การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

STUDY ON CHARACTERIZATION AND FABRICATION OF VERTICAL MULTI STRIPE-SHAPED SILICON PIN PHOTODIODES

จิรวัฒน์ ปราบเขต

JIRAWAT PRABKET

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL-2007-EN-M-043-083

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

STUDY ON CHARACTERIZATION AND FABRICATION OF VERTICAL MULTI STRIPE-SHAPED SILICON PIN PHOTODIODES



จิรวัฒน์ ปราบเขต

JIRAWAT PRABKET

ลขหมู่.....
ลขทะเบียน.....76758
วัน,เดือน,ปี.....- 6 S.A. 2550

.b.....
.i.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2550

KMITL – 2007 – EN – M – 043 – 083

COPYRIGHT 2007

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

Study on Characterization and Fabrication of Vertical Multi Stripe-Shaped Silicon PIN Photodiodes

นักศึกษา นายจิรวัฒน์ ปราบเขต

รหัสประจำตัว 48061305

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	
ดร.อัมพร	โพธิ์ใย	
รศ.สมศักดิ์	เชียร์ศิริกุล	
รศ.ดร.สมเกียรติ	ศุภเดช	

วัน / เดือน/ ปี ที่สอบ 10 ตุลาคม 2550 เวลา 09.00-11.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 3

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รศ.ดร.จารุวัตร เจริญสุข)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....๑๗.....**เดือน**...ตุลาคม.....**พ.ศ.**.๒๕๕๐....

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ
นักศึกษา	นายจิรวัฒน์ ปราบเขต
รหัสประจำตัว	48061305
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2550
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลการพัฒนาโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ เพื่อเพิ่มสมรรถนะของโฟโตไดโอดให้มีสภาพตอบสนองทางแสงสูง และ มีกระแสมืดต่ำ โดยออกแบบให้เป็นโครงสร้างที่มีชั้นอินทรินซิค และชั้นปลอดพาหะอยู่ที่บริเวณผิว เพื่อเพิ่มกระแสแสง นอกจากนี้ยังมีการ์ดริงล้อมรอบเพื่อลดกระแสรั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้น Si/SiO_2 และในเนื้อสาร ซึ่งโครงสร้างนี้แตกต่างจากโครงสร้างของโฟโตไดโอดทั่วๆไป จากผลการทดลองพบว่า ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบใหม่นี้จะมีสมรรถนะที่ดีขึ้นสามารถเพิ่มสภาพตอบสนองทางแสงเป็น 0.25 A/W (λ = 400 nm), 0.40 A/W (λ = 550 nm), 0.45 A/W (λ = 650 nm), 0.48 A/W (λ = 750 nm) และ 0.51 A/W (λ = 850 nm) กระแสมืดมีค่า 3.1 nA และ 8.3 nA ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 3 V และ 10 V ตามลำดับ เมื่อทดสอบภายใต้การฉายแสง UVC สามารถให้กระแสแสงเพิ่มขึ้นประมาณ 90 % นอกจากนี้ยังศึกษาผลการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ โดยใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ที่มีแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40 - 100 kVp. เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโตไดโอดนี้สามารถตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ดี ทั้งแบบวิธีการทางตรง และวิธีการทางอ้อมโดยผ่านชั้นสารเรืองแสง ทั้งยังมีคุณสมบัติในการตอบ สนองต่อรังสีเอ็กซ์เป็นแบบเชิงเส้นอีกด้วย ชี้ให้เห็นว่าโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบเป็นตัวตรวจจับแสงที่ดี มีสภาพตอบสนองทางแสงสูง ทำงานในช่วงสเปกตรัมกว้าง และกระแสมืดต่ำ ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางต่อไป

Thesis	Study on Characterization and Fabrication of Vertical Multi Stripe-Shaped Silicon PIN Photodiodes
Student	Mr.Jirawat Prabket
Student ID.	48061305
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2007
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somkiat Supadech

ABSTRACT

This thesis presents the structural development of a vertical multi stripe-shaped silicon PIN photodiodes to improve the performance such as responsivity and dark current. In the new structure, the depletion layer are at the surface of silicon PIN photodiode (surface depletion layer) and surrounded with guard ring layer is to reduce the Si/SiO_2 interface and bulk leakage current, it is different from that of the conventional photodetector. From the experimental results it was found that this new structured silicon PIN photodiode shows the higher performance namely, increase the responsivity of 0.25 A/W (λ = 400 nm), 0.40 A/W (λ = 550 nm), 0.45 A/W (λ = 650 nm), 0.48 A/W (λ = 750 nm) and 0.51 A/W (λ = 850 nm) could be reached. The dark current was 3.1 nA and 8.3 nA under 3 V and 10 V reverse bias voltage, respectively, when testing with the UVC-light source that can increase the photocurrent to be about 90 %. Additionally, the study results on silicon PIN photodiodes as X-ray detector, the X-ray tube with voltage supply of 40 - 100 kVp. was used as X-ray source. From experimental results, it is evident that the detector can detect the X-ray by directly and indirectly exposure. Moreover, It also shows the good linearity of output resposivity, this means silicon photodiode that the structure of the vertical multi stripe-shaped is very advantageous to the photodetector in becoming a high responsivity, wide spectrum and low dark current device, this experimental data can be purposed for a widely applications of this detector

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มโดยสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ศุภเดช ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

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

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์.ดร. มนัส สังวรศิลป์ และรองศาสตราจารย์.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดลอง และเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2549

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้องของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จิรวัฒน์ ปราบเขต

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญตาราง.....VIII

สารบัญรูป.....IX

รายการคำย่อ.....XV

รายการสัญลักษณ์.....XVI

รายการศัพท์เทคนิค.....XVII

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....1

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....2

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....3

1.5 ขอบเขตการวิจัย.....3

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....4

บทที่ 2 โฟโตไดโอด.....5

2.1 บทนำ.....5

2.2 หลักการพื้นฐานของโฟโตไดโอด.....6

2.2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....7

2.2.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด.....9

2.2.2.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด.....10

2.2.2.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....11

2.2.3 โหมดการทำงานของโฟโตไดโอด.....12

2.2.3.1 โหมดโฟโตคอนดักทีฟ.....12

2.2.3.2 โหมดโฟโตโวลตาอิก.....13

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 ชนิดของโฟโตไดโอด.....14
2.3.1 โฟโตไดโอดชนิด PN 14
2.3.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN 15
2.3.3 โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์ 16
2.3.4 โฟโตไดโอดชนิด MSM 17
2.4 การประยุกต์ใช้งานซิลิคอนโฟโตไดโอด.....18

บทที่ 3 โครงสร้าง หลักการทำงาน และการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง.....22
3.1 โครงสร้าง และหลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด PIN 22
3.1.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด PIN..... 23
3.1.2 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ.....26
3.1.3 ความจุไฟฟ้ารอยต่อ.....28
3.2 ลักษณะสมบัติสำคัญต่างๆ ของโฟโตไดโอดชนิด PIN 29
3.2.1. ประสิทธิภาพควอนตัม.....29
3.2.2 สภาพการตอบสนอง..... 30
3.2.3 ความเร็วในการตอบสนอง..... 30
3.2.4 เวลาการตอบสนองและแบนด์วิดท์.....31
3.2.5 การเกิดสัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอด.....34
3.2.6 พฤติกรรมการเกิดกระแสมืด..... 36
3.2.6.1 ส่วนประกอบกระแสการแพร่ 37
3.2.6.2 กระแสการเกิดและการรวมตัวใหม่ 39
3.2.6.3 กลไกการเกิดกระแสทะลุกำแพงศักย์ 39
3.2.6.4 กระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัส 41
3.3 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ.....41
3.4 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง.....43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.5 การออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง.....47
3.5.1 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ.....47
3.5.2 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง.....48
3.5.3 การออกแบบลวดลายและการสร้างโฟโตมาส์ก.....50
3.5.3.1 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ.....50
3.5.3.2 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง.....52

บทที่ 4 เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง.....54
4.1 เทคโนโลยีการสร้าง.....54
4.1.1 กระบวนการออกซิเดชั่น.....55
4.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....58
4.1.3 กระบวนการแพร่สารเจือ.....60
4.1.4 กระบวนการเมตัลไลเซชั่น.....63
4.1.5 กระบวนการซินเตอร์ริง.....64
4.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง.....65
4.2.1 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ.....65
4.2.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง.....81
4.3 การทดลอง.....96
4.3.1 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า.....96
4.3.2 การหาสภาพการตอบสนองทางแสง.....96
4.3.3 การหาความเร็วในการตอบสนอง.....97
4.3.4 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า.....97

บทที่ 5 ผลการทดลองและการอภิปราย.....98
5.1 การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ.....98

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 99

5.1.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์.....99

5.1.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง.....100

5.1.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสง.....103

5.1.2 ผลของระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี.....105

5.1.3 ผลของความกว้างแถบชนิดพี.....113

5.1.4 การวัดสภาพตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด 116

5.1.5 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 121

5.1.6 การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอด.....122

5.2 การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง.....125

5.2.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....125

5.2.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง.....126

5.2.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสง.....128

5.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างการ์ดริงกับโฟโตไดโอด.....129

5.2.3 ผลของความกว้างการ์ดริง.....131

5.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด.....133

5.3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งสำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์.....135

5.3.1 บทนำ.....136

5.3.2 การทดลอง.....139

5.3.2.1 ความเป็นเชิงเส้นของกระแสแสงในโหมดโฟโตโวลตาอิก.....140

5.3.2.2 วงจรวัด.....141

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.3.3 ลักษณะรูปคลื่นและขนาดสัญญาณเอาต์พุต.....142
5.3.4 ผลการลดทอนรังสีเอกซ์ของวัสดุตัวอย่าง.....144

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....146

เอกสารอ้างอิง.....148

ภาคผนวก.....151
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....152

ประวัติผู้เขียน.....183

สารบัญตาราง

ตารางที่ หน้า

4.1 จุดหลอมเหลว (Melting Points) และสภาพความต้านทาน (Resistivities) 63

5.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด เงื่อนไขการสร้างแถบ p^+ มีความกว้างคงที่ 20 μm ระยะห่างค่าต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V 107

5.2 ลักษณะสมบัติทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอด เงื่อนไขการสร้างแถบ p^+ มีความกว้างคงที่ 20 μm ระยะห่างค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสง 1400 μW ขณะแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V.....109

5.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด เงื่อนไขการสร้างแถบ p^+ มีความระยะห่างคงที่ 50 และ 100 μm ความกว้างค่าต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V 114

5.4 ลักษณะสมบัติทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ ระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี คงที่ (S) เท่ากับ 50 μm และ100 μm เปลี่ยนแปลงความกว้างแถบชนิดพีค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสง 1400 μW และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V.....116

5.5 ลักษณะสมบัติทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เงื่อนไขการสร้าง และความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ขณะได้รับแรงดันไบอัส -10 V ตัวต้านทานโหลด 1 kΩ.....119

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

2.1 แผนภูมิช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งาน 5

2.2 ระบบเชื่อมโยงการสื่อสารด้วยแสง 6

2.3 กระบวนการดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิคจากแถบถึงแถบ และกระบวนการดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรินซิคจากแถบและระดับสารเจือ 7

2.4 การดูดกลืนแสง (ก) สารกึ่งตัวนำภายใต้การฉายแสง (ข) การลดลงอย่างเป็นเอ็กซ์โปแนนเชียล ของฟลักซ์โฟตอน 8

2.5 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ 9

2.6 โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น (ก) แถบพลังงาน (ข) โครงสร้างภาคตัดขวาง 10

2.7 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น 11

2.8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด 12

2.9 การทำงานในโหมดโฟโตคอนดักทีฟของโฟโตไดโอด และเส้นโหลด 13

2.10 การทำงานในโหมดโฟโตโวลตาอิกของโฟโตไดโอด และเส้นโหลด 13

2.11 โฟโตไดโอดโครงสร้างต่างๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน 14

2.12 โฟโตไดโอดชนิด PN (ก) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงในโฟโตไดโอด (ค) แสดงแถบพลังงานในขณะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะ 15

2.13 โฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด PIN 16

2.14 โฟโตไดโอดชนิด APD (ก) การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด APD 17

2.15 โฟโตไดโอดชนิด MSM 18

2.16 วงจรขยายภาคแรกสัญญาณรบกวนต่ำ 19

2.17 วงจรตรวจจับแสงความเข้มระดับต่ำ 19

2.18 วงจรตรวจจับแสงที่ใช้ออปแอมป์ความเร็วสูง 20

2.19 ตัวตรวจจับแสงความเร็วสูงที่ใช้โฟโตไดโอดชนิด PIN 20

2.20 วงจรสำหรับ CT สแกนเนอร์ และเครื่องตรวจจับรังสีเอกซ์ 21

2.21 วงจรสำหรับตัวตรวจจับรังสีแกรมม่า และรังสีเอกซ์ 22

3.1 โฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง (ข) สัญลักษณ์ 21

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) โครงสร้างขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ค) การลดลงของพลังงานแสงที่ตกกระทบตามระยะความลึก 24

3.3 รอยต่อพี-เอ็นแบบขั้นบันได (ก) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) การกระจายความหนาแน่นประจุไฟฟ้า 27

3.4 ความสัมพันธ์ความกว้างบริเวณปลอดพาหะกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอด แบบรอยต่อขั้นบันได 27

3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_j^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของไดโอดแบบรอยต่อขั้นบันได 28

3.6 การลดลงของพลังงานแสงที่ตกกระทบผิวสารกึ่งตัวนำตามระยะความลึก 29

3.7 สภาพการตอบสนองทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN 31

3.8 โฟโตไดโอดชนิด PIN ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 32

3.9 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ 34

3.10 แหล่งกำเนิดเกิดกระแสมืดชนิดต่างๆ ของโฟโตไดโอด 37

3.11 การเกิดกระแสมืดแบ่งตามบริเวณของโฟโตไดโอด 37

3.12 การทะลุกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอน (ก) แบบแถบถึงแถบ (ข) แบบผ่านระดับแทรป 40

3.13 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ (ก) ลวดลายต้นแบบ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวาง 42

3.14 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง (ก) ลวดลายต้นแบบ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวาง 44

3.15 กลไกที่ช่วยลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) โครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง (ข) โครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัส 45

3.16 ผลจำลองแวดเตอร์สนามไฟฟ้าระหว่างโฟโตไดโอด และการ์ดริง ภายใต้เงื่อนไข (ก) ปล่อยลอยการ์ดริง (ข) การ์ดริงได้รับไบอัส 46

3.17 โครงสร้างเพื่อแสดงเงื่อนไขการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ 47

3.18 ลวดลายต้นแบบของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ 48

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.19 โครงสร้างเพื่อแสดงเงื่อนไขการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริง 49

3.20 ลวดลายต้นแบบของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง 50

3.21 ลวดลายต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ (ก) แผ่นที่ 1 p^+ mask (ข) แผ่นที่ 2 Oxide mask (ค) แผ่นที่ 3 Contact mask (ง) แผ่นที่ 4 Metal mask 51

3.22 กระจกต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ 52

3.23 ลวดลายต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง (ก) แผ่นที่ 1 p^+ mask (ข) แผ่นที่ 2 Contact mask (ค) แผ่นที่ 3 Metal mask 52

3.24 กระจกต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง 53

4.1 แผนภูมิกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง 54

4.2 กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 55

4.3 ภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชั่น 55

4.4 ความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์กับเวลาในการอ๊อกซิเดชั่นในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบแห้ง 56

4.5 ความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์กับเวลาในการอ๊อกซิเดชั่นในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบชื้น 57

4.6. ขั้นตอนขบวนการโฟโตลิโธกราฟี 59

4.7 ค่า solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิกอน 61

4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ 61

4.9 ความหนาของชั้น SiO_2 ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส 62

4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator 64

4.11 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ 80

4.12 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริงเสร็จสมบูรณ์ 95

4.13 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่สร้างเสร็จ (ก) ตัดแยกเป็นไดโอดแต่ละตัว (ข) นำไปติดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋อง 95

4.14 บล็อกไดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า 96

4.15 บล็อกไดอะแกรมการหาสภาพการตอบสนอง 96

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

4.16 บล็อกไดอะแกรมการหาความเร็วในการตอบสนอง 97

4.17 บล็อกไดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า 97

5.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ภายใต้เงื่อนไขไม่ได้รับแสง และได้รับแสงความยาวคลื่น 633 nm ที่ความเข้ม 300, 700และ 1400 μW 99

5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง 100

5.3 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง 102

5.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 103

5.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง และขณะได้รับแสงจากหลอดเลเซอร์ที่ความเข้มค่าต่าง ๆ 104

5.6 กราฟความเป็นเชิงเส้นกระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่าง ๆ และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V 104

5.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง จากหลอด UVC ที่ความเข้มค่าหนึ่ง 105

5.8 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ 106

5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่แรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ 106

5.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงจากหลอดเลเซอร์ มีความเข้มแสง 1400 μW 108

5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่ความเข้มแสง 1400 μW และแรงดันไบอัสค่าต่างๆ 109

5.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงจากหลอด UVC ที่ความเข้มค่าหนึ่ง และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V 110

5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีขณะได้รับแสง จากหลอด UVC ที่ความเข้มค่าหนึ่ง และแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ 111

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.14 แบบจำลองระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (ก) น้อยกว่าสองเท่าของความกว้าง บริเวณปลอดพาหะ (ข) เท่ากับสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (ค) มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ 112

5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับความกว้างแถบชนิดพี ที่แรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ 113

5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างแถบชนิดพีที่ความเข้มแสง 1400 μW และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V 116

5.17 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบปกติ และแบบแนวตั้งหลายแถบ 117

5.18 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ 117

5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม กับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V 118

5.20 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ 119

5.21 ประสิทธิควอนตัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ 120

5.22 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด เมื่อระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี และแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ 121

5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ารอยต่อกับระยะห่างระหว่าง แถบชนิดพีค่าต่าง ๆ 122

5.24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เกิดจากผลของแรงดันไบอัส 123

5.25 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เกิดจากผลของ ความต้านทานอนุกรม 124

5.26 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เกิดจากผลระยะห่าง ระหว่างแถบชนิดพีค่าต่าง ๆ 125

5.27 วงจรวัดกระแสมืดของโฟโตไดโอด 126

5.28 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 126

5.29 กลไกที่ช่วยลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) โครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง (ข) โครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัส 127

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.30 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสง ของไดโอดแบบไม่มีการ์ดริง การ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส 128

5.31 อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ของไดโอดแบบไม่มีการ์ดริง การ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส 129

5.32 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริง 129

5.33 ค่ากระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างการ์ดริงค่าต่างๆ 130

5.34 ค่ากระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างการ์ดริงค่าต่างๆ 131

5.35 ค่ากระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ความกว้างค่าต่างๆ 132

5.36 ค่ากระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างการ์ดริงค่าต่างๆ 133

5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-แรงดันของโฟโตไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆ 133

5.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆ 134

5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด และกระแสแสง กับอุณหภูมิของโฟโตไดโอดที่แรงดันค่าต่างๆ 135

5.40 วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น ผู้ที่ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรก เมื่อปี ค.ศ. 1985 136

5.41 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ภาพแรกซึ่งเป็นภาพถ่ายมือภรรยาของวิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น 137

5.42 ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์ 138

5.43 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจจับรังสีแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง (ก) วิธีการทางตรง (ข) วิธีการทางอ้อม 140

5.44 การเปลี่ยนแปลงของกระแสแสง ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่างๆ 140

5.45 การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ 141

5.46 ขนาดสัญญาณเอาต์พุตและกระแสแสง ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่างๆ 141

5.47 ลักษณะของสัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทของวงจรขยายซึ่งวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป ขณะโฟโตไดโอดถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ที่ค่าแรงดันต่างกัน กระแส 25 mA 142

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.48 ลักษณะของสัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทของวงจรขยายซึ่งวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป ขณะโฟโตไดโอดถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ขณะซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเรืองแสง ที่ค่าแรงดันต่างกัน กระแส 25 mA.....143

5.49 ขนาดของแรงดันเอาท์พุทของวงจรขยายกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่โฟโตไดโอดได้รับ ทั้งแบบวิธีการทางตรง และวิธีการทางอ้อม.....144

5.50 ค่าแรงดันเอาท์พุทของวงจรขยายกับค่าความหนาของแผ่นอะคลีลิคที่ใช้บังรังสีเอ็กซ์ให้แก่โฟโตไดโอด 145

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Al	Aluminium	อะลูมิเนียม
ARC	Anti-Reflection Coating	ชั้นลดการสะท้อนแสง
Al/Si alloy	Aluminium/Silicon alloy	ซิลิคอนอัลลอยด์
DC	Direct Current	ไฟฟ้ากระแสตรง
DI	De-Ionization water	น้ำปลอดไอออน
GaAs	Gallium Arsenide	แกลเลียมอาเซไนซ์
P.R.	photoresist	น้ำยาไวแสง
Si	Silicon	ซิลิคอน

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น
D_e	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน
D_h	คือ	สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
E_c	คือ	ระดับพลังงานขอบล่างของแถบความนำ
E_g	คือ	ช่องว่างแถบพลังงาน
E_i	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
E_V	คือ	ระดับพลังงานขอบบนของแถบวาเลนซ์
g_{op}	คือ	อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง
h	คือ	ค่าคงตัวของแพลงค์
I_P	คือ	กระแสแสง
I_{sc}	คือ	กระแสลัดวงจร
J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงตัวของโบสต์มันน์
L_e	คือ	ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน
L_h	คือ	ระยะการแพร่โฮล
N_A	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ
N_D	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้
n_i	คือ	ความหนาแน่นอินทรินซิค
P_{in}	คือ	กำลังงานไฟฟ้าอินพุท
q	คือ	ประจุอิเล็กตรอน
R_s	คือ	ความต้านทานอนุกรม
R_{sh}	คือ	ความต้านทานขนาน
T	คือ	อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_R	คือ	แรงดันไบอัสย้อนกลับ
V_{oc}	คือ	แรงดันเปิดวงจร
υ	คือ	ค่าความถี่ของคลื่นแสง
η	คือ	ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน
τ	คือ	ค่าอายุของพาหะ

