอยต่อมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร มีกระแสประมาณ 20  $\mu$ A. จะเห็นได้ว่าขนาดพื้นที่รอยต่อต่างกัน 6 เท่า แต่ปริมาณกระแสแสงต่างกันถึง 50 เท่า ดังนั้นเห็นชัดว่าปริมาณกระแสแสงแปรผันกับขนาดพื้นที่รอยต่อของโฟโตไดโอด จึงควรเพิ่มขนาดพื้นที่รอยต่อของโฟโตไดโอดเพื่อให้มีค่ากระแสแสงสูงแต่จะมีผลต่อความเร็วของโฟโตไดโอดได้

การศึกษาคูสมบัติของรอยต่อ p-i มีผลต่อกระแสแสง เพื่อการศึกษาผลของขนาดความลึกของรอยต่อที่มีผลต่อกระแสแสง เพื่อให้ได้ความลึกของรอยต่อที่เหมาะสมที่สุดทำการทดลอง Drive-in ที่เวลาต่าง ๆ กัน คือ 30, 50 และ 70 นาที จากการเปรียบเทียบผลการทดลองจะเห็นว่าที่ความลึกของรอยต่อ 50, 30 และ 70 นาที ให้ปริมาณกระแสจากมากไปหาน้อยตามลำดับ สังเกตว่าที่ความลึกของรอยต่อ 50 นาที นั้นเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตถือว่าผิดกฎหมาย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากให้กระแสสูงสุด ทั้งนี้เกิดจากเป็นระยะที่เหมาะสมที่สุดในการรับหรือดูดกลืนรังสีแสง ความถี่ต่างๆ จึงทำให้ได้กระแสแสงสูงสุด

ในการศึกษาผลของระยะชั้น  $i$  เพื่อการศึกษาผลของระยะชั้น  $i$  ที่มีผลต่อกระแสแสง ทำการรวบรวมการ Drive-in ที่เวลาต่าง ๆ กัน คือ 3, 5 และ 7 ชั่วโมง จากการเปรียบเทียบผลการทดลองจะเห็นว่าการรวบรวมที่มีผลต่อกระแสแสงนั้นไม่สามารถสรุปได้ชัดเจน เนื่องจากปริมาณกระแสแสงใกล้เคียงกันมาก ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างนั้นมีระยะของชั้น  $i$  ที่มีความหนาประมาณ  $490 \mu\text{m}$ . ดังนั้นที่ระยะของชั้น  $i$  ที่เวลา Drive-in ที่เวลาต่าง ๆ กัน 3, 5 และ 7 ชั่วโมง อาจมีระยะการแพร่ที่ต่างกันน้อยมากเมื่อเทียบกับระยะ  $490 \mu\text{m}$ . จึงทำให้ผลของกระแสแสงใกล้เคียงกัน

ต่อมาในการศึกษาการทดลองหาคุณสมบัติการตอบสนองความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ในส่วนของการศึกษาการศึกษาผลขนาดพื้นที่รอยต่อต่อการตอบสนองความถี่ เพื่อการศึกษาการศึกษาผลขนาดพื้นที่รอยต่อต่อการตอบสนองความถี่ โดยการสร้างโฟโตไดโอดให้มีขนาดพื้นที่รอยต่อต่างกันคือ มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5, 1.5, และ 2.0 มิลลิเมตร ตามลำดับ ซึ่งการตอบสนองความถี่ที่  $-3\text{dB}$  มีค่าประมาณ 40, 30 และ 20 KHz. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดของพื้นที่รอยต่อเพิ่มขึ้นระดับความถี่ในการตอบสนองจะลดลง จากวงจรสมมูลย์ของโฟโตไดโอด จะเห็นได้ว่าพื้นที่รอยต่อมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ดังนั้นโฟโตไดโอดที่ใช้งานในความถี่สูง จึงต้องมีขนาดพื้นที่รอยต่อที่เล็ก ๆ เพื่อลดผลค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ