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กระบวนการรวมตัวใหม่	recombination process
กระแสมืด	dark current
กระแสรั่วไหล	leakage current
กระแสแสง	photocurrent
กระแสอิ่มตัว	saturation current
การแพร่สารเจือด้วยความร้อน	thermal diffusion
การออกซิเดชั่นด้วยความร้อน	thermal oxidation
ชั้นลดการสะท้อนแสง	anti-reflection layer
ซิลิคอนไดออกไซด์	silicon dioxide
ซินเตอร์ริง	sintering
โฟโตคอนดักตีฟโหมด	photoconductive mode
โฟโตโวลตาอิคโหมด	photovoltaic mode
ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	p-n junction diode
ไตรโคลโรเอทธีรีน	trichloroethylene
น้ำยาไวแสง	photoresist
โฟตอน	photon
โฟโตมาส์ก	photomask
โฟโตลิโธกราฟี	photolithography
สารเจือปน	impurity
สารกึ่งตัวนำ	semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
สเปคตรัม	spectrum
แสงมองเห็น	visible light
หลอดทังสเตน	tungsten lamp
อะซิโตน	acetone
อิเล็กตรอน	electron
โฮล	hole

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพลังแสง และงานอิเล็กทรอนิกส์ทาง เป็นงานที่ได้รับการพัฒนา และก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทั้งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทุกๆ ด้านอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง การสื่อสารระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งความรวดเร็ว ความแม่นยำ และความประหยัด เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิม สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพลังแสงที่สำคัญๆ ได้แก่ โฟโตดีเท็คเตอร์ หรือตัวตรวจวัดแสง โฟโตไดโอด หรือไดโอดพลังงานแสงชนิดต่างๆ เช่น โฟโตไดโอดชนิด PIN โฟโตไดโอดแบบอะวาลันช์ โฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพลังแสงมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า หรือกระแสซึ่งจะนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป ในงานนี้เราจะมาทำการศึกษากระบวนการสร้างโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ PIN ซึ่งเป็นการใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างเป็นซิลิคอน ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายๆ อย่าง

ลักษณะเด่นของโฟโตไดโอดชนิด PIN คือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าน้อย จึงทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูง เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้าง ในปัจจุบันมีการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลาย [1]-[9] เช่น ในระบบการสื่อสารด้วยแสง อุปกรณ์รีโมตคอนโทรล อุปกรณ์ดิสก์ (แผ่น CD และ DVD) ด้านการแพทย์ และระบบการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในปัจจุบันสามารถพบเห็นรายงานวิจัยที่เกี่ยวกับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN อย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายหลักๆ อยู่ 2 ประการ [10] คือ เพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ใช้งานทางด้านความเร็วสูง และมีประสิทธิภาพควอนตัมที่ดี อย่างไรก็ตามมีผู้วิจัยจำนวนมากล้วนแต่มุ่งพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารความเร็วสูง [1] ในขณะที่การประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ โฟโตไดโอดชนิด PIN สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่นเดียวกัน ดังเช่น อุปกรณ์รีโมตคอลโทรลด้วยแสง หรือใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-ray detector) [2] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ต้องการความเร็วในการทำงานสูงมากนัก แต่ต้องมีประสิทธิภาพ

ควอนตัมที่ดี ดังนั้นในรายงานนี้จะแสดงถึงลักษณะสมบัติที่สำคัญประการอื่นๆ ของโฟโตไดโอดชนิด PIN แทนที่จะเป็นคุณสมบัติทางความเร็วเหมือนงานวิจัยทั่วไป

ตัวตรวจวัดแสงที่ใช้งานในปัจจุบันนี้มีหลายชนิด รวมทั้งซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ซึ่งโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบนี้ที่บริเวณผิวจะมีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงมาก ผลดังกล่าวทำให้บริเวณผิวของโฟโตไดโอดนี้ มีคุณสมบัติในการดูดกลืนโฟตอนได้ไม่ดี อัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงจึงต่ำ (low photogenerated carrier) ส่งผลให้ได้กระแสแสงต่ำ (low photocurrent) หรือก็คือมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงต่ำ [11]-[13] (low responsivity)

นอกจากคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของโฟโตไดโอดแล้ว กระแสมืด (Dark current) หรือกระแสรั่ว (leakage current) ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตไดโอด [14]-[15] กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เกิดขึ้นได้ทั้งในบริเวณเนื้อสารและที่บริเวณผิวหน้าของตัวไดโอด โดยเป็นผลรวมของกระแสต่างๆ [14] เช่น กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย กระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 โดยที่กระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสรั่วระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 จะมีค่าสูง ดังนั้น การลดกระแสดังกล่าวจึงเป็นการลดกระแสมืดได้เป็นอย่างดี

ในการศึกษานี้จึงนำเสนอการพัฒนาโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง [11] เพื่อเพิ่มสมรรถนะของโฟโตไดโอดให้มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) และ มีกระแสมืดต่ำ (low dark current)

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

เมื่อพิจารณาถึงโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างธรรมดาที่ไม่มีชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ แบบแนวตั้งหลายแถบ (vertical multi stripe-shaped) โฟตอนจากแสงที่ตกกระทบจะถูกดูดกลืนในบริเวณกึ่งนิวทรัล (quasi neutral region) ของชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น (short wavelength) แสงจะถูกดูดกลืนในบริเวณใกล้ผิวหน้าของโฟโตไดโอดก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ [12] ซึ่งปกติแล้วการสร้างรอยต่อพีเอ็นด้วยกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือด้วยความร้อนระยะความลึกของรอยต่อมากกว่า 0.3 μm พาหะส่วนน้อยที่เกิดจากแสงจะเกิดการรวมตัวใหม่ในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ เพราะว่าหน้าต่างรับแสง p^+ ที่มีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูง ทำให้การแพร่ของพาหะช้าเนื่องจากมีสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอน และโฮลในชั้นมีค่าต่ำ จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างธรรมดาที่ไม่มีชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ แบบแนวตั้งหลายแถบมีค่าต่ำ

ในรายงานนี้จะนำเสนอกระบวนการสร้าง การทดลองลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง [11] และมีลักษณะพิเศษโดยชั้นพี (p^+) ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับแสง มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ เพื่อเพิ่มสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอด

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

ในการปรับปรุงคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง (responsivity) ของโฟโตไดโอดให้สูงขึ้นสามารถทำได้ด้วยการสร้างให้บริเวณผิวของซิลิคอนโฟโตไดโอดมีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือต่ำ เช่นในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ (Stripe-shaped) [11]-[13] ซึ่งชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ ทำให้ชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค (i-layer) ได้รับแสงโดยตรง ซึ่งชั้นอินทรินซิคในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นพื้นที่ไวแสง (Active area) โครงสร้างดังกล่าวจะช่วยทำให้โฟโตไดโอดมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูงขึ้น และเนื่องจากกระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะและกระแสรั่วระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 เป็นกระแสมืดส่วนใหญ่ที่เกิดในโฟโตไดโอด การสร้างชั้นการ์ดริง (Guard ring) [16]-[18] จะช่วยลดกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 และในเนื้อสารได้ ดังนั้น การลดกระแสดังกล่าวจึงเป็นการลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดได้เป็นอย่างดี

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีพื้นที่รับแสงเป็นลักษณะแถบ p^+ เล็กๆ หลายแถบ (multi stripe-shaped) ผลการทดลองนำเสนอผลการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดทั้งในขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง ผลของระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (p^+ stripe-shaped) ผลของความกว้างแถบชนิดพี การวัดสภาพตอบสนองทางแสงเชิงสเปกตรัม ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า และการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอด ผลการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง และอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด สุดท้ายเป็นการศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเป็นตรวจวัดรังสีเอกซ์ เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN และเป็นแนวทางในการพัฒนาโฟโตไดโอดชนิดนี้ต่อไป

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานของโฟโตไดโอด หลักการทำงานของโฟโตไดโอด โหมดการทำงานของโฟโตไดโอด ชนิดของโฟโตไดโอดตามโครงสร้าง ในส่วนท้ายของบทนี้ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานโฟโตไดโอด

บทที่ 3 ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของโฟโตไดโอด โครงสร้าง หลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด PIN ลักษณะสมบัติสำคัญต่างๆ ของโฟโตไดโอดชนิด PIN ในส่วนท้ายของบทนี้อธิบายรายละเอียดการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

บทที่ 4 กล่าวถึงเทคโนโลยีการสร้าง, กระบวนการสร้าง และการทดลองเพื่อการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงที่สำคัญของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

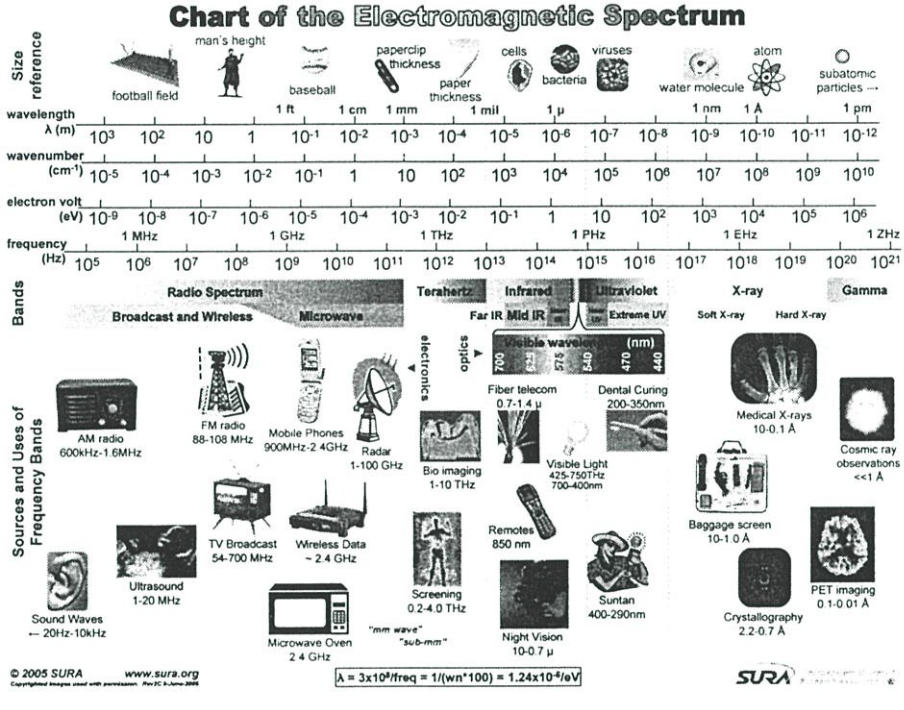
บทที่ 5 ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลองของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้ หัวข้อแรก กล่าวถึงการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ หัวข้อที่สอง ผลการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง หัวข้อสุดท้าย เป็นผลการศึกษาการศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเป็นตรวจวัดรังสีเอกซ์

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

บทที่ 2
โฟโตไดโอด

ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของโฟโตไดโอด จะกล่าวถึงกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ หลักการทำงานของโฟโตไดโอด และโหมดการทำงานของโฟโตไดโอดอาจแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ โหมดโฟโตคอนดักทีฟ และโหมดโฟโตโวลตาอิก โฟโตไดโอดโครงสร้างต่างๆ ได้แก่ โฟโตไดโอดชนิด PN โฟโตไดโอดชนิด PIN โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์ และโฟโตไดโอดชนิด MSM เป็นต้น ในส่วนท้ายของบทนี้ยกตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานโฟโตไดโอด

2.1 บทนำ

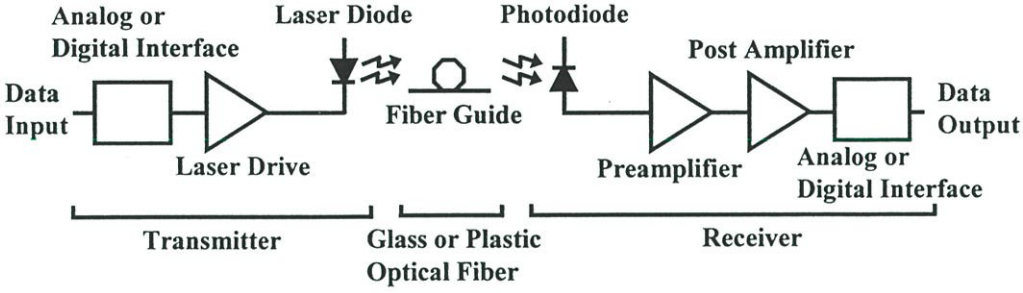


รูปที่ 2.1 แผนภูมิช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าและการประยุกต์ใช้งาน

รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งาน คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแบ่งได้ตาม ความยาวช่วงคลื่น ตั้งแต่ช่วงคลื่นสั้นที่สุดในแถบรังสีแกมม่า (Gamma Ray) ซึ่งมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 0.1 Å จนถึงความยาวคลื่นที่ยาวที่สุดในช่วงคลื่นวิทยุ (Radio Wave) มีความยาวตั้งแต่ 1 mm ขึ้นไป ความยาวช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใช้ประโยชน์ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronics) ทั่วไป คือ รังสีแกมม่าความยาวช่วงคลื่นสั้นกว่า 0.1 Å, รังสีเอ็กซ์ความยาวช่วง

คลื่นตั้งแต่ 0.04-1000 Å, อัลตราไวโอเลตความยาวช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.01 - 0.4 μm, แสงตามองเห็น (Visible Light) ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแคบ ที่มีผลตอบสนองต่อตามนุษย์ตั้งแต่ 0.4 - 0.7 μm คือ สีม่วง จนถึงสีแดง และอินฟราเรดความยาวช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.7 - 1000 μm โดยความยาวช่วงคลื่นเหล่านี้ถูกนำไปประยุกต์ในงานด้านต่างๆ

เพื่อการทำความเข้าใจหลักการทำงานของระบบ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง เช่น ซิลิคอนโฟโตไดโอดได้ดีมากขึ้น รวมทั้งจะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาหลักการทำงาน และการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอด สามารถแสดงหลักการทำงานดังในรูปที่ 2.2



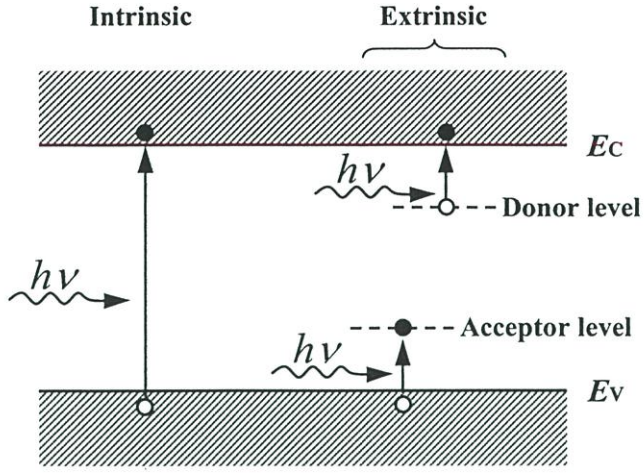
รูปที่ 2.2 ระบบเชื่อมโยงการสื่อสารด้วยแสง [19]

ระบบเชื่อมโยงการสื่อสารด้วยแสง ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ ส่วนแรกภาคส่งทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณไฟฟ้าให้เป็นสัญญาณแสงแล้วส่งผ่านยังตัวกลาง ส่วนที่ 2 ตัวกลางทำหน้าที่นำพาสัญญาณแสงไปยังภาครับ ซึ่งอาจจะเป็นไฟเบอร์ออฟติก หรืออากาศ ส่วนที่ 3 ภาครับทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า จากนั้นขยายสัญญาณให้ใหญ่ขึ้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในส่วนของภาครับนั้นโฟโตไดโอดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เพราะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของวงจรภาครับ ดังนั้นโฟโตไดโอดต้องมีความไวแสงสูง ตอบสนองเร็ว กระแสมืดต่ำ ราคาถูก และมีเสถียรภาพการทำงานที่ดี หลักการทำงาน และลักษณะสมบัติสำคัญต่างๆ ของโฟโตไดโอดจะกล่าวโดยรายละเอียดในหัวข้อถัดไป

2.2 หลักการพื้นฐานของโฟโตไดโอด

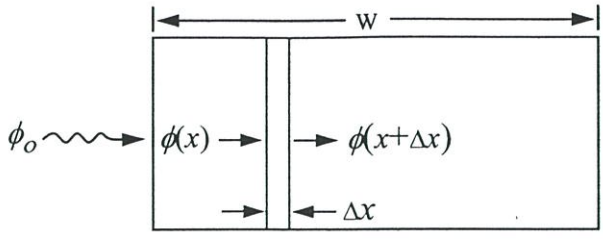
โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถตรวจจับสัญญาณแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดจะมี 3 ขั้นตอนหลัก [20] คือ ขั้นตอนแรก การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากการดูดกลืนแสง ขั้นตอนที่ 2 คู่พาหะเคลื่อนที่ผ่านชั้นดูดกลืนแสง ขั้นตอนที่ 3 คู่พาหะเคลื่อนที่ยังขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์ และเกิดกระแสไฟฟ้าไหลเป็นสัญญาณเอาต์พุตต่อไป

2.2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

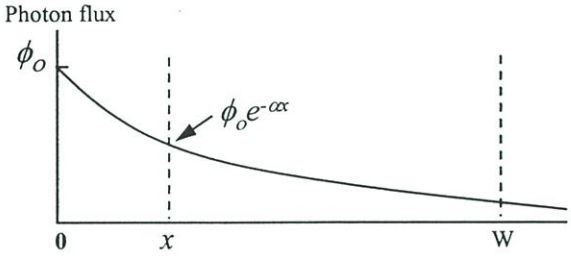


รูปที่ 2.3 กระบวนการดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิคจากแถบถึงแถบ และกระบวนการดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรินซิคจากแถบและระดับสารเจือ [20]

รูปที่ 2.3 แสดงกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายใน ประกอบด้วยการดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเล็นซ์ข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การดูดกลืนแสงแบบนี้เรียกว่า "กระบวนการดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิคจากแถบถึงแถบ" (intrinsic transitions) สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (Donor level: E_D) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้ให้นี้จะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ และในกรณีของสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะทำให้เกิดระดับผู้รับ (Acceptor level: E_D) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้ให้นี้จะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแถบวาเลนซ์ (E_V) ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ หลุดไปอยู่ในระดับผู้รับ การดูดกลืนแสงแบบนี้เรียกว่า "กระบวนการดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรินซิคจากแถบและระดับสารเจือ" (extrinsic transitions)



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 การดูดกลืนแสง [14] (ก) สารกึ่งตัวนำภายใต้การฉายแสง (ข) การลดลงอย่างเป็นเอ็กซ์โปแนนเชียลของฟลักซ์โฟตอน

ถ้าสมมติให้ว่าสารกึ่งตัวนำถูกฉายด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน และ Φ_0 คือ ฟลักซ์โฟตอนที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่ เมื่อฟลักซ์โฟตอนเคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำบางส่วนจะถูกดูดกลืน ดั้งนั้นจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาง (Δx) และเป็นไปตามฟังก์ชั่น $\alpha\Phi(x)\Delta x$ โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง จากรูปที่ 2.4 (ก) สามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้ [14]

$$\Phi(x+\Delta x)-\Phi(x)=\frac{d\Phi(x)}{dx}\Delta x=-\alpha\Phi(x)\Delta x$$

หรือ

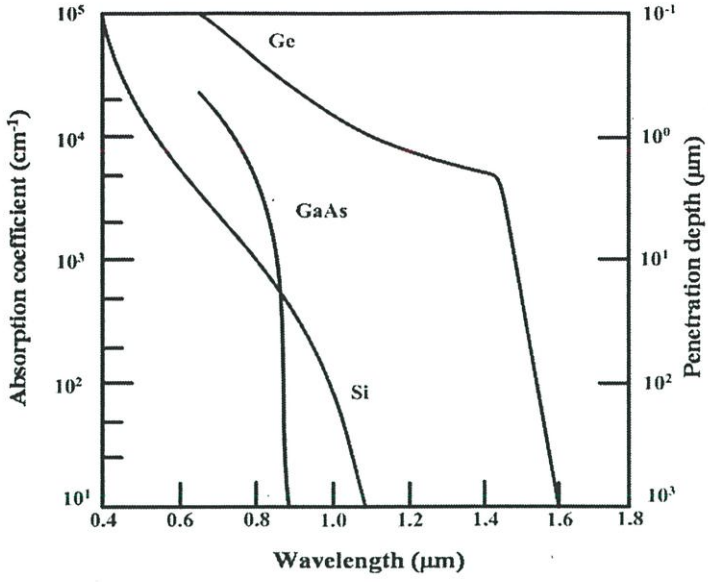
$$\frac{d\Phi(x)}{dx}\Delta x=-\alpha\Phi(x) \qquad \textbf{(2.1)}$$

เครื่องหมายลบนั้นแสดงถึงความเข้มข้นของฟลักซ์โฟตอนจะลดลงเนื่องจากการดูดกลืน จากสมการที่ 2.1 สามารถสมการแก้ได้โดยการแทนเงื่อนไขขอบเขต $\Phi(x)=\Phi_0$ ที่ $x=0$ จะได้

$$\Phi(x)=\Phi_0 e^{-\alpha x} \qquad \textbf{(2.2)}$$

จากสมการที่ 2.2 สามารถเขียนใหม่ โดยแทนค่าให้ $x=w$ ดังรูปที่ 2.4 (ข) จะได้

$$\Phi(W) = \Phi_0 e^{-\alpha W} \tag{2.3}$$



รูปที่ 2.5 สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ [20]

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเป็นฟังก์ชั่นของ $h\nu$ รูปที่ 2.5 แสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจจับแสง จะเห็นว่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงลดอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงจุดความยาวคลื่นคัทออฟ (λc) ตามความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.4

$$\lambda_C = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g(eV)}(\mu m) \tag{2.4}$$

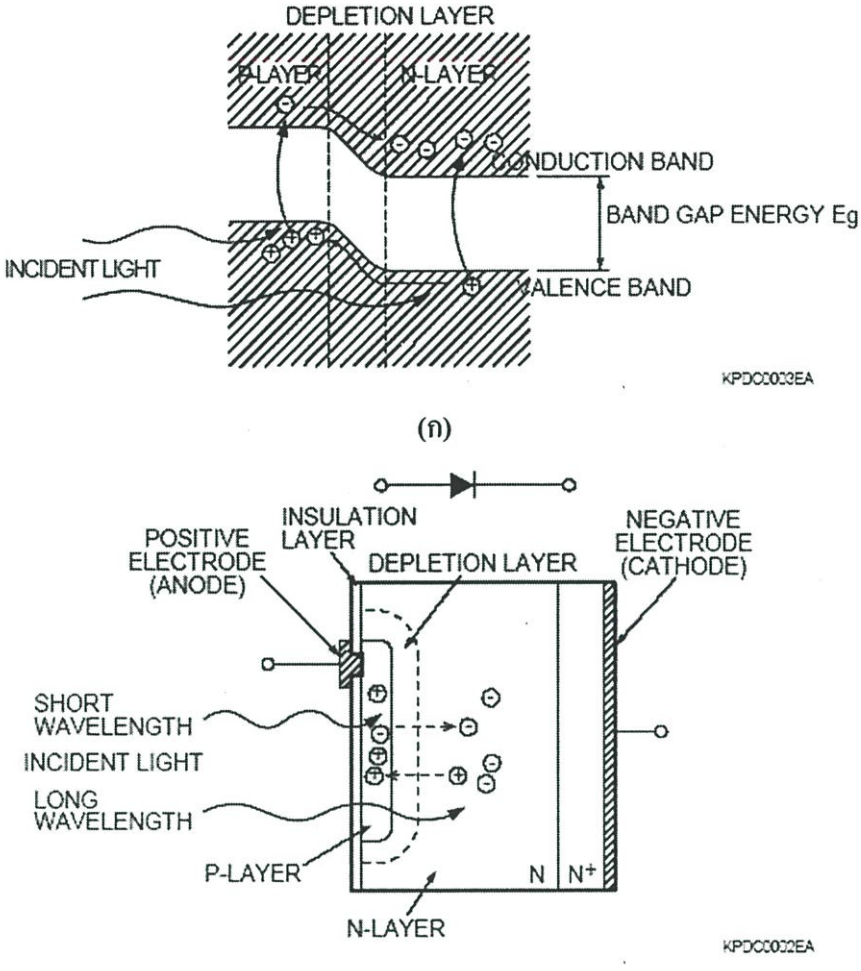
โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ มีค่าเท่ากับ 4.136×10^{-15} eV-sec

C คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^{8} m/sec

2.2.2 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด

เมื่อแสงตกกระทบรอยต่อพี-เอ็น โฟตอนจากภายนอกเข้ามาในบริเวณหรือใกล้ๆ กับบริเวณปลอดพาหะ โดยโฟตอนนั้นต้องมีพลังค่าหนึ่งที่มากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารที่ใช้สร้างไดโอดนั้นคือ $h\nu \geq Eg$ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า ได้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน–โฮลขึ้น พาหะที่เกิดขึ้นนี้จะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ผลักให้เคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกันโดยโฮลจะไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะไปทางด้าน

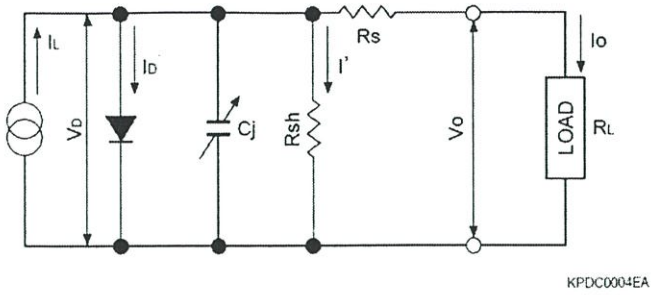
เอ็น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้นจากกระแสรั่วไหลย้อนกลับเดิมที่มีอยู่เรียกว่า “กระแสแสง” โดยเรียกอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ออกแบบมาเพื่อตรวจจับแสงนี้ว่า “โฟโตไดโอด” แถบพลังงาน และโครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น แสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น (ก) แถบพลังงาน (ข) โครงสร้างภาคตัดขวาง [21]

2.2.2.1 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดจะเห็นว่า กระแสเนื่องจากแสงแทนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (I_L) กระแสไฟฟ้าที่ออกมาในทิศทางตรงข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น โดยมีความต้านทานของรอยต่อแบบชันต์มีค่ามาก ความจุไฟฟ้ารอยต่อ ความต้านทานอนุกรมมีค่าน้อยต่ออยู่ แสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่พารามิเตอร์ต่างๆ นั้นคือ



รูปที่ 2.7 วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น [21]

เมื่อ I_L คือ กระแสเนื่องจากแสง
I_D คือ กระแสมืด
C_j คือ ความจุไฟฟ้ารอยต่อ
R_{sh} คือ ความต้านทานชันต์
R_S คือ ความต้านทานอนุกรม
I' คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน Rsh
V_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด
I_O คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต
V_O คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

จากวงจรนี้ สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้

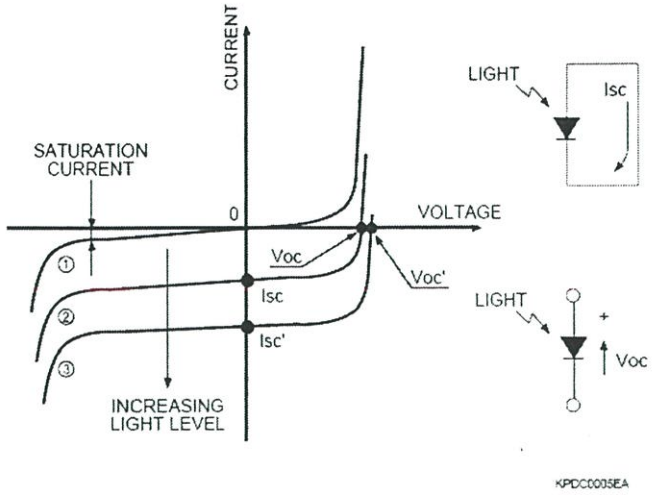
$$I_O = I_L - I_D - I' = I_L - I_S(\exp\frac{qV_D}{kT} - 1) - I' \qquad \textbf{(2.5)}$$

โดยที่ I_S คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับของโฟโตไดโอด

ถ้าสมมติให้ว่า I' มีค่าน้อยมาก เนื่องจากค่าความต้านทานของรอยต่อแบบชันต์มีค่ามาก จึงสามารถไม่คิดค่า I' ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต คือ ผลต่างของกระแสเนื่องจากแสงกับกระแสมืดนั้นเอง

2.2.2.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกซ์โปแนนเชียลกับแรงดัน ในขณะให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ หรือเรียกว่า "กระแสมืด" (dark current) ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 2.8 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเร็กติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

เมื่อแสงตกกระทบรอยต่อพี-เอ็น โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานแก่สารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลขึ้น และจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายในทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสตรง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า "กระแสแสง" (Photo current) ซึ่งกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด

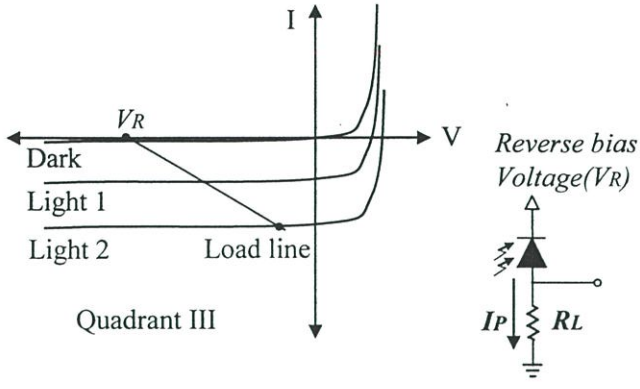
2.3.3 โหมดการทำงานของโฟโตไดโอด[22]

โหมดการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดอาจแบ่งตามวงจรใช้งานเป็น 2 แบบ คือ โหมดโฟโตคอนดักทีฟ(Photoconductive mode) และโหมดโฟโตโวลตาอิก(Photovoltaic mode) โฟโตไดโอดที่ทำงานในโหมดโฟโตโวลตาอิก ไม่ต้องจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับไดโอด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดในโหมดนี้เหมือนกับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ในทางกลับกันกรณีที่จ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับไดโอด ก็จะทำงานในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ

2.2.3.1 โหมดโฟโตคอนดักทีฟ

การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ ส่วนมากจะเป็นระบบที่ต้องการผลตอบสนองทางแสงที่รวดเร็ว อย่างในการสื่อสารผ่านใยแก้วนำแสง (fiber optic communication) จึงจำเป็นต้องจ่ายแรงดันไบอัสภายนอกในทิศทางไบอัสย้อนกลับให้กลับรอยต่อพี-เอ็น ในกรณีนี้กระแสที่เกิดมาจากสองแหล่ง คือ กระแสที่เกิดจากแสง และกระแสรั่วไหลย้อนกลับ การจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ไดโอดทำให้เวลาเคลื่อนที่ของพาหะลดลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในที่อิ่มตัว และยังช่วยลดค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อได้ด้วย ส่งผลให้ความเร็วตอบสนองของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้น แต่กระแสมืดที่เกิดขึ้นจากการจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับ ทำให้ signal to noise ของโฟโตไดโอดลดลง

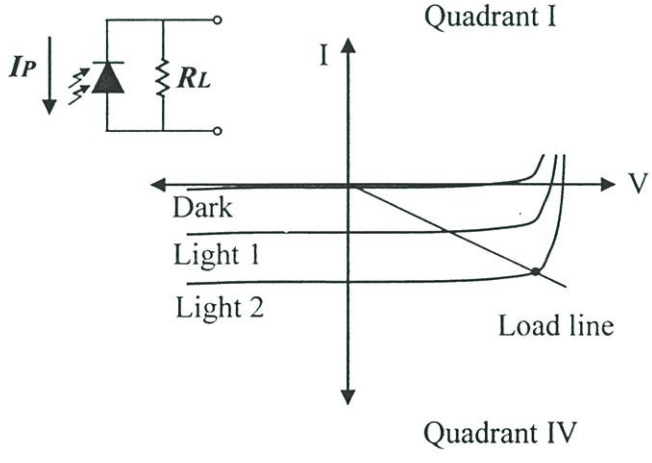
วงจรการทำงานในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ และเส้นโหลด แสดงในรูปที่ 2.9 โฟโตไดโอดจะถูกต่ออนุกรมกับตัวต้านทานโหลด และจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ไดโอด การทำงานโหมดนี้จะอยู่ในจตุตถภาคที่ 3 ของกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด



รูปที่ 2.9 การทำงานในโหมดโฟโตคอนดักทีฟของโฟโตไดโอด และเส้นโหลด

2.2.3.2 โหมดโฟโตโวลตาอิก

การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลตาอิก ส่วนมากจะใช้งานที่ต้องการสัญญาณรบกวนต่ำ และความถี่ใช้งานไม่สูง การทำงานในโหมดนี้ไม่ต้องจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่โฟโตไดโอด ทำให้ไม่มีกระแสมืด อัตรา signal to noise ของโฟโตไดโอดสูงกว่าการทำงานในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง ความเข้มแสงที่ใช้มีค่าน้อย และความถี่ไม่สูงมากนัก อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงต้องพิจารณาผลตอบสนองเชิงความถี่ที่ยอมรับได้ด้วย การทำงานในโหมดโฟโตโวลตาอิกของโฟโตไดโอด และเส้นโหลด แสดงในรูปที่ 2.10

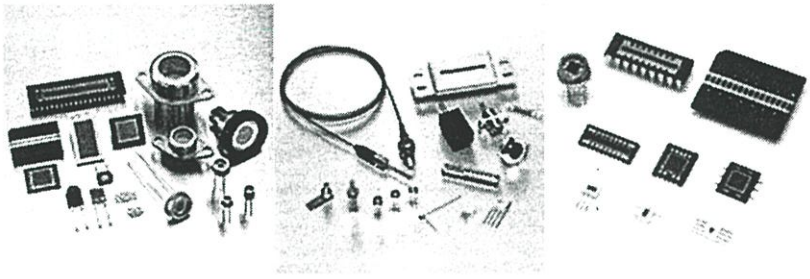


รูปที่ 2.10 การทำงานในโหมดโฟโตโวลตาอิกของโฟโตไดโอด และเส้นโหลด

โฟโตไดโอดจะถูกต่อขนานกับตัวต้านทานโหลด โดยที่ไม่ต้องจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ไดโอด การทำงานโหมดนี้จะอยู่ในจตุตถภาคที่ 4 ของกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

2.3 ชนิดของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปอยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้าง และมีการนำไปใช้งานทั่วไป [14],[21] ได้แก่ โฟโตไดโอดชนิด PN โฟโตไดโอดชนิด PIN โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์ และโฟโตไดโอดชนิด MSM โดยในรูปที่ 2.11 แสดงโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน

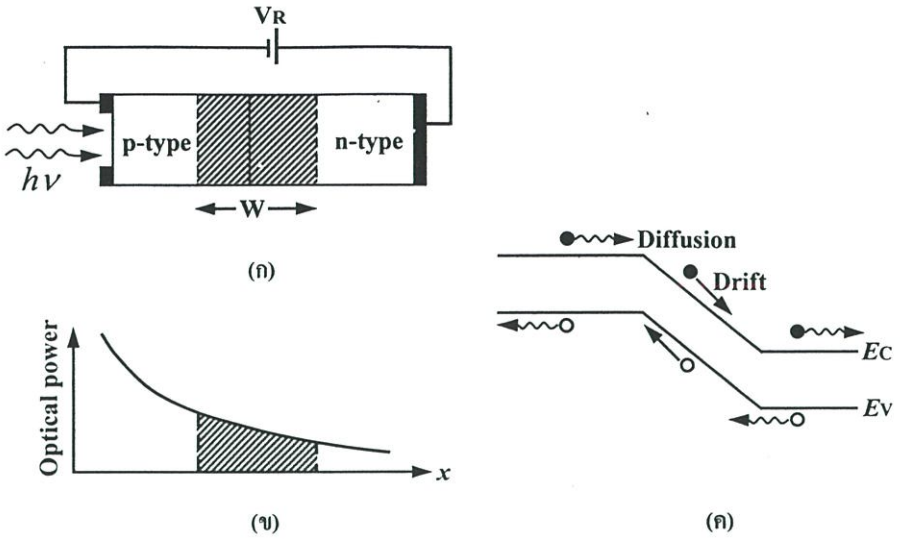


รูปที่ 2.11 โฟโตไดโอดโครงสร้างต่างๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน [21]

2.3.1 โฟโตไดโอดชนิด PN

โฟโตไดโอดชนิด PN มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นทั่วๆ ไป แต่ได้ถูกออกแบบให้แสงสามารถตกกระทบลงบนรอยต่อพี-เอ็นได้ โครงสร้างทั่วไปของโฟโตไดโอดและแถบพลังงานของพี-เอ็นโฟโตไดโอด แสดงในรูปที่ 2.12

ในขณะรอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับทำให้สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงขึ้น และบริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบ และโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้นพี บริเวณปลอดพาหะ และชั้นเอ็น ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าในชั้นพีจะแพร่ไปสู่ในชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่วงจรภายนอก จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล แปรโดยตรงกับความเข้มแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน

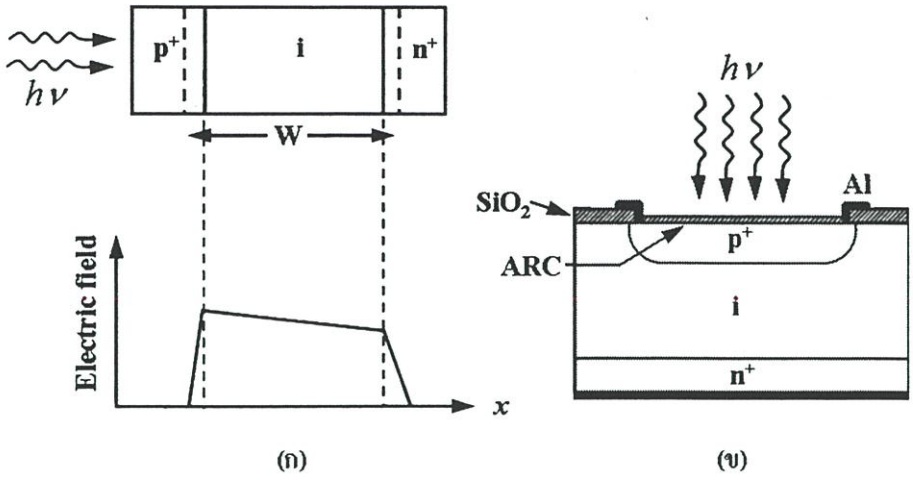


รูปที่ 2.12 โฟโตไดโอดชนิด PN [19] (ก) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) การเปลี่ยนแปลงของพลังงานแสงในโฟโตไดโอด (ค) แถบพลังงานในขณะเกิดการเคลื่อนที่ของพาหะ

รูปที่ 2.12(ก) แสดงโครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิด PN ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ในรูปที่ 2.12(ข) จะเห็นได้ว่าพลังงานแสงจะลดลงอย่างเอ็กซ์โปแนนเชียลกับแสงที่ตกกระทบ คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดในบริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เกิดการเคลื่อนที่อย่างรวดเร็วไปสู่ด้านพี หรือ เอ็น ดังในรูปที่ 2.12(ค) คุณสมบัติเด่นของโฟโตไดโอดชนิด PN พบว่าสภาพตอบสนองทางแสงสูง เพราะว่ามีประสิทธิภาพควอมตัมสูง แต่มีความเร็วในการทำงานไม่สูงมากนัก เนื่องจากกระแสแสงส่วนใหญ่เป็นกระแสการแพร่ที่เกิดนอกบริเวณปลอดพาหะ ทำพาหะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ส่งผลให้ความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอดลดลง ซึ่งปัญหาดังกล่าวสามารถแก้ได้โดยใช้โฟโตไดโอดโครงสร้างแบบ PIN จะอธิบายในหัวข้อต่อไป

2.3.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN

วิธีการหนึ่งในการเพิ่มความกว้างบริเวณปลอดพาหะทำโดยการสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง (เจือสารปริมาณน้อยมาก) หรือสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค (ชั้น *i*) ระหว่างรอยต่อพี-เอ็น โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิด PIN ดังในรูปที่ 2.13(ก) แสดงโครงสร้างของอุปกรณ์ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับการกระจายตัวของสนามไฟฟ้าเต็มชั้นอินทรินซิค เนื่องเนื่องจากชั้น *i* มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน p^+ และด้าน n^+ เป็นผลให้เมื่อโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้รับแรงดันไบอัสจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้น *i* และเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมที่ส่วน *i* จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น *i*



รูปที่ 2.13 โฟโตไดโอดชนิด PIN [19] (ก) การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด PIN

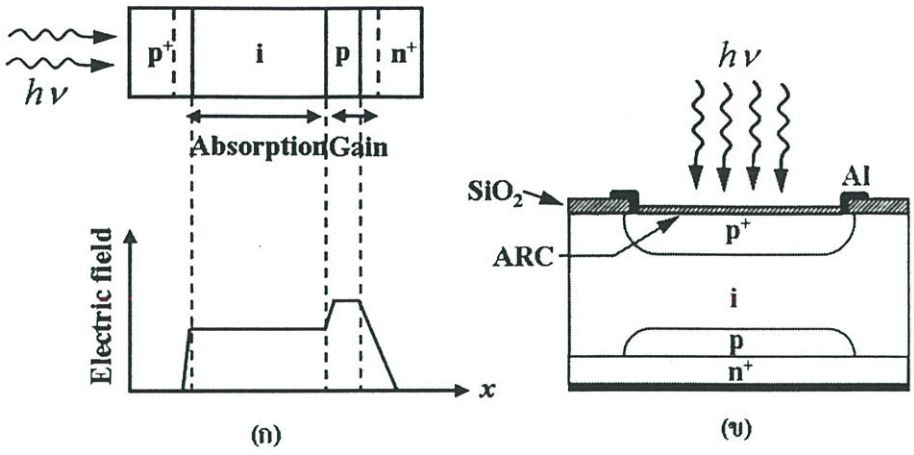
โฟโตไดโอดชนิด PIN มีความเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดชนิด PN เนื่องจากการที่มีชั้น *i* จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการการทำงานที่รวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสง เป็นต้น นอกจากจะมีผลการตอบสนองด้านเวลารวดเร็วแล้ว โฟโตไดโอดชนิด PIN ยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่าโฟโตไดโอดชนิด PN เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้างกว่าบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากรอยต่อพี-เอ็น อย่างไรก็ตามในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด PIN ถ้าบริเวณปลอดพาหะกว้างมากไป ทำให้เวลาเคลื่อนที่ของพาหะข้ามบริเวณปลอดพาหะมากขึ้นด้วย ทำให้ความเร็วตอบสนองลดลงได้ ดังนั้นในการออกแบบชั้น *i* ต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย

2.3.3 โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์

โฟโตไดโอดชนิดอะวาลานซ์ (Avalanche Photodiode: APD) มีโครงสร้างคล้ายโฟโตไดโอดชนิด PIN ดังแสดงในรูปที่ 2.14 แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้โฟโตไดโอดทำงานใกล้ๆ กับจุดพังทลาย (breakdown point) ด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 100 โวลต์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์อะวาลานซ์ขึ้น

ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามาชั้น p^+ แสงจะถูกดูดกลืนในบริเวณชั้นปลอดพาหะ และเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่อุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น n^+ และโฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น p^+ ในการสร้างโฟโตไดโอดชั้น π (สารกึ่งตัวนำชนิด p ที่ถูกโดปอย่างเจือจาง) จะมีความต้านทานสูงกว่าชั้น p และชั้น p^+ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมที่ชั้น p มากที่สุด เป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาสู่ชั้น p จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้และวิ่งไปชน

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง



รูปที่ 2.14 โฟโตไดโอดชนิด APD [19] (ก) การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด APD

กับโครงร่างผลึกและทำให้ผลึกแตกตัวเกิดเป็นไอออน ซึ่งจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นสู่แถบนำไฟฟ้า และเกิดโฮลขึ้นใหม่ในแถบวาเลนซ์ และจะเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำๆ ตลอดเวลาที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้เกิดพาหะอิสระเป็นจำนวนมากมาย จึงทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น

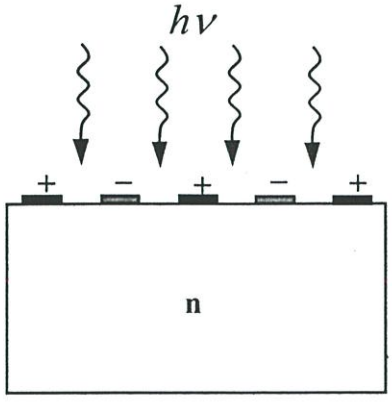
ข้อได้เปรียบของอะวาลานซ์โฟโตไดโอดคือ เป็นโฟโตไดโอดที่มีการตอบสนองสูง (High sensitive photodiode) และมีอัตราการขยายสัญญาณ (gain) ซึ่งมากกว่าโฟโตไดโอดชนิด PIN 50-300 เท่า แต่มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่สูงมาก สัญญาณเอาท์พุทมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุท และสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจากมีอัตราขยายในโฟโตไดโอด

2.3.4 โฟโตไดโอดชนิด MSM

โฟโตไดโอดชนิด MSM (metal-semiconductor-metal) สร้างขึ้นจากรอยสัมผัสช็อตกีย์ระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้นดูดกลืนแสงอยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง โครงสร้างชนิด MSM ของโฟโตไดโอด แสดงได้ดังรูปที่ 2.15

เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นใต้ และขอบของชั้นโลหะโฟตอนที่ตกกระทบจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ถ้าเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดชนิด PIN แล้ว โฟโตไดโอดชนิด MSM จะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้โครงสร้างชนิด MSM ยังมีค่าความต้านทาน และค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูง

76758



รูปที่ 2.15 โฟโตไดโอดชนิด MSM [19]

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพควอนตัมต่ำ ในส่วนของชั้นโลหะด้านหน้ายังสามารถสะท้อนแสงได้สูงทำให้การส่งผ่านแสงน้อยลง อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอน และระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

2.4 การประยุกต์ใช้งานซิลิคอนโฟโตไดโอด

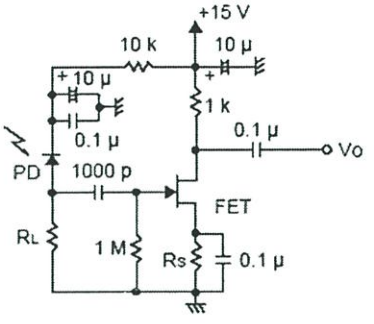
ในปัจจุบันซิลิคอนโฟโตไดโอดถูกนำไปใช้เป็นอุปกรณ์ตรวจจับแสงมาตรฐาน และมีการนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์เครื่องใช้ด้านต่างๆ เช่น

- ตรวจวัดแสง : มิเตอร์วัดความเข้มแสง, ระบบปรับโฟกัสอัตโนมัติ และควบคุมแฟลชในกล้องถ่ายรูป
- การแพทย์ : ระบบสร้างภาพ 3 มิติ(CT scanner), การวิเคราะห์อนุภาคในเลือด
- ยานยนต์ : ระบบเปลี่ยนไฟต่ำอัตโนมัติ, ระบบเปิดไฟหน้าอัตโนมัติ
- การสื่อสาร : วงจรภาครับในระบบสื่อสารด้วยแสง
- อุตสาหกรรม : บาร์โคดสแกนเนอร์, ตัวตรวจจับตำแหน่ง, เลเซอร์ปรินเตอร์

การใช้งานส่วนใหญ่โฟโตไดโอดจะถูกต่อเข้ากับวงจรขยายเพื่อทำการขยายสัญญาณให้ใหญ่ขึ้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในส่วนของภาครับนั้นโฟโตไดโอดเป็นส่วนประกอบที่สำคัญ เพราะทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของวงจรภาครับ ดังนั้นโฟโตไดโอดต้องมีความไวแสงสูง ตอบสนองเร็ว กระแสมืดต่ำ ราคาถูก และมีเสถียรภาพการทำงานที่ดี นอกจากนี้วงจรขยายก็ต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะการ

ใช้งานด้วย ไม่ว่าจะด้านอัตราขยาย ความไว แบนด์วิท และสัญญารบกวน เป็นต้น ซึ่งตัวอย่างการต่อร่วมระหว่างโฟโตไดโอดกับวงจรขยายมีดังนี้ [21]

รูปที่ 2.16 วงจรขยายภาคแรกสัญญาณรบกวนต่ำ ใช้เป็นวงจรภาครับของระบบสื่อสารด้วยแสง และรีโมตคอนโทรล การจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับแก่โฟโตไดโอดทำให้การตอบสนองความถี่สูงขึ้น โดยสัญญาณเอาต์พุตออกที่ขาเดรนของเฟตยังมีขนาดเล็กอยู่จึงต้องนำไปขยายในภาคต่อไป

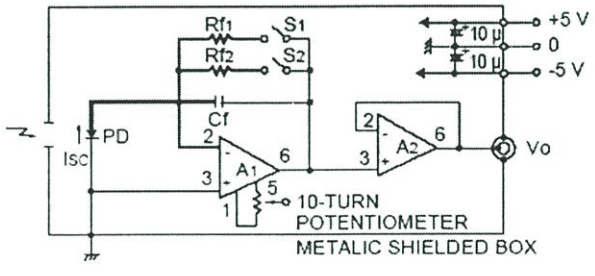


PD : High-speed PIN photodiodes (S5052, S2506-02, S8314, S5971, S5972, S5973, etc.)
RL : Determined by sensitivity and time constant of Ct of photodiode
Rs : Determined by operation point of FET
FET: 2SK152, 2SK192A, 2SK362, etc.

KPDC0014EC

รูปที่ 2.16 วงจรขยายภาคแรกสัญญาณรบกวนต่ำ

รูปที่ 2.17 วงจรตรวจจับแสงความเข้มระดับต่ำ วงจงทั้งหมดจะบรรจุอยู่ในกล้องโลหะเพื่อป้องกันการรบกวนจากคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าภายนอก หน้าต่างรับแสงของโฟโตไดโอดควรมีขนาดเล็กที่สุดเท่าเป็นไปได้ อาจใช้ใยแก้วนำแสงเป็นตัวนำสัญญาณแสงเข้ายังกล้องโลหะ และแบตเตอรี่แบบแห้งใส่ในกล้องโลหะเพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่วงจรขยาย ซึ่งสามารถลดสัญญาณรบกวนจากกรณีที่ใช้แหล่งจ่ายแบบกระแสสลับได้ ทำให้อัตราส่วน S/N ของวงจรมีค่ามากขึ้นด้วย

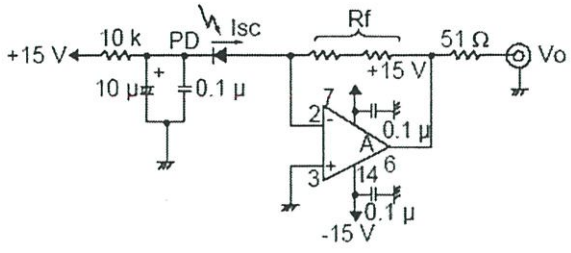


Bold lines should be within guarded layout or on teflon terminals.
A1 :AD549, etc.
A2 :OP07, etc.
Cf :10 to 100 pF, polystyrene capacitor
Rf : 10 GΩ Max.
S : Low-leakage reed relay
PD: S1226/S1336/S2386 series, etc.

KPDC0016ED

รูปที่ 2.17 วงจรตรวจจับแสงความเข้มระดับต่ำ

รูปที่ 2.18 วงจรตรวจจับแสงที่ใช้ออปแอมป์ความเร็วสูง วงจรนี้ใช้โฟโตไดโอดความเร็วสูงที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และออปแอมป์ทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันไฟฟ้า เวลาตอบสนองของวงจรขึ้นอยู่กับค่าคงที่เวลาของความต้านทานป้อนกลับ Rf และความจุไฟฟ้าขนาน

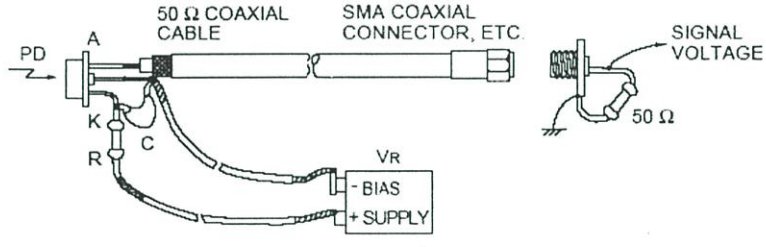


PD: High-speed PIN photodiodes
(S5052, S8314, S5971, S5972, S5973, etc.)
Rf : Two or more resistors are connected in series to eliminate parallel capacitance.
A : AD743, LT1360, HA5160, etc.

KPDC0020ED

รูปที่ 2.18 วงจรตรวจจับแสงที่ใช้ออปแอมป์ความเร็วสูง

รูปที่ 2.19 ตัวตรวจจับแสงความเร็วสูงที่ใช้โฟโตไดโอดชนิด PIN วงจรนี้ไม่ใช้อุปกรณ์ประเภทไวงาน เมื่อไม่มีการขยายสัญญาณทำให้วงจรนี้ใช้สำหรับการตรวจจับแสงที่มีความเข้มสูงๆ ได้ดี การแมทชิ่งอิมพิแดนซ์กับความต้านทานโหลด 50 Ω จึงสามารถต่อเข้ากับขั้วต่ออินพุต 50 Ω ของออสซิลเลเตอร์หรือเครื่องมือวัดได้โดยตรง โฟโตไดโอดความเร็วสูงที่ถูกออกแบบสำหรับใช้งานในย่านความถี่ระดับ GHz สามารถใช้วงจรนี้ได้



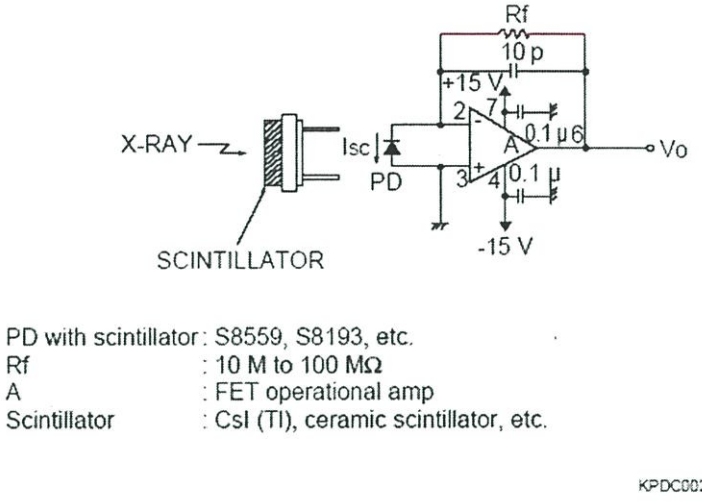
PD: High-speed PIN photodiodes (S5052, S8314, S5971, S5972, S5973, etc.)
R : 10 kΩ, Voltage drop by photocurrent should be sufficiently smaller than VR.
C : 0.1 μF ceramic capacitor

The leads of PD and C from coaxial cable should be as short as possible.
(Chip components are recommended.)

KPDC0022EC

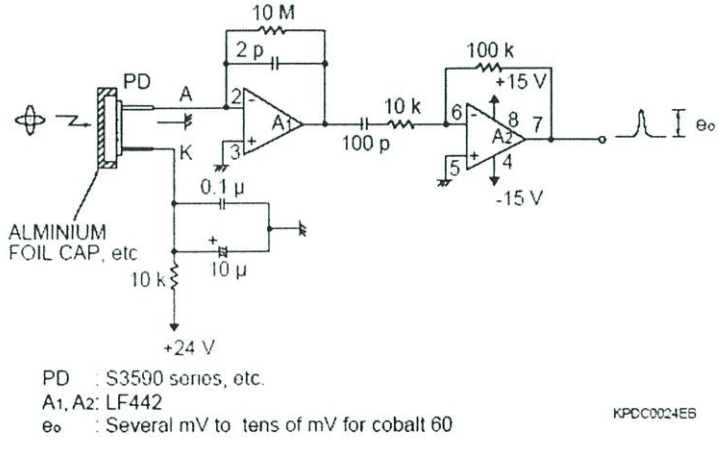
รูปที่ 2.19 ตัวตรวจจับแสงความเร็วสูงที่ใช้โฟโตไดโอดชนิด PIN

รูปที่ 2.20 วงจรสำหรับ CT สแกนเนอร์ และเครื่องตรวจจับรังสีเอกซ์ ในการประยุกต์ใช้งานต้องใช้ชั้นเรืองแสง(scintillator) เพื่อเปลี่ยนรังสีแกรมม่า หรือรังสีเอกซ์ให้เป็นแสงในช่วงความยาวคลื่นย่าน UV หรือ VIS ซึ่งแสงในย่านดังกล่าวจะถูกตรวจจับด้วยโฟโตไดโอดได้ดี ใช้วัสดุลดสะท้อนห่อหุ้มชั้นเรืองแสงเพื่อป้องกันแสงภายนอกเข้ามายังโฟโตไดโอดโดยผ่านชั้นเรืองแสง



รูปที่ 2.20 วงจรสำหรับ CT สแกนเนอร์ และเครื่องตรวจจับรังสีเอกซ์

รูปที่ 2.21 วงจรสำหรับตัวตรวจจับรังสีแกรมม่า และรังสีเอกซ์ เมื่อรังสีถูกดูดกลืน หรือกระเจิงในโฟโตไดโอด ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าว ซึ่งประจุไฟฟ้าเหล่านี้กลายเป็นสัญญาณเอาต์พุตไหลสู่วงจรภายนอก ในวงจรนี้ A1 เป็นวงจรขยายประจุ(charge amplifier) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนประจุไฟฟ้าที่เกิดจากขั้นที่ผ่านมาให้อยู่ในรูปของพัลส์แรงดัน ออปแอมป์จึงต้องมีค่าอัตราสลูว์สูงๆ แต่กินกระแสไบอัสต่ำ



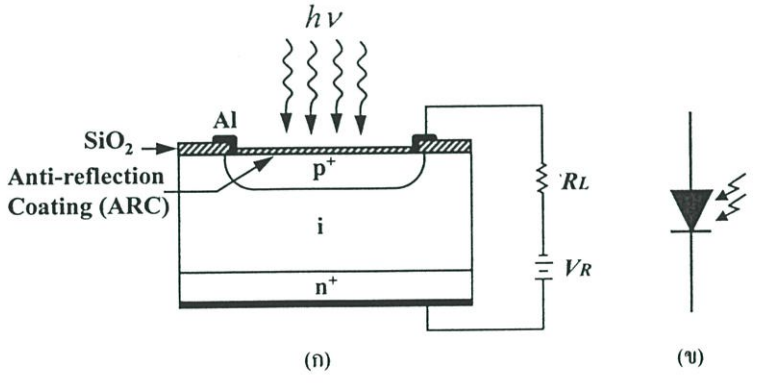
รูปที่ 2.21 วงจรสำหรับตัวตรวจจับรังสีแกรมม่า และรังสีเอกซ์

บทที่ 3
โครงสร้าง หลักการทำงาน และการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

ในบทนี้อธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีพื้นฐานของโฟโตไดโอด โครงสร้าง และหลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด PIN ลักษณะสมบัติสำคัญต่างๆ ของโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้แก่ ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพการตอบสนองทางแสง วงจรสมมูลย์ของโฟโตไดโอด และความเร็วในการตอบสนอง และแบนด์วิดท์ การเกิดสัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอด พฤติกรรมการเกิดกระแสมืด เป็นต้น จากนั้นกล่าวถึงซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง ในส่วนท้ายของบทนี้อธิบายรายละเอียดการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ซึ่งเนื้อหาทั้งหมดนี้จำเป็นสำหรับการศึกษา ออกแบบ และสร้างโฟโตไดโอดให้มีประสิทธิภาพสูงต่อไป

3.1 โครงสร้าง และหลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด PIN

โฟโตไดโอดชนิด PIN คือโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อ PIN มีชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง (เจือสารปริมาณน้อยมาก) หรือสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค (ชั้น *i*) ระหว่างรอยต่อพี-เอ็น ดังในรูปที่ 3.1(ก) แสดงโครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด PIN (ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้า



รูปที่ 3.1 โฟโตไดโอดชนิด PIN [14] (ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง (ข) สัญลักษณ์

ลักษณะเด่นของโฟโตไดโอดชนิด PIN คือ จากการที่มีชั้น *i* จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูง เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้าง ในปัจจุบันมีการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลาย [1]-[9] เช่น ในระบบการสื่อสารด้วยแสง อุปกรณ์รีโมตคอนโทรล อุปกรณ์ดิสก์ (แผ่น CD และ DVD) ด้านการแพทย์ และระบบการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวเกี่ยวกับคุณสมบัติ และการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิด PIN

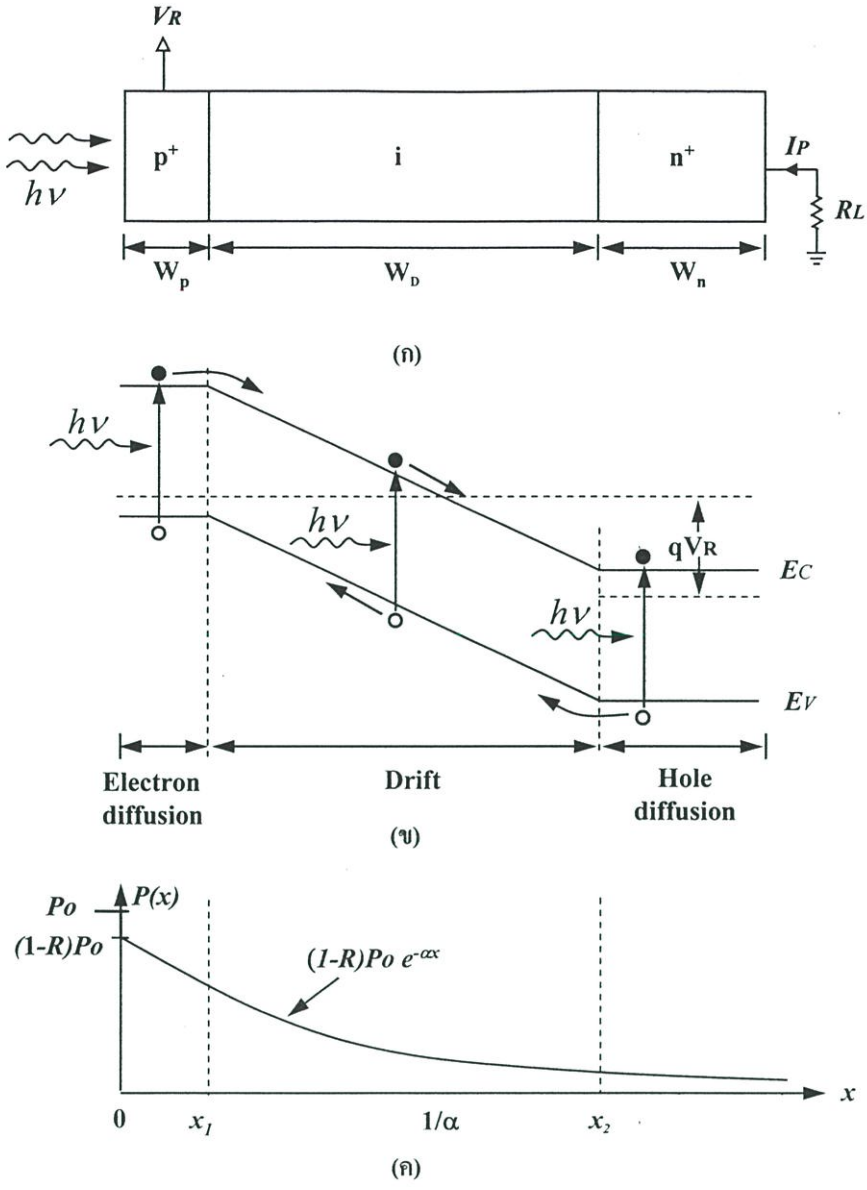
3.1.1 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด PIN

หลักการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิด PIN คล้ายกับกรณีของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น แตกต่างกันที่โฟโตไดโอดชนิด PIN จะมีชั้น *i* อยู่ซึ่งเป็นชั้นปลอดพาหะ โดยสามารถสร้างชั้น *i* จากวัสดุต่างๆ และให้มีความหนาต่างๆ ได้ตามต้องการ ซึ่งในกรณีของโฟโตไดโอดนั้นความหนาของชั้นปลอดพาหะจะถูกกำหนดด้วยปริมาณ และวิธีการโดปสารเจือปนของรอยต่อพี-เอ็น สมการต่างๆ ที่ใช้สำหรับอธิบายการทำงานของโฟโตไดโอดชนิด PIN สามารถเลียนแบบได้จากกรณีของโฟโตไดโอดชนิดพี-เอ็น ดังจะกล่าวต่อไป

ในรูปที่ 3.2 เมื่อฉายแสงเข้าสู่โฟโตไดโอดชนิด PIN ทางด้านชั้นพี จะทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน และโฮลอิสระขึ้นในชั้นต่างๆ ทั้งในชั้นพี ชั้นอินทรินซิค และชั้นเอ็น พาหะที่เกิดขึ้นจากแสงจะเปลี่ยน เป็นกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตได้ด้วยกลไก 2 ชนิด ได้แก่ [20]

1) ถ้าพาหะอิสระเหล่านี้สามารถไหลออกสู่วงจรภายนอกได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหล พาหะอิสระที่เกิดในชั้นอินทรินซิค จะมีบทบาทในการกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากที่สุด โดยพาหะจากชั้นอินทรินซิค จะถูกดริฟท์ (drift) ให้ไหลออกสู่วงจรภายนอกด้วยปรากฏการณ์พัดพาด้วยศักย์ไฟฟ้าภายใน โดยอิเล็กตรอนจะไหลออกทางชั้นเอ็น และโฮลจะไหลออกทางชั้นพี กระแสไฟฟ้าที่ได้ในลักษณะนี้เรียกว่า "กระแสไฟฟ้าดริฟท์" I_{drift}(drift current)

2) โฮลที่เกิดในชั้นเอ็นนั้น ถ้ามีระยะทางการแพร่ (diffusion length) ที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้นเอ็น ผ่านเข้าสู่ชั้นอินทรินซิค และไหลไปสู่ชั้นพีได้ และกลายเป็น "กระแสไฟฟ้าแพร่" I_{diff} (diffusion current) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดในชั้นพี ถ้ามีระยะทางการแพร่ที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่จากชั้นพี เข้าสู่ชั้นอินทรินซิค และชั้นเอ็นได้ และจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ด้วย



รูปที่ 3.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN [14] (ก) โครงสร้างขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ
(ข) แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ
(ค) การลดลงของพลังงานแสงที่ตกกระทบตามระยะความลึก

ดังนั้นกระแสแสงรวม (I_p) ที่เกิดขึ้นใน โฟโตไดโอดชนิด PIN จึงเป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าดริฟท์ และกระแสไฟฟ้าแพร่ ดังนี้

$$I_P = I_{drift} + I_{diff} \qquad \textbf{(3.1)}$$

ถ้าสมมติให้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดจากความร้อนมีค่าน้อยมาก และความหนาของชั้น p^+ มีค่าน้อยกว่าส่วนกลับของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำในชั้น p^+ มาก กล่าวคือ แสง

ที่ตกกระทบถูกดูดกลืนในชั้น p^+ น้อยมาก และแสงที่ตกกระทบส่วนใหญ่ถูกดูดกลืนในชั้น i ดังนั้น อัตราการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ในชั้น i ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นของความลึก x จึงมีรูปดังนี้คือ

$$G(x) = \Phi_0 \alpha e^{-\alpha x} \tag{3.2}$$

โดยที่ α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำในชั้น i และ Φ_0 คือ ฟลักซ์โฟตอนที่ตกกระทบโฟโตไดโอดชนิด PIN ต่อหน่วยพื้นที่ A และมีค่าเท่ากับ

$$\Phi_0 = \frac{P_0(1-R)}{Ah\nu} \tag{3.3}$$

โดยที่ Po คือ กำลังงานแสงตกกระทบ

R คือ สภาพการสะท้อนแสงที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ

ดังนั้นกระแสไฟฟ้าดริฟท์ I_{drift} จึงคำนวณได้ดังนี้

$$I_{drift} = -qA\int_0^{W_D} G(x)dx = qA\Phi_0(1-e^{-\alpha W_D})$$

หรือ
$$I_{drift} = q\Phi_0 A(1-e^{-\alpha W_D}) = q\frac{P_0(1-R)}{h\nu}A(1-e^{-\alpha W_D}) \tag{3.4}$$

โดยที่ W_D คือ ความหนาของชั้น i

สำหรับกระแสไฟฟ้าแพร่สามารถคำนวณได้ดังนี้ ที่ตำแหน่ง $x > W_D$ กล่าวคือ ในบริเวณชั้น n^+ นั้นความหนาแน่นของโฮล สามารถคำนวณได้โดยใช้สมการการแพร่ดังนี้

$$D_p\frac{\partial^2 p_n}{\partial x^2} - \frac{p_n - p_{n0}}{\tau_p} + G(x) = 0 \tag{3.5}$$

โดยที่ D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

τ_p คือ อายุพาหะส่วนเกิน

p_{n0} คือ ความหนาแน่นของโฮล

เมื่อหาผลเฉลยของสมการ (3.5) ดังนั้นกระแสไฟฟ้าแพร่ของโฮลที่ไหลจากชั้น n^- ไปทางด้านชั้น i จึงเท่ากับ

$$I_{diff} = -qAD_p\left(\frac{\partial p_n}{\partial x}\right)_{x=WD}$$
$$= qA\Phi_0\frac{\alpha L_p}{1+\alpha L_p}e^{-\alpha W_D} + qAP_{n0}\frac{D_p}{L_p} \qquad (3.6)$$

ดังนั้นกระแสแสงรวมทั้งหมดที่เกิดในโฟโตไดโอดชนิด PIN จึงหาได้จากผลรวมของสมการที่ (3.5) และ (3.6) ได้ดังนี้

$$I_P = qA\Phi_0\left[1-\frac{e^{-\alpha W_D}}{1+\alpha L_p}\right]+\frac{qAp_{n0}D_p}{L_n} \qquad (3.7)$$

โดยที่ L_p และ L_n คือ ระยะการแพร่ของโฮล และอิเล็กตรอน ตามลำดับ ปกติแล้ว p_{n0} มีค่าน้อย ทำให้สามารถตัดพจน์ที่สองทางขวามือออกได้ ดังนั้นกระแสแสงเอาต์พุตรวมของโฟโตไดโอดชนิด PIN จึงแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนต่อพื้นที่ตกกระทบโฟโตไดโอดชนิด PIN

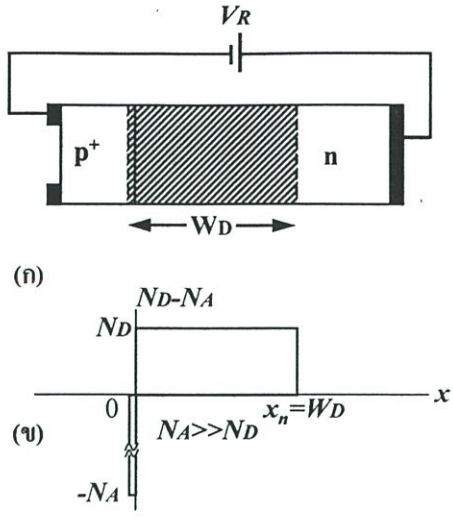
3.1.2 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

จากหัวข้อที่ผ่านมาได้กล่าวไว้ว่าโฟโตไดโอดชนิด PIN มีประสิทธิภาพควอนตัมสูงเนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้าง ในที่นี้ชั้นดูดกลืนแสงบริเวณ คือบริเวณปลอดพาหะ โดยขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส และในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ V_R ดังแสดงในรูปที่ 3.3 และสามารถหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม แสดงได้ดังนี้ [23]

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{q}\left(\frac{N_A+N_D}{N_AN_D}\right)\left(V_{bi}+V_R\right)} \qquad (3.8)$$

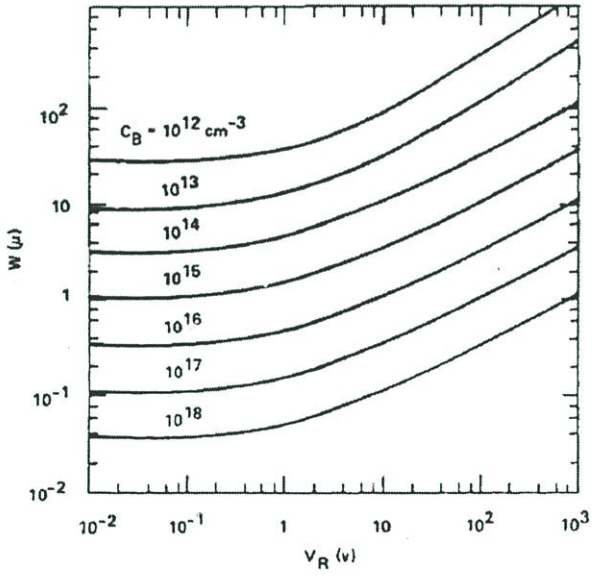
ถ้าพิจารณาว่ารอยต่อพี-เอ็น เป็นแบบ p^+-n ซึ่งก็คือ $N_A >> N_D$ ดังนั้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของด้าน p^+ น้อยกว่าด้าน n มากๆ หรือ $x_p << x_n$ นั้นเอง ดังสมการที่ 3.13

$$W_D \cong x_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s}{qN_D}\left(V_{bi}+V_R\right)} \qquad (3.9)$$



รูปที่ 3.3 รอยต่อพี-เอ็นแบบขั้นบันได [23] (ก) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) การกระจายความหนาแน่นประจุไฟฟ้า

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถเปลี่ยนแปลงได้ โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 3.4 ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผลึกฐานรองมีผลโดยตรงกับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ด้วยสาเหตุดังกล่าวนี้ทำให้โฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นโฟโตไดโอดบริเวณปลอดพาหะกว้างมาก เนื่องจากมีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผลึกฐานรองต่ำ



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ความกว้างบริเวณปลอดพาหะกับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซิลิคอนไดโอดแบบรอยต่อขั้นบันได [16]

3.1.3ความจุไฟฟ้ารอยต่อ

ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น สามารถแสดงลักษณะสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ เป็นความจุไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนาน การวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าจากรอยต่อ อาจทำได้โดยการพิจารณาว่าเมื่อนำไดโอดไปใช้งาน ไดโอดจะต้องอยู่ในสภาพที่ได้รับแรงดันไบอัส ซึ่งความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น การเปลี่ยนแปลงของความกว้างของบริเวณปลอดพาหะก็คือ การเปลี่ยนแปลงของปริมาณประจุไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะนั่นเอง

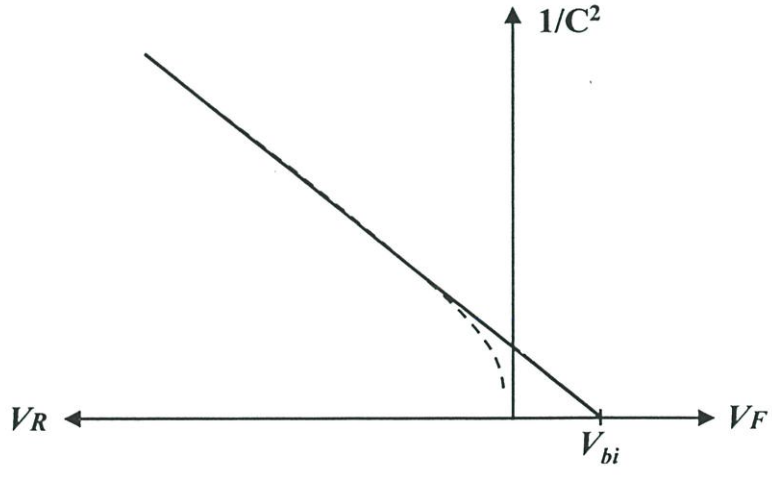
สำหรับความจุไฟฟ้าของรอยต่อ p^{+}-n แบบขั้นบันได หาได้จากสมการที่ 3.10 [23]

$$C_j = \frac{\varepsilon_s}{W_D} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_s N_D}{2(V_{bi}+V_R)}} \tag{3.10}$$

จากสมการที่ 3.11 จะเห็นได้ว่าความจุไฟฟ้ารอยต่อแบบขั้นบันได แปรผกผันกับรากที่สองของแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อ

$$\frac{1}{C_j^2} = \frac{2(V_{bi}+V_R)}{q\varepsilon_s N_D} \tag{3.11}$$

ดังนั้นจากสมการที่ 3.11 สามารถที่จะวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ N_D ซึ่งปีนสารเจือในด้านที่มีความหนาแน่นต่ำของรอยต่อพี-เอ็นได้ $(slope = 2/q\varepsilon_s N_D)$ และยังสามารถหาค่า V_{bi} ได้อีกด้วย โดยการเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_j^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของไดโอด กราฟจะเป็นเส้นตรง ดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่าง $1/C_j^2$ กับแรงดันไบอัสย้อนกลับของไดโอดแบบรอยต่อขั้นบันได

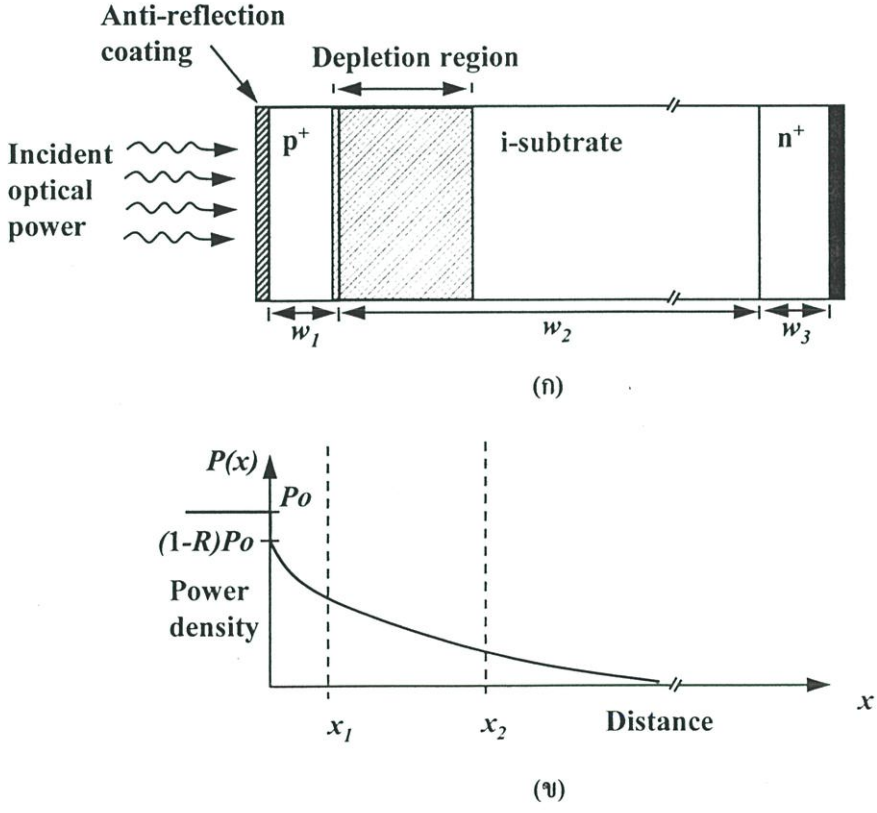
3.2 ลักษณะสมบัติสำคัญต่างๆ ของโฟโตไดโอดชนิด PIN

3.2.1. ประสิทธิภาพควอนตัม

นิยามของประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : η) ของโฟโตไดโอด คือ อัตราส่วนของจำนวนการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล กับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ นั่นคือ [22]

$$\eta = \frac{J_P / q}{P_0 / Ah\nu} = (1-R)(1-\frac{e^{-\alpha W_D}}{1+\alpha L_P}) \qquad (3.12)$$

ในทางอุดมคติแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดทั้งหมดควรจะถูกดูดกลืนในบริเวณปลอดพาหะ และคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดทั้งหมดเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า แล้วกระแสแสงไหลในวงจร ประสิทธิภาพควอนตัมควรจะเท่ากับ 1 แต่ความจริงแล้วในทางปฏิบัติแสงที่ตกกระทบเกิดการสะท้อนที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ และโฟตอนจากแสงเข้ามายังสารกึ่งตัวนำทั้งหมดจะไม่ถูกดูดกลืนในบริเวณปลอดพาหะ แสดงดังในรูปที่ 3.6 ทำให้ทราบว่าการเพิ่มประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอดนั้น มีข้อควรพิจารณาดังนี้



รูปที่ 3.6 การลดลงของพลังงานแสงที่ตกกระทบผิวสารกึ่งตัวนำตามระยะความลึก [24]

1) ลดสภาพการสะท้อนแสงของผิวสารกึ่งตัวนำ
2) เพิ่มความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
3) หลีกเลี่ยงการรวมตัวของพาหะก่อนถึงขั้วไฟฟ้า

แสงที่ตกกระทบผิวสารกึ่งตัวนำมากกว่า 35 % [25] จะสะท้อนออกไป การลดการสะท้อนแสงทำได้โดยการเพิ่มชั้นลดการสะท้อนแสงบนผิวหน้าของสารกึ่งตัวนำ เช่น ซิลิคอนไดออก ไซด์ (SiO_2) หรือ ซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) จะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอดได้

จากรูปที่ 3.6 จะเห็นได้ว่าบริเวณดูดกลืนแสงที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วงระยะความลึก x_1 และ x_2 ใต้พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ถ้าให้ P_0 คือ พลังงานแสงตกกระทบ และ R คือ สภาพการสะท้อนแสงของพื้นผิว ดังนั้น ความหนาแน่นพลังงานที่เข้ายังสารกึ่งตัวนำเท่ากับ $(1-R)P_0$ และพลังงานที่ถูกดูดกลืนในช่วงระยะความลึก x_1 และ x_2 นั่นคือ

$$P = (1-R)P_0\left[e^{-\alpha x_1} - e^{-\alpha x_2}\right] \tag{3.13}$$

ด้วยเหตุนี้ ประสิทธิภาพควอนตัม ก็คือ

$$\eta = P/P_0 = (1-R)e^{-\alpha x_1}\left[1 - e^{-\alpha(x_1-x_2)}\right] \tag{3.14}$$

จากสมการที่ 3.14 จะสามารถพิจารณาได้ว่า x_1 ควรมีค่าน้อยๆ และ x_2 ควรมีค่ามากที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ การลดการสะท้อนแสงควรน้อยเช่นกัน

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าความกว้างบริเวณปลอดพาหะมากเกินไป จะทำให้พาหะต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านชั้น i นานขึ้น และจะส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองลดลงได้

3.2.2. สภาพการตอบสนองทางแสง

สภาพการตอบสนองทางแสง (responsivity : $\mathscr{R}$) คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดกับกำลังงานแสงที่ตกกระทบ สามารถหาได้จากสมการที่ 3.15

$$\mathscr{R} = \frac{I_P}{P_0} = \eta\frac{q}{h\nu} = \eta\frac{q\lambda}{hc}(A/W) \tag{3.15}$$

โดยที่ P_0 คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ

q คือ ประจุอิเล็กตรอน

I_p คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทกเตอร์

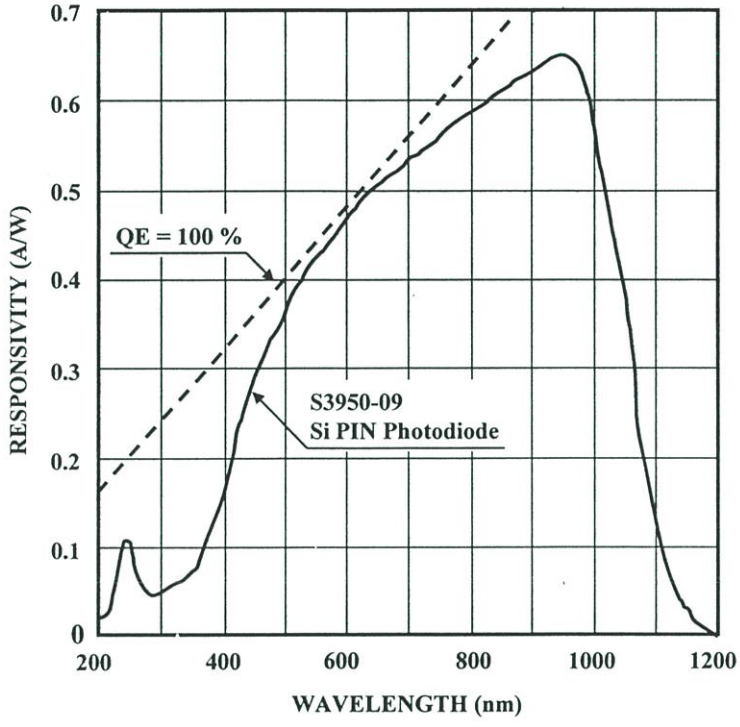
h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