และจากการศึกษาการศึกษาผลของความต้านทานภายนอกต่อการตอบสนองความถี่นั้น โดยโฟโตไดโอดให้มีขนาดพื้นที่รอยต่อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร มีค่าความต้านทานภายนอก 1, 10 และ 100  $\text{K}\Omega$ . ตามลำดับ ซึ่งการตอบสนองความถี่ที่  $-3\text{dB}$  มีค่าประมาณ 250, 40 และ 4 KHz. ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อขนาดความต้านทานภายนอกของเพิ่มขึ้นระดับความถี่ในการตอบสนองจะลดลง เพราะค่าเวลาคงที่ RC เกี่ยวข้องกับค่าความต้านทานภายนอก และค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ แต่เมื่อความหนาของชั้น  $i$  เพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อจะลดลงด้วยเหตุนี้โฟโตไดโอดแบบ p-i-n จึงมีความไวในการดูดกลืนโฟตอนสูง และผลตอบสนองความถี่สูงได้ดี เนื่องจากความหนาของชั้น  $i$  มีค่ามาก

## บรรณานุกรม

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์,” แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542

รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ,” แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์

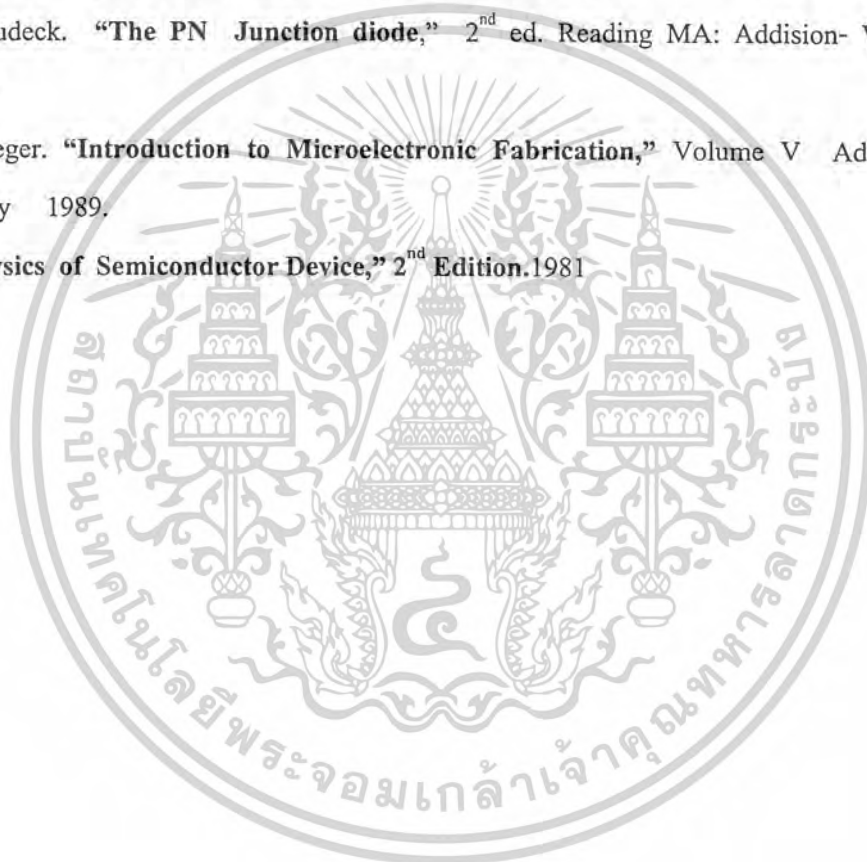
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545

Desmarais Louis, “Applied Electro- optics,” Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall PTR.1998.

Gerold W. Neudeck. “The PN Junction diode,” 2<sup>nd</sup> ed. Reading MA: Addison- Wesley  
1989.

Richard C. Jaeger. “Introduction to Microelectronic Fabrication,” Volume V Addison-  
Wesley 1989.

Sze “S.M.Physics of Semiconductor Device,” 2<sup>nd</sup> Edition.1981



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้