ν คือ ความถี่ของคลื่น

λ คือ ความยาวคลื่น

η คือ ค่าประสิทธิภาพควอนตัม

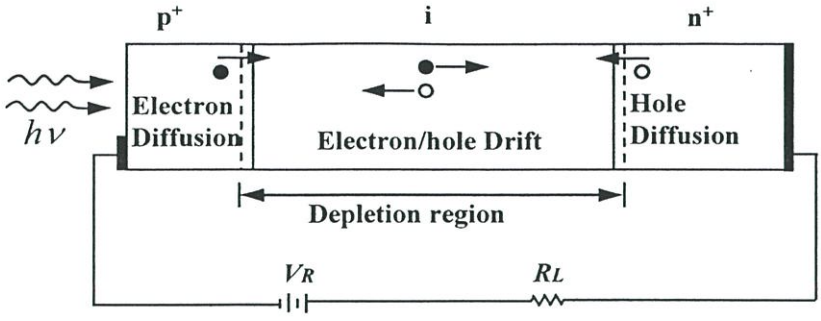
จากสมการที่ 3.15 พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน ดังในรูปที่ 3.7 แสดงสภาพการตอบสนองทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN จะเห็นได้ว่าสภาพการตอบสนองลดอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงจุดความยาวคลื่นคัทออฟ



รูปที่ 3.7 สภาพการตอบสนองทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN [21]

3.2.3. ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอด

จากรูปที่ 3.8 แสดงปรากฏการณ์ต่างๆ ที่เกี่ยวข้องในโฟโตไดโอดชนิด PIN แสงเดินทางเข้าทางด้านชั้นพี ซึ่งมีความบางมาก ดังนั้นโฟโตอิเล็กตรอน และโฮลส่วนใหญ่จึงเกิดในชั้นปลอดพาหะ (ชั้น *i*) และพาหะบางส่วนเกิดในชั้นพี และชั้นเอ็น ในระยะทางแพร่พาหะเหล่านี้ จะถูกแยกออกจากกันด้วยสนามไฟฟ้าที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และกลายเป็นกระแส ไฟฟ้าเอาต์พุต



รูปที่ 3.8 โฟโตไดโอดชนิด PIN ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้แก่ เวลาที่นับจากตอนได้รับแสงจนเกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมา โดยหลักการของปรากฏการณ์ทางแสงแล้ว การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่พาหะจะใช้เวลาสั้นมาก ดังนั้นการล่าช้าของเวลากว่าจะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมาจึงขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ตัวอื่นๆมากกว่า โดยที่ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้แก่

(1) เวลาดริฟท์ (drift time : T_{drift}) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ

(2) เวลาแพร่ (diffusion time : T_{diff}) ที่พาหะใช้ในการแพร่ซึมเข้าสู่ชั้นปลอดพาหะ

(3) ค่าคงที่เวลา (CR time constant : T_{CR}) ของวงจรภายนอก

(1) เวลาดริฟท์

พาหะในชั้นปลอดพาหะ (ชั้น i) วิ่งได้ด้วยแรงจากสนามไฟฟ้า ($\mathcal{E}$) และเรียกความเร็วในการวิ่งเช่นนี้ว่า ความเร็วดริฟท์ (drift velocity : v_d) โดยที่ $v_d = \mu\mathcal{E}$ และ μ คือความคล่องตัวของพาหะ ถ้าชั้น i หนาเท่ากับ W และแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับเท่ากับ V_R จะได้ว่า $\mathcal{E} = V_R/W$ ดังนั้นเวลาพัดพาที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้น i คือ

$$T_{drift} = \frac{W_D}{v_d} = \frac{W^2}{\mu V_R} \qquad \textbf{(3.16)}$$

เนื่องจากความคล่องตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง มีค่ามากกว่าในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง ดังนั้นเวลาดริฟท์ของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรงจึงมีค่าน้อยกว่าของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง

(2) เวลาแพร่

ในบริเวณที่ไม่ได้เป็นชั้นปลอดพาหะเช่นชั้น p^+ หรือ n^+ จะไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้น T_{diff} จึงถูกกำหนดด้วยเวลาอายุของพาหะนั่นเอง ในทางปฏิบัติจะออกแบบให้ชั้น p และ n บางมาก จึงทำ

ให้การดูดกลืนแสงในชั้น p^+ และ n^+ มีน้อยมาก ดังนั้น I_{diff} จึงมีค่าน้อยกว่า I_{drift} มาก นั่นคือการออกแบบให้ I_{diff} มีค่าน้อยจะช่วยทำให้โฟโตไดโอดทำงานได้เร็วขึ้น โดยประมาณดังนี้

กรณี แสงเข้าทาง PIN $$T_{diff} = \frac{1}{13}\left(\frac{3}{\alpha} - 0.54\,\rho_p^{1/2}\left(V_{bi} - V_R\right)^{1/2} x10^{-4}\right)^2 \quad \textbf{(3.17)}$$

กรณี แสงเข้าทาง NIP $$T_{diff} = \frac{1}{36.4}\left(\frac{3}{\alpha} - 0.32\,\rho_n^{1/2}\left(V_{bi} - V_R\right)^{1/2} x10^{-4}\right)^2 \quad \textbf{(3.18)}$$

(3) ค่าคงที่เวลาของ CR

ค่าคงที่เวลาของ CR เกิดจากเวลาที่ต้องใช้ในการชาร์จ และดิสชาร์จประจุไฟฟ้าผ่านความจุไฟฟ้าของรอยต่อ และมีค่าเท่ากับผลคูณของ $R_L \times C_T$ โดยที่ R_L คือความต้านทานของโหลดและ C_T คือความจุไฟฟ้าของรอยต่อ PIN (และรวมของขาต่อต่างๆด้วย) โดยรวมความต้านทานอนุกรมด้วย แต่ถ้าออกแบบดีๆ และทำการไบแอสย้อนกลับ จะทำให้ $R_S << R_L$

นิยาม คือ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จประจุจากค่า 90% ของค่าสูงสุดลงเหลือ 10% ดังนั้น ค่าคงที่เวลา จึงเขียนได้ดังนี้

$$T_{CR} = 2.2 R_L C_T \quad \textbf{(3.19)}$$

3.2.4. เวลาการตอบสนอง และแบนด์วิดท์

ในจำนวนแฟกเตอร์เวลาทั้งสามชนิดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ตัวใดที่มีค่ามากที่สุดจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการตอบสนอง หรือแฟกเตอร์เวลาทั้งสามชนิดมีอิทธิพลเท่าเทียมกัน อาจใช้ค่าเฉลี่ยได้ว่า

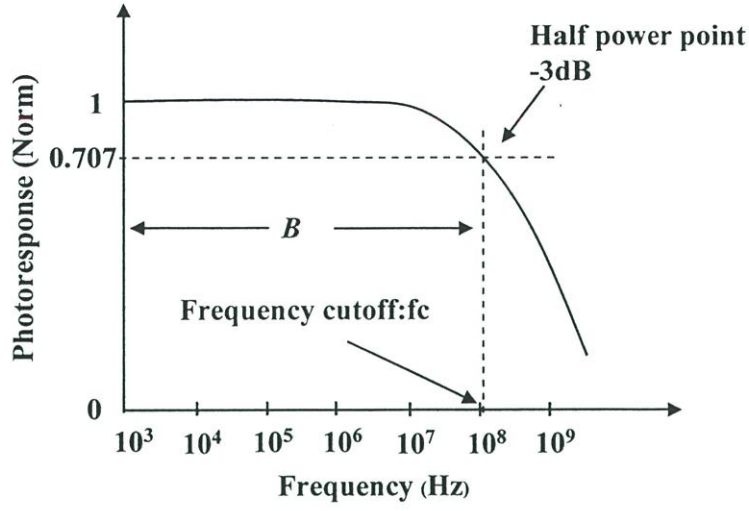
$$T = \left(T^2 drift + T^2 diff + T^2 CR\right)^{1/2} \quad \textbf{(3.20)}$$

ถ้า T_{diff} มีค่ามากจะทำให้ความเร็วในการตอบสนองลดลง การออกแบบให้การดูดกลืนแสงในชั้น p^+ และ n^+ มีค่าน้อยจะเป็นการลดกระแสไฟฟ้าแพร่ และทำให้ T_{diff} น้อยลง ทางด้านค่าคงที่เวลา CR นั้น การออกแบบให้ชั้นปลอดพาหะหนาขึ้นจะทำให้ค่าความจุรอยต่อลดลง และจะทำให้ค่าคงที่เวลาลดลงได้

สำหรับความถี่ซึ่งจะทำให้สัญญาณลดลงเหลือ 0.707 (-3dB) ดังแสดงในรูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณที่ความถี่คัทออฟ นั่นคือ

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad \textbf{(3.21)}$$

โดยที่ B นี้เรียกว่า แบนด์วิดท์



รูปที่ 3.9 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

ถ้าสิ่งประดิษฐ์ถูกกำหนดด้วยแฟกเตอร์ค่าคงที่เวลา CR มาก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิดท์ และค่าคงที่เวลา CR ดังนี้

$$T = T_{CR} = 2.2CR = \frac{2.2}{2\pi B} = \frac{0.35}{B} \qquad \textbf{(3.22)}$$

3.2.5. การเกิดสัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอด [22]

การเกิดสัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นสาเหตุที่ทำให้โฟโตไดโอดไม่สามารถแสดรวจจับแสงที่มีความเข้มต่ำกว่าขีดจำกัด ในการใช้งานตัวตรวจจับแสงที่ได้ผลทั่วๆ ไปนั้น สัญญาณแสงจะต้องผลิตกระแสไฟฟ้าแสงให้ได้ปริมาณมากกว่าสัญญาณรบกวน การเกิดสัญญาณรบกวนที่จะนำมาพิจารณาในหัวข้อนี้มี 3 ส่วน คือ 1) สัญญาณรบกวนมืด (dark noise) 2) สัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise) และ 3) สัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล (thermal noise) เมื่อใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดที่ต้องป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ไดโอด จะเกิดสัญญาณรบกวนซึ่งเป็นผลรวมของสัญญาณรบกวนทั้ง 3

1) สัญญาณรบกวนมืด สัญญาณรบกวนชนิดนี้เกิดจากผลของกระแสรั่ว เมื่อใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดที่ต้องป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแส Id ไหลผ่านโฟโตไดโอด ขณะไม่มีแสงตกกระทบพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด ปริมาณกระแสมืดขึ้นกับโครงสร้าง และระดับแรงดัน

ที่ตกคร่อมรอยต่อของไดโอด ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดสัญญาณรบกวนได้โดยการแจกแจงฟังก์ชั่นของปัวส์ซอง (Poission distribution) แสดงด้วยสมการ ดังนี้

$$i_n = (2qBI_d)^{1/2} \tag{3.23}$$

เมื่อ Id คือ กระแสมืดของโฟโตไดโอด

B คือ แบนด์วิท

q คือ ประจุอิเล็กตรอน

การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลตาอิกทำให้สัญญาณรบกวนชนิดนี้มีค่าเกือบเป็นศูนย์เพราะไม่มีกระแสมืด ถ้าสัญญาณรบกวนลดลงได้ทำให้ความไวแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วน S/N มากขึ้น

2) สัญญาณรบกวนชนิดช็อต สัญญาณรบกวนชนิดแปรผันกับความเข้มแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอด กระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนเกิดเมื่อโฟตอนจากแสงทำให้เกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล อิสระขึ้นในวัสดุที่ใช้สร้างตัวตรวจจับ ซึ่งโฟตอนที่ตกกระทบโฟโตไดโอดในแบบไม่เป็นระเบียบ (random) ทำให้เกิดการผลิตคู่พาหะอิเล็กตรอนแบบไม่เป็นระเบียบด้วย สัญญาณรบกวนชนิดช็อตจึงเปลี่ยนแปลงตามกระแสแสง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนชนิดช็อตเกิดได้ในโฟโตไดโอดทั้งกรณีไม่ไบอัส และไบอัส ซึ่งสามารถอธิบายฟังก์ชันการเกิดสัญญาณรบกวนได้โดยการแจกแจงของปัวส์ซอง แสดงด้วยสมการได้ดังนี้

$$ish = (2qBI_P)^{1/2} \tag{3.24}$$

เมื่อ I_P คือ กระแสแสงของโฟโตไดโอด

B คือ แบนด์วิท

3) สัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล สัญญาณรบกวนชนิดนี้เรียกอีกอย่างว่า "สัญญาณรบกวนชนิดจอห์นสัน"(Johnson noise) เป็นผลจากการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบของอิเล็กตรอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิในสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นสัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอลไม่ขึ้นกับกระแสไฟฟ้าของสัญญาณอินพุต และความต้านทานแบบชันต์ในโฟโตไดโอดเป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวนชนิดนี้ ซึ่งสมการกระแสไฟฟ้ารบกวนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$i_J = (4KTB / R_{SH})^{1/2} \quad (3.25)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

B คือ แบนด์วิท

R_{SH} คือ ความต้านทานชันต์ของโฟโตไดโอด

กระแสไฟฟ้ารบกวนรวมในตัวอุปกรณ์สามารถหาได้โดยหาผลรวมรากที่สองของสัญญาณรบกวนทั้ง 3 ชนิด ดังนี้

$$i_T = (i^2_n + i^2_{sh} + i^2_J)^{1/2} \quad (3.26)$$

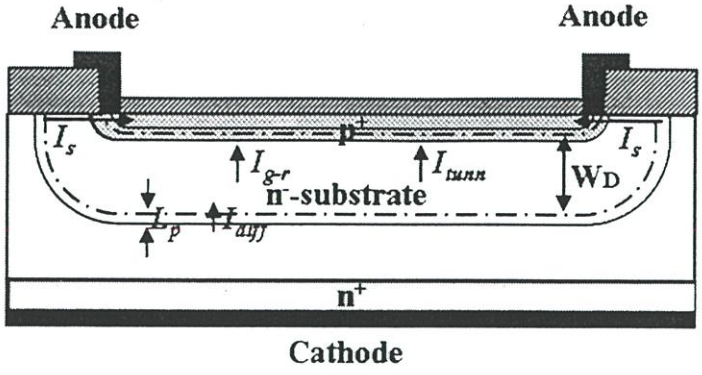
เมื่อ i_T คือ สัญญาณรบกวนรวมที่เกิดในโฟโตไดโอด i_n คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระแสรั่วขณะไม่ได้รับแสง i_{sh} คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากผลของโฟตอนที่ตกกระทบโฟโตไดโอดในแบบไม่เป็นระเบียบ และ i_J คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดการลดลงของความต้านทานชันต์เนื่องจากผลอิทธิพลของอุณหภูมิ จากสมการที่ 3.26 จะเห็นได้ว่า การลดกระแสมืดดังกล่าวจะทำให้สามารถลดสัญญาณรบกวนของโฟโตไดโอดลงได้ ซึ่งกลไกการเกิดกระแสมืดจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

3.2.6 พฤติกรรมการเกิดกระแสมืด[26]

จากหัวข้อที่ผ่านมาปัจจัยที่มีข้อจำกัดในการใช้งานโฟโตไดโอด คือ ขนาดกระแสมืดขณะโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และไม่ได้รับแสง หรือรังสี จะมีกระแสค่าน้อยๆ ไหลผ่านไดโอด โดยกระแสรั่ว หรือกระแสมืดดังกล่าวนี้เกิดจากในเนื้อสาร(bulk) และบริเวณผิวสัมผัส (Si/SiO_2) ของตัวตรวจจับ โดยทั่วไปแหล่งการเกิดกระแสมืด(I_{dark}) ของโฟโตไดโอดสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

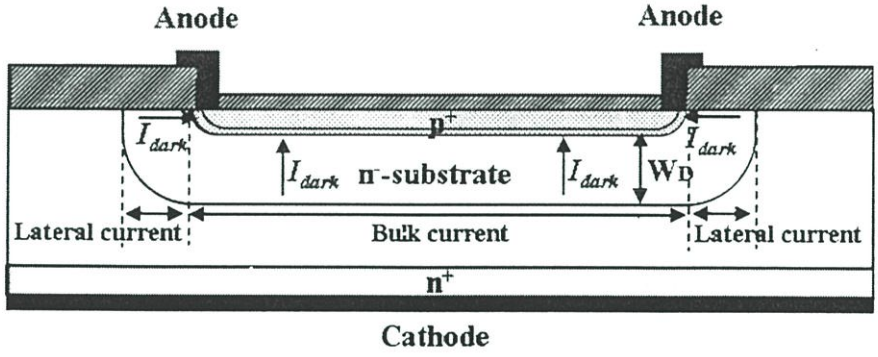
$$I_{dark} = I_{diff} + I_{g-r} + I_{tunn} + I_s \quad (3.27)$$

ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย (Diffusion Current : I_{diff}), กระแสการเกิด-รวมตัวใหม่ในบริเวณปลอดพาหะ (Generation-Recombination Current : I_{g-r}), กระแสทะลุอุโมงค์กำแพงศักย์ (Tunnel Current : I_{turn}), กระแสรั่วผิวสัมผัส (Surface Leakage current : I_s) โดยที่กระแสมืดแต่ละประเภทมีพฤติกรรมการเกิดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แหล่งกำเนิดเกิดกระแสมืดชนิดต่างๆ ของโฟโตไดโอด

บริเวณการเกิดกระแสมืดอาจแบ่งได้เป็น กระแสใต้บริเวณผิวสัมผัส (Lateral current) และในเนื้อสาร (Bulk current) กระแสใต้บริเวณผิวสัมผัสเป็นกระแสมืดที่เกิดบริเวณใกล้ขอบด้านข้างของโฟโตไดโอด กระแสชนิดนี้จึงแปรผันกับพื้นที่ขอบด้านข้างของโฟโตไดโอด ส่วนกระแสในเนื้อสารเป็นกระแสมืดที่เกิดจากพื้นที่ใต้บริเวณรอยต่อพี-เอ็นโดยตรง กระแสในเนื้อสารขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่รอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 การเกิดกระแสมืดแบ่งตามบริเวณของโฟโตไดโอด

3.6.2.1 กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย

เมื่อไฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะสูงมากจนความสมดุลย์ระหว่างพาหะแพร่ และดริฟท์ไม่เท่ากัน ทำให้กระแสดริฟท์มากกว่ากระแสแพร่ โฮลที่ขอบบริเวณชั้นเอ็นเคลื่อนที่ไปยังชั้นพีด้วยสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนในชั้นพีเคลื่อนที่ไปยังชั้นเอ็น เมื่อพาหะส่วยน้อยเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้า พาหะส่วนน้อย

ภายในบริเวณใกล้เคียงมาแทนที่ จึงเกิดเป็นกระแสการแพร่ภายใต้แรงดันไบอัส กระแสการแพร่สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$I_{diff} = qA\left[\frac{D_p p_n}{L_p} + \frac{D_n n_p}{L_n}\right] \tag{3.28}$$

เมื่อ $p_n = \frac{n_i^2}{N_D}, n_p = \frac{n_i^2}{N_A}$ ดังนั้น

$$I_{diff} = q\, n_i^2\left[\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A}\right] \tag{3.29}$$

ในกรณีโฟโตไดโอดรอยต่อ p^+n, $N_A >> N_D$ ดังนั้น

$$I_{diff} = q\, n_i^2\left[\frac{D_p}{L_p N_D}\right] \tag{3.30}$$

เมื่อ $L_p = \sqrt{D_p \tau_p}$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ ดังนี้

$$I_{diff} = q\frac{n_i^2}{N_D}\left[\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}}\right] = q\frac{n_i^2}{N_D}\left[\frac{L_p}{\tau_p}\right] \tag{3.31}$$

เมื่อ q คือ ประจุอิเล็กตรอน

n_i คือ ความหนาแน่นอินทรินซิค

N_D คือ ความหนาแน่นอะตอมผู้ให้

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

τ_p คือ อายุของโฮล

L_p คือ ระยะการแพร่ของโฮล

จากสมการเห็นได้ว่ากระแสการแพร่ไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัส แต่อิทธิพลของอุณหภูมิทำให้กระแสการแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นอินทรินซิคเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

3.2.6.2 กระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่

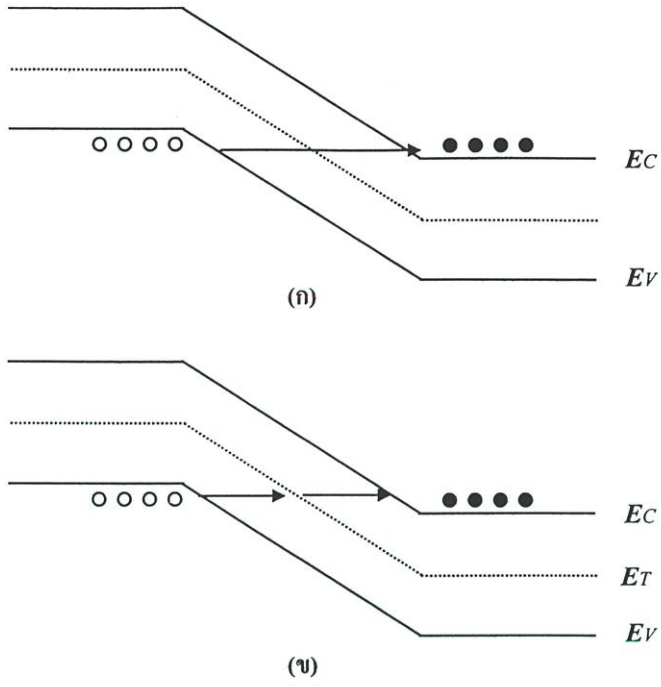
กระแสการเกิดและการรวมตัวใหม่ หรือกระแส g-r เป็นกลไกการเกิดกระแสมืดอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดสมรรถนะของโฟโตไดโอด ซึ่งสาเหตุเนื่องจากการเกิดศูนย์กลางการเกิด และรวมตัวใหม่ (generation-recombination center) ในช่องว่างพลังงาน ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวของอิเล็กตรอน และโฮลได้ เมื่อมีระดับพลังงานแปลกปลอมเหล่านี้อยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์เคลวิน และไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสชนิดใหม่เกิดขึ้นเรียกว่ากระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่ โดยปริมาณศูนย์กลางการเกิด และการรวมตัวใหม่ ขึ้นอยู่กับตำนิ และอะตอมธาตุแปลกปลอมของผลึก สามารถเขียนสมการการเกิดกระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่ ได้ดังนี้

$$I_{g-r} = \frac{qn_i A W_D}{\tau} \tag{3.32}$$

จากสมการกระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่ จะเห็นได้ว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดกระแส คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะซึ่งเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส และความหนาแน่นอินทรินซิค ซึ่งเป็นฟังก์ชั่นกับอุณหภูมิ

3.2.6.3 กลไกการเกิดกระแสทะลุกำแพงศักย์

เมื่อโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ สนามไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าสูง และกำแพงศักย์ก็จะมีค่าสูงด้วย เนื่องจากกำแพงศักย์มีขนาดแคบๆ กระทั่งทำให้เกิดการทะลุผ่านกำแพงศักย์ได้ โดยอิเล็กตรอนวาเลนซ์ที่อยู่ด้านชั้นพีซึ่งใกล้ขอบบริเวณปลอดพาหะ สามารถจะเคลื่อนที่ทะลุอุโมงค์ผ่านกำแพงศักย์ในย่านปลอดพาหะไปยังแถบนำทางด้านเอ็น ซึ่งมีสถานะพลังงานที่ว่างจำนวนมากได้ ทำให้เกิดกระแสทะลุกำแพงศักย์ การทะลุกำแพงศักย์ที่รอยต่อพี-เอ็น ของอิเล็กตรอน ในกรณีไบอัสย้อนกลับ อาจพิจารณาได้จากรูปที่ 3.12 การทะลุกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนมี 2 แบบ คือ แบบแถบถึงแถบ (direct band-to-band tunneling) และ แบบผ่านระดับแทรป (trap-assisted tunneling) สำหรับการทะลุกำแพงศักย์แบบแถบถึงแถบ โอกาสการทะลุผ่านของพาหะจากแถบหนึ่งไปยังอีกแถบขึ้นอยู่กับขนาดความกว้างของกำแพงศักย์ ส่วนการทะลุกำแพงศักย์แบบผ่านระดับแทรปโอกาสการทะลุผ่านของพาหะขึ้นอยู่กับระดับพลังงานที่เกิดขึ้นในช่องว่างพลังงานระหว่างแถบวาเลนซ์ และแถบนำ



รูปที่ 3.12 การทะลุกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอน (ก) แบบแถบถึงแถบ (ข) แบบผ่านระดับแทรป

จากการศึกษาของ W.W. Anderson และ Hoffman การเกิดกระแสทะลุกำแพงศักย์ที่รอยต่อพี-เอ็น ในกรณีโฟโตไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับ แสดงดังนี้

$$I_{tunn} = A_1 A R_{tunn} W_D \tag{3.33}$$

เมื่อ A_1 คือ ค่าคงที่

A คือ พื้นที่รอยต่อพี-เอ็น

R_{tunn} คือ อัตราการทะลุกำแพงศักย์ของพาหะ

W_D คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

โดยที่ อัตราการทะลุกำแพงศักย์ของพาหะ (R_{tunn}) เป็นฟังก์ชั่นเอ็กซ์โปแนนเชียลของศักย์ไฟฟ้า (V_{tunn}) ที่ตกคร่อมบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นสามารถเขียนสมการใหม่ ได้เป็น

$$I_{tunn} = A_1 A W[\exp(-\sqrt{\frac{Vtunn}{W_D}})] \tag{3.34}$$

เมื่อ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_D) ฟังก์ชั่นของ $\sqrt{V_{bi}+V}$ ในกรณีเป็นรอยต่อแบบขั้นบันได

3.2.6.4 กระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัส

กระแสมืดส่วนใหญ่ของโฟโตไดโอดเกิดเนื่องจากการเกิด และรวมตัวใหม่ของพาหะในบริเวณเนื้อสาร และบริเวณปลอดพาหะ ในทางปฏิบัติกระบวนการสร้างจริงโฟโตไดโอดยังสามารถเกิดกระแสมืดได้อีกในผิวสัมผัสของตัวอุปกรณ์ ในระหว่างผิวสารกึ่งตัวนำ และฉนวน จะมีสถานะพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานเกิดขึ้น เป็นศูนย์กลางการเกิด-รวมตัวใหม่ (g-r center) และเป็นแหล่งเกิดพาหะ และกระแสมืดที่สำคัญ กระบวนการเกิดนี้อธิบายโดยอัตราเร็วการเกิด-รวมตัวใหม่ที่ผิว กระแสบริเวณผิวสัมผัส หาได้ดังนี้

$$I_s = qn_i SA_s \tag{3.35}$$

เมื่อ S คือ อัตราเร็วการเกิด-รวมตัวใหม่ที่ผิว

$A_s = Lw_d$ คือ พื้นที่ปลอดพาหะของผิวสัมผัส Si/SiO_2

L คือ บริเวณขอบของโฟโตไดโอด

w_d คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะผิวสัมผัส Si/SiO_2

3.3 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

การออกแบบโฟโตไดโอดชนิด PIN ให้มีสภาพตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) ต้องพิจารณาถึงระยะการดูดกลืนแสงของซิลิคอนที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น และพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นไปตามกฎของ Lambert-Beer

$$P = (1\text{-}R)Po e^{-\alpha x} \tag{3.35}$$

เมื่อ P คือ พลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนที่ขึ้นกับระยะความลึกในโฟโตไดโอด

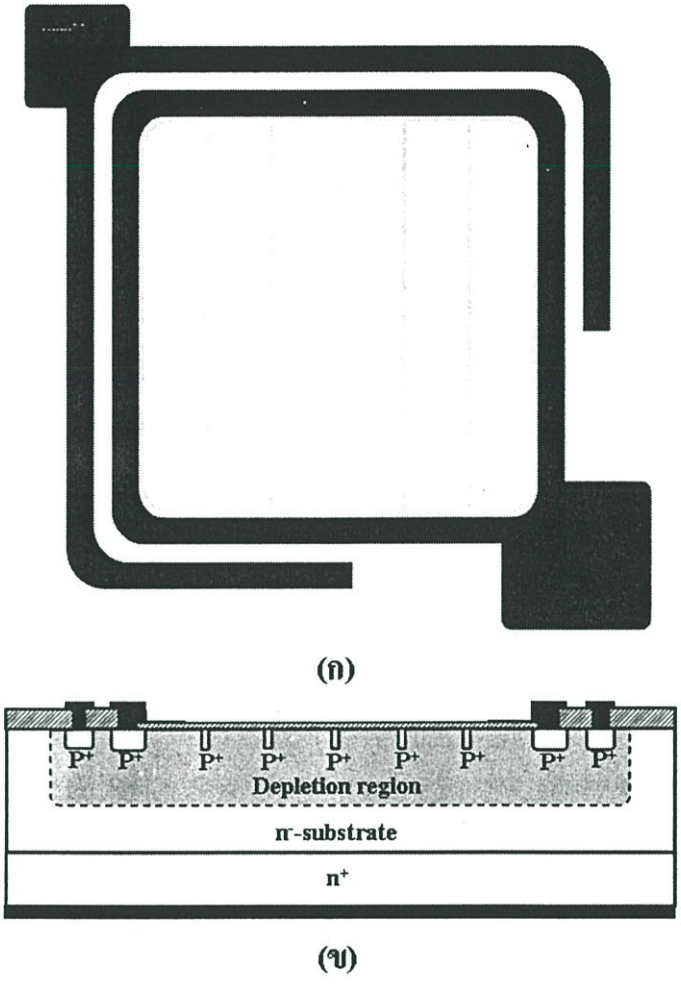
R คือ สภาพการสะท้อนแสง

Po คือ พลังงานแสงที่ตกกระทบ

α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

เมื่อพิจารณาถึงโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างธรรมที่ไม่มีชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ แบบแนวตั้งหลายแถบ [11]-[13] (vertical multi stripe-shaped) โฟตอนจากแสงที่ตกกระทบจะถูกดูดกลืนในบริเวณกึ่งนิวทรัล (quasi neutral region) ของชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น (short- wavelength) แสงจะถูกดูดกลืนในบริเวณใกล้ผิวหน้า

ของโฟโตไดโอดก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ [12] ซึ่งปกติแล้วการสร้างรอยต่อพีเอ็นด้วยกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือด้วยความร้อนระยะความลึกของรอยต่อมากกว่า 0.3 μm พาหะส่วนน้อยที่เกิดจากแสงอาจเกิดการรวมตัวใหม่ในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะเพราะสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอน และโฮลในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงมีค่าต่ำจึงทำให้การแพร่ของพาหะช้า จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างปกติที่ไม่มีชั้นหน้าต่างรับแสง p^+แบบแนวตั้งหลายแถบจึงมีค่าต่ำ



รูปที่ 3.13 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ (ก) ลวดลายต้นแบบ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวาง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะนำเสนอกระบวนการสร้าง การทดลองลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง และมีลักษณะพิเศษโดยชั้นพี (p^+) ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับแสง มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ เพื่อเพิ่มสภาพตอบสนอง

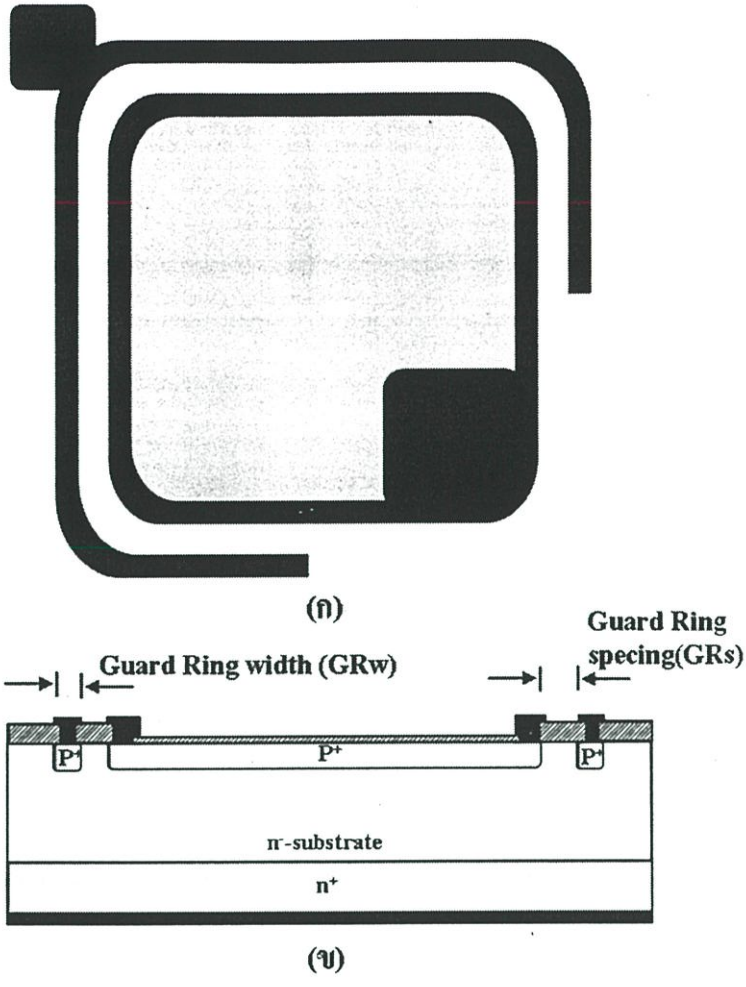
ทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอด การสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ให้มีสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมสูงในช่วงสเปกตรัมกว้าง จะต้องลดการเกิดการรวมตัวใหม่ และการแพร่ของพาหะที่ช้าในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ โดยใช้โครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งมีบริเวณปลอดพาหะ (space-charge region) อยู่ที่ผิว แสดงดังรูปที่ 3.13 (ข) จะเห็นได้ว่าชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ของโฟโตไดโอดมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ ที่เกิดจากรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดพี-เอ็น บนผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานสูง (เสมือนสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิค) แถบ p^+ เชื่อมต่อกับขั้วโลหะโดยรอบนอกบริเวณไวแสง (photo-sensitive region) แสดงดังรูปที่ 3.13 (ก) ประจุพาหะที่เกิดจากแสงจะถูกพัดพาโดยสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังชั้น n^+ และโฮลเคลื่อนที่ไปยังแถบ p^+

การศึกษาการลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสง และหาเงื่อนไขเหมาะสมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ [11] โดยได้เปรียบเทียบกระแสแสง และกระแสมืดระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดา (ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ) กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

3.4 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

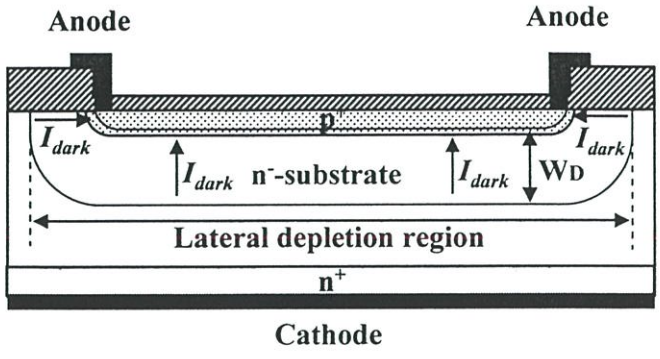
จากหัวข้อก่อนหน้านี้ กระแสมืดที่เกิดขณะโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และไม่ได้รับแสง หรือรังสี จะมีกระแสค่าน้อยๆ ไหลผ่านไดโอด โดยกระแสรั่ว หรือกระแสมืดดังกล่าวนี้เกิดจากในเนื้อสาร และบริเวณผิวสัมผัส Si/SiO_2 ของตัวตรวจจับ เป็นปัจจัยที่มีข้อจำกัดในการใช้งาน โฟโตไดโอด ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตไดโอด และเนื่องจากกระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสรั่วระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 เป็นกระแสมืดส่วนใหญ่ที่เกิดในโฟโตไดโอด [16]-[17] การสร้างชั้นการ์ดริง (Guard ring) จะช่วยลดกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 และในเนื้อสารได้ ดังนั้นการลดกระแสดังกล่าวจึงเป็นการลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดได้เป็นอย่างดี

การ์ดริง เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีเข้มข้น (ชั้น p^+) เหมือนพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดที่สร้างล้อมรอบโฟโตไดโอดเอาไว้เพื่อช่วยลดกระแสมืด และเพิ่มแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดได้ จากลวดลายผิวหน้า และโครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง แสดงดังรูปที่ 3.14 หน้าที่สำคัญของการ์ดริง คือการลดกระแสมืดของโฟโตไดโอด โดยโฟโตไดโอดที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้โฟโตไดโอด

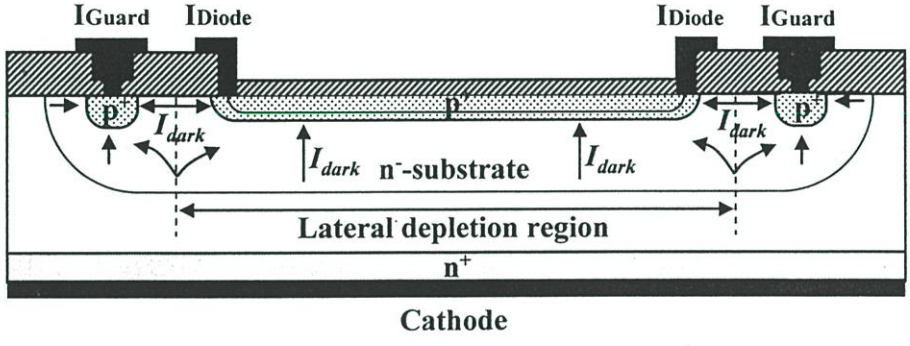


รูปที่ 3.14 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง (ก) ลวดลายต้นแบบ (ข) โครงสร้างภาคตัดขวาง

กระแสมืดส่วนใหญ่นอกบริเวณพื้นที่ไวแสง หรือบริเวณขอบนอกของไดโอดจะไหลไปยังการ์ดริง ดังแสดงในรูปที่ 3.15 กลไกที่ช่วยลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดชนิด PIN โดยแสดงเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง และโครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัส ในกรณีของโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่ไม่มีการ์ดริง กระแสมืดส่วนใหญ่นอกบริเวณพื้นที่ไวแสงจะไหลไปยังไดโอดทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 3.15 (ก) จึงมีผลให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าสูงกว่ากรณีโครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้โฟโตไดโอด โดยกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของกระแสมืด คือ เมื่อชั้นการ์ดริง p^+ ได้รับแรงดันไบอัส สนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอดจะถูกเบี่ยงเบน ให้มีทิศทางไปยังการ์ดริง ส่งผลให้พาหะที่จะก่อให้เกิดกระแสมืดที่เกิดในเนื้อสาร และระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 เคลื่อนที่ไปยังการ์ดริงแทนที่จะไปยังโฟโตไดโอด ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้กระแสมืดของ



(ก)

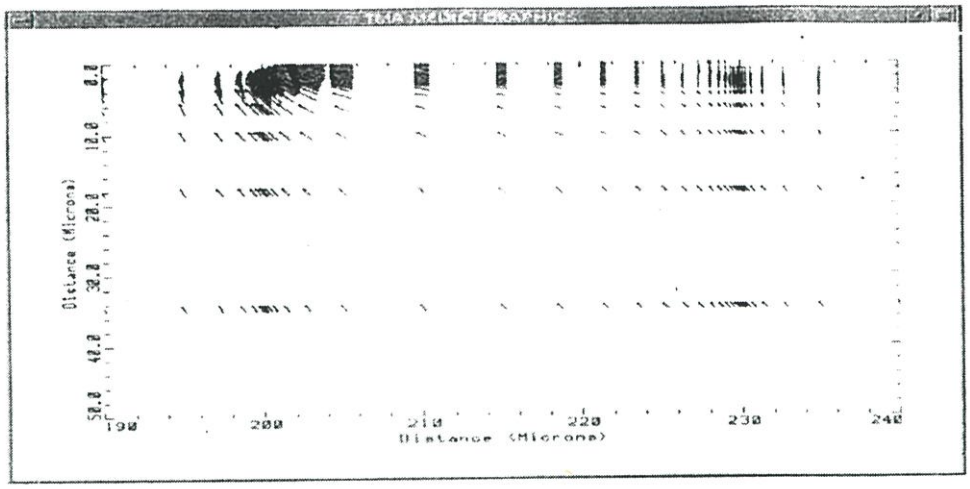


(ข)

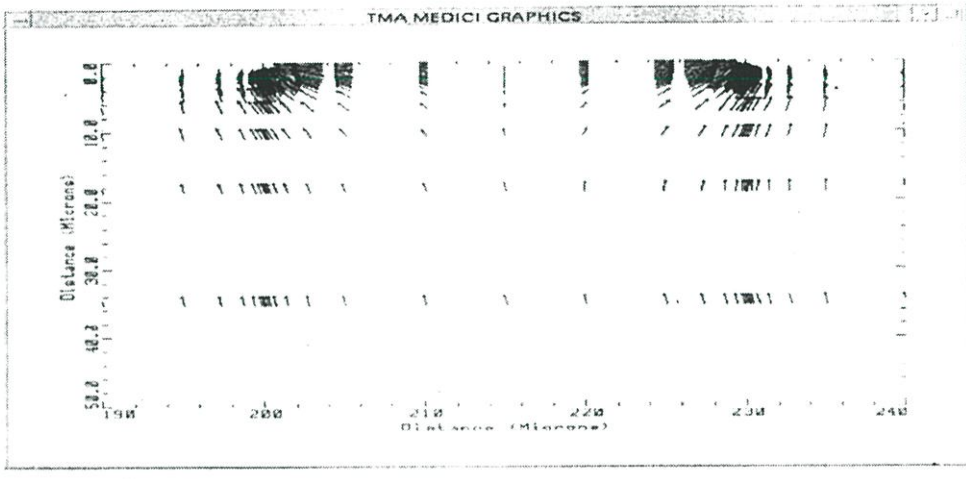
รูปที่ 3.15 กลไกที่ช่วยลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) โครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง (ข) โครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัส

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริงมีค่าลดลง รูปที่ 3.16 แสดงผลจำลองแวคเตอร์สนามไฟฟ้าระหว่างโฟโตไดโอด และการ์ดริง ภายใต้เงื่อนไขการปล่อยลอยการ์ดริง และการ์ดริงได้รับไบอัสเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้โฟโตไดโอด

นอกจากนี้หน้าที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งของการ์ดริง คือช่วยเพิ่มแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดได้ เมื่อ p^+ การ์ดริงได้รับไบอัสสามารถช่วยลดความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณใกล้ขอบเขตรอยต่อ และรอยสัมผัส โดยปกติจะเกิดการสะสมของประจุไฟฟ้าบวกบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง Si/SiO_2 เมื่อประจุไฟฟ้าบวกเหล่านี้สะสมมากพอ และสนามไฟฟ้าใต้ออกไซด์ซึ่งมีค่าสูงมากจะทำให้เกิดการพังทลายบริเวณใกล้รอยต่อได้ ขณะ p^+ การ์ดริงได้รับไบอัสย้อนกลับจะช่วยกระจายสนามไฟฟ้าให้มีบริเวณที่กว้างขึ้น และทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อลดลง ส่งผลให้โฟโตไดโอดมีแรงดันพังทลายสูงขึ้นได้



(ก)



(ข)

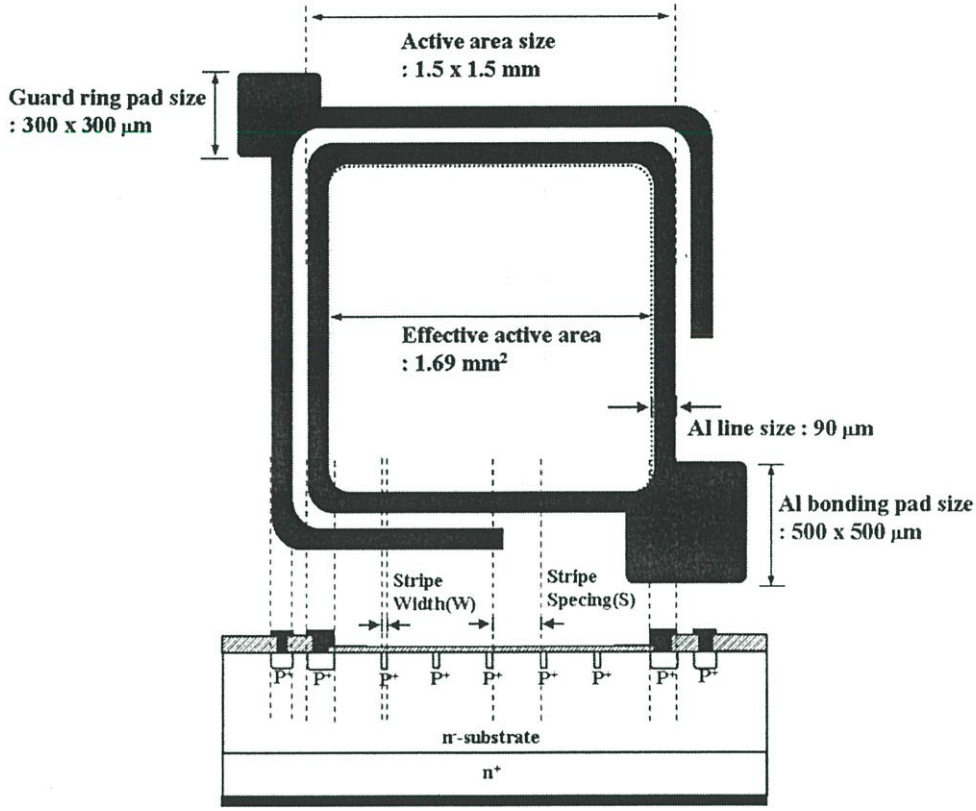
รูปที่ 3.16 ผลจำลองแวดเตอร์สนามไฟฟ้าระหว่างโฟโตไดโอด และการ์ดริง ภายใต้เงื่อนไข (ก) ปล่อยลอยการ์ดริง (ข) การ์ดริงได้รับไบอัส [18]

โดยการศึกษาการลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง ได้เปรียบเทียบขนาดกระแสมืด และกระแสแสง ระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดา กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง รวมทั้งศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของตำแหน่ง และขนาดของการ์ดริงด้วย

3.5 การออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

3.5.1 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

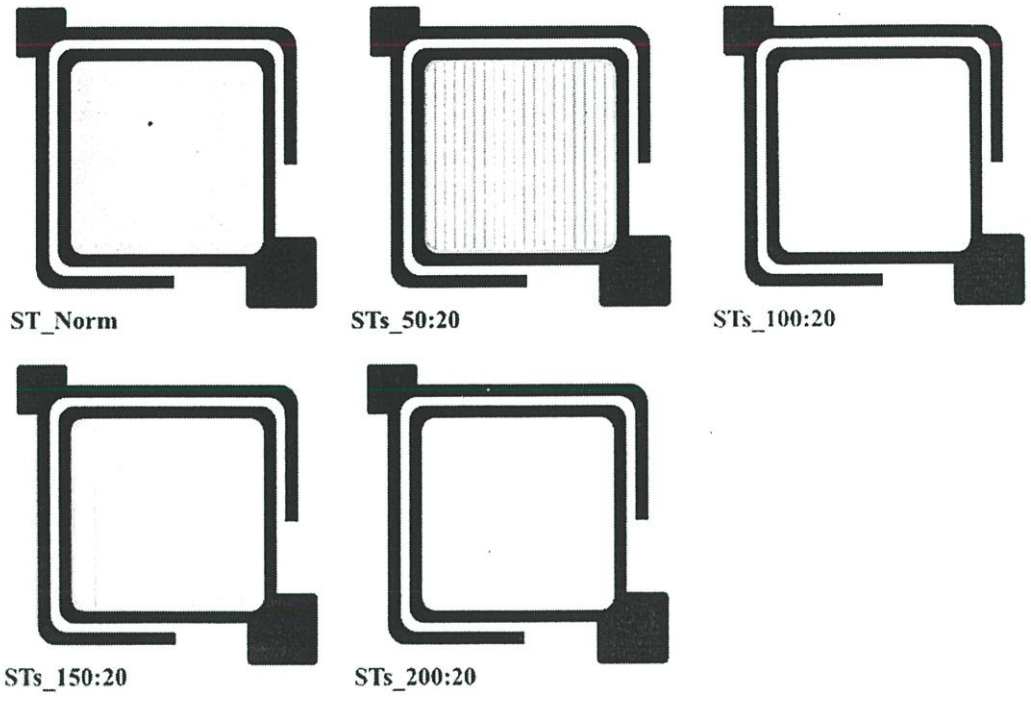
จากที่กล่าวมาแล้ว การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี และผลของความกว้างแถบชนิดพี โดยได้ออกแบบให้โฟโตไดโอดมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 มีชั้นการ์ดริงชนิดพี (p^+) ล้อมรอบเพื่อลดกระแสรั่ว [11],[18] ดังแสดงในรูปที่ 3.17 ส่วนชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating : ARC) สร้างจาก SiO_2 มีความหนาประมาณ 1000 Å ซึ่งรายละเอียดเงื่อนไขการออกแบบมีดังนี้



รูปที่ 3.17 โครงสร้างเพื่อแสดงเงื่อนไขการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

การศึกษาหาระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีที่เหมาะสม โฟโตไดโอดทุกตัวถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 เท่ากัน และชั้นรับแสงมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบนั้นมีขนาดความกว้างคงที่ (W) 20 μm และเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแถบ (S) 50, 100, 150 และ 200 μm ตามลำดับ ส่วนผลของความกว้างแถบชนิดพีโฟโตไดโอดทุกตัวถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 เท่ากัน และชั้นรับแสงมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบนั้นมีระยะห่างระหว่าง

แถบคงที่ (S) 50, 100 μm และเปลี่ยนแปลงความกว้างแถบพีมีขนาดความกว้าง (W) 20, 40 และ 80 μm ตามลำดับ ตัวอย่างลวดลายต้นแบบของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่มีเงื่อนต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3.18



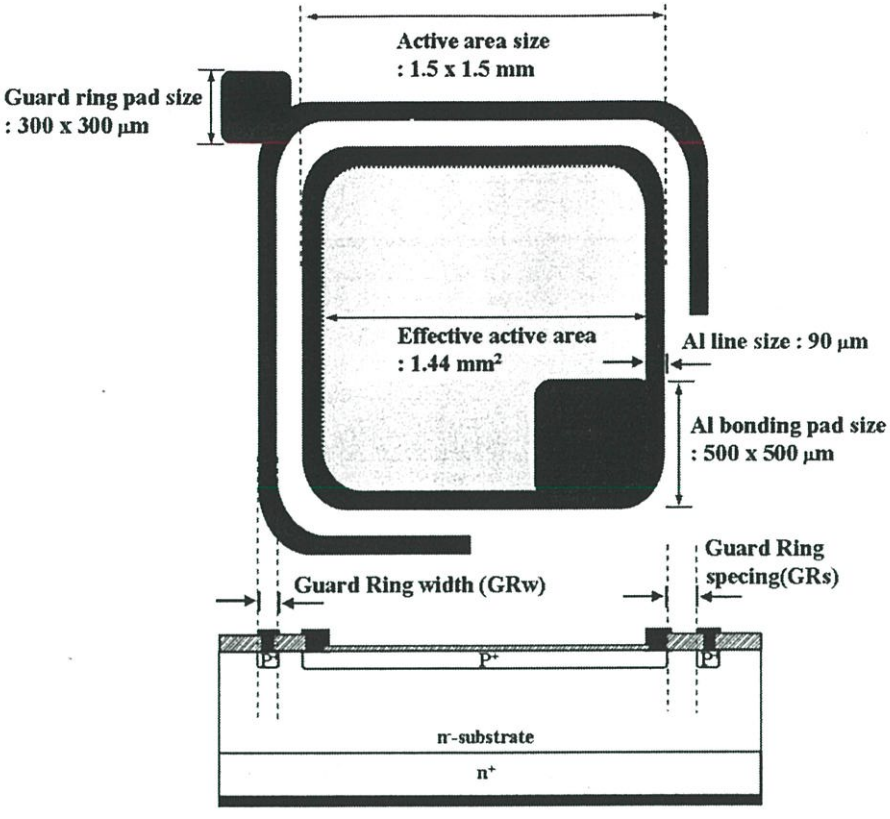
รูปที่ 3.18 ลวดลายต้นแบบของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

3.5.2 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

ในการการศึกษาผลของการ์ดริง ที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด จะแบ่งการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนคือ การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างการ์ดริงกับโฟโตไดโอด หรือตำแหน่งของการ์ดริง และผลของความกว้างการ์ดริง โดยได้ออกแบบให้โฟโตไดโอดมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 ดังแสดงในรูปที่ 3.19 ส่วนชั้นลดการสะท้อนแสงสร้างจาก SiO_2 มีความหนาประมาณ 1000 Å เหมือนกับการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งรายละเอียดเงื่อนไขการออกแบบมีดังนี้

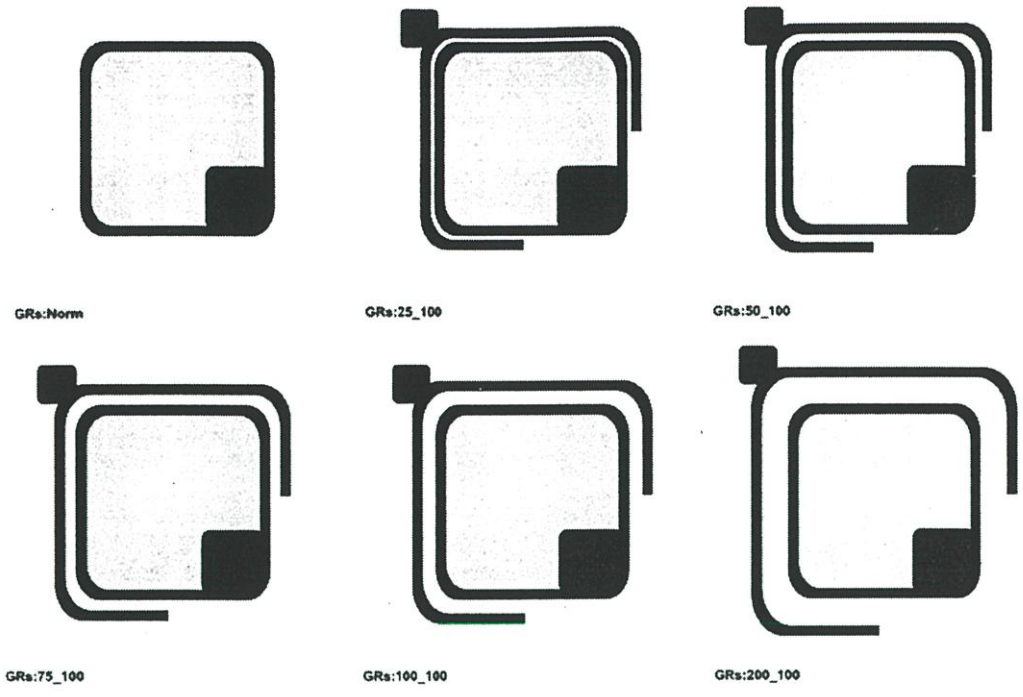
การศึกษาผลของระยะห่างระหว่างการ์ดริงกับโฟโตไดโอด ถูกออกแบบให้มีความกว้างของการ์ดริง (GR_W) เท่ากับ 100 μm และระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง (GR_S) มีค่า 25, 50 ,75 ,100 และ 200 μm ตามลำดับ ส่วนผลของความกว้างการ์ดริง โฟโตไดโอดทุกตัวถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 เท่ากัน ระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง (GR_S) คงที่ เท่ากับ 100 μm และความกว้างของการ์ดริง (GR_W) เท่ากับ 25, 50 ,75 ,100 และ 200 μm ตามลำดับ ตัวอย่าง

ลวดลายต้นแบบของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริงที่เงื่อนต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 3.20



รูปที่ 3.19 โครงสร้างเพื่อแสดงเงื่อนไขการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริง

หลังการออกแบบเงื่อนไขการศึกษาทั้ง 2 ส่วน คือ การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ และการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง เสร็จเรียบร้อยแล้ว ต่อไปจะนำเงื่อนไขการออกแบบไปสร้างกระจกต้นแบบ หรือโฟโตมาส์กเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ซึ่งรายละเอียดการออกแบบกระจกต้นแบบจะกล่าวในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 3.20 ลวดลายต้นแบบของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

3.5.3 การออกแบบลวดลาย และการสร้างโฟโตมาส์ก

การออกแบบลวดลาย ถือว่าเป็นขั้นตอนแรกในการสร้างโฟโตมาส์ก เพื่อจัดวางตำแหน่งของลวดลายให้ถูกต้อง และลวดลายที่ได้มีความเหมาะสม ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม corelDRAW Graphics Suite 12 เมื่อนำข้อมูลไฟล์ที่ออกแบบไว้ไปสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนฟิล์มแล้วนำไปติดบนกระจกใสจะทำให้ได้กระจกโฟโตมาส์กสำหรับการทดลอง

3.5.3.1 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

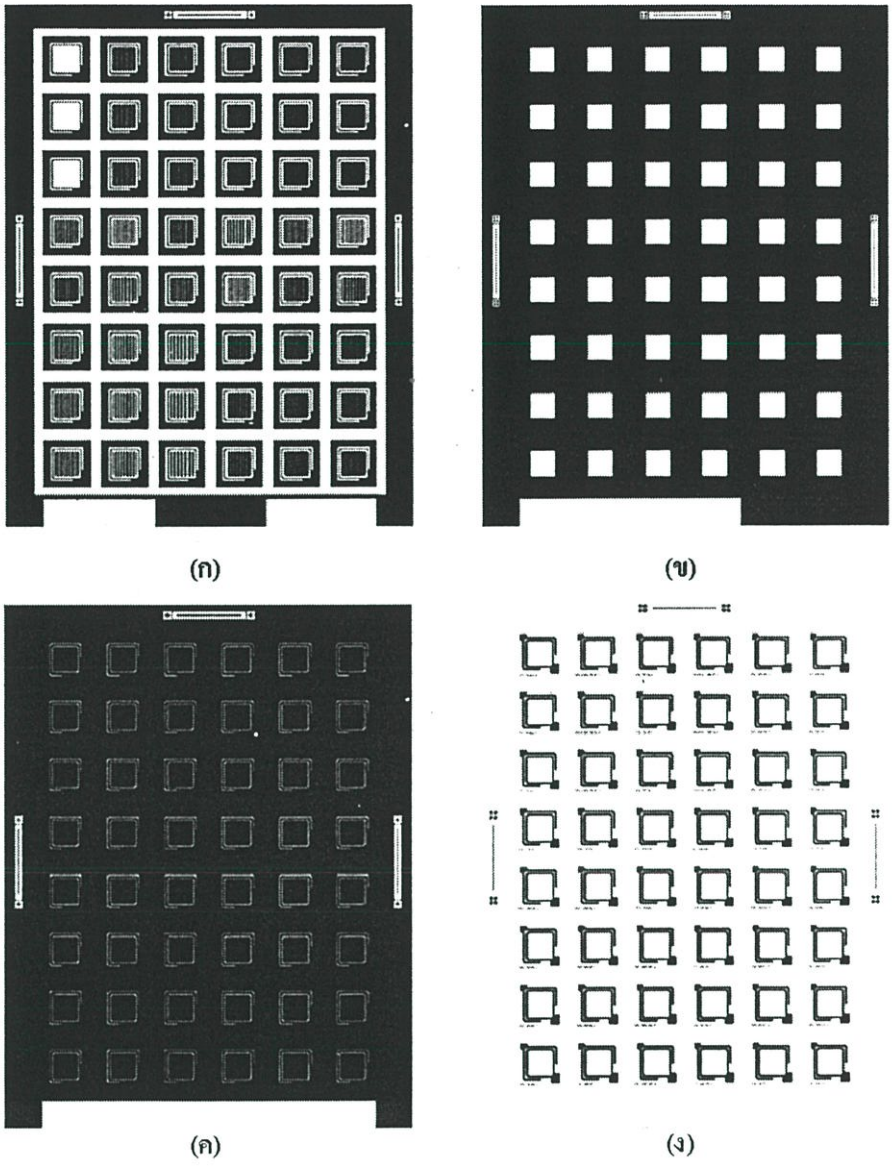
หลังการออกแบบอุปกรณ์ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ แล้วจากนั้นทำการออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบ ซึ่งในกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ จะมีกระจกต้นแบบจำนวน 4 แผ่น ด้วยกัน คือ

แผ่นที่ 1 p^+ mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพื้นที่รับแสง p^+ ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน

แผ่นที่ 2 Oxide mask ใช้ลอกชั้นออกไซด์ในพื้นที่รับแสง เพื่อสร้างออกไซด์เป็นส่วนชั้นลดการสะท้อนแสง ให้มีความหนาประมาณ 1000 Å เท่ากัน

แผ่นที่ 3 Contact mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องออกไซด์ เพื่อสร้างช่องสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ และโลหะ

แผ่นที่ 4 Metal mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างลวดลายอะลูมิเนียม สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์



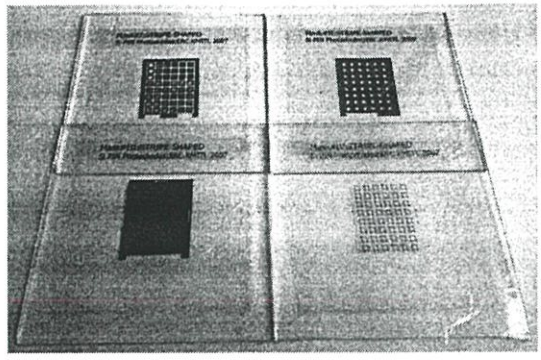
รูปที่ 3.21 ลวดลายต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

(ก) แผ่นที่ 1 p^+ mask

(ข) แผ่นที่ 2 Oxide mask

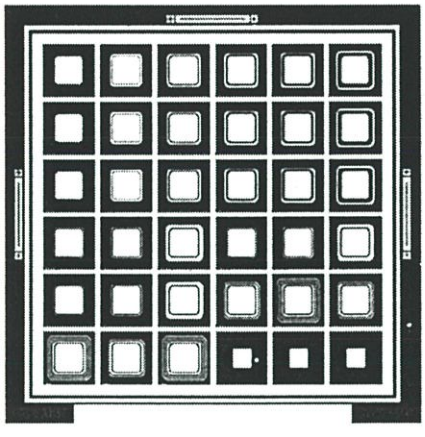
(ค) แผ่นที่ 3 Contact mask

(ง) แผ่นที่ 4 Metal mask

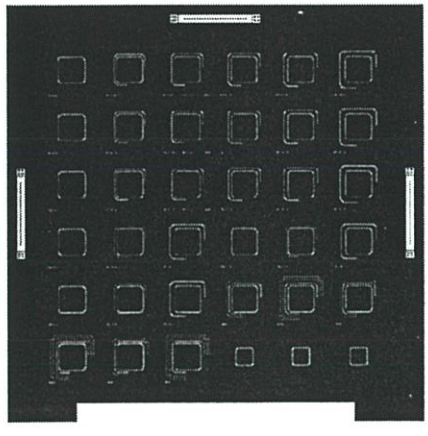


รูปที่ 3.22 กระจกต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

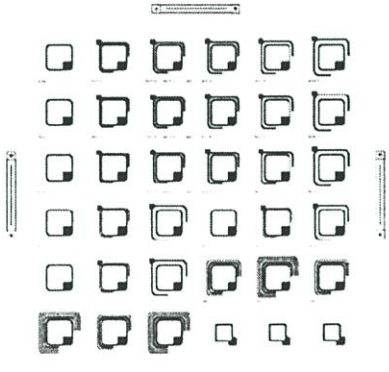
3.5.3.2 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 3.23 ลวดลายต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

(ก) แผ่นที่ 1 p^+ mask

(ข) แผ่นที่ 2 Contact mask

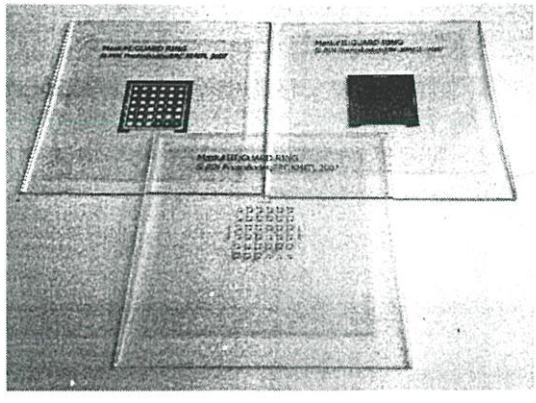
(ค) แผ่นที่ 3 Metal mask

ในกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง จะมีกระจกต้นแบบจำนวน 3 แผ่น ด้วยกัน คือ

แผ่นที่ 1 p^+ mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพื้นที่รับแสง p^+ ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน

แผ่นที่ 2 Contact mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องออกไซด์ เพื่อสร้างช่องสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ และโลหะ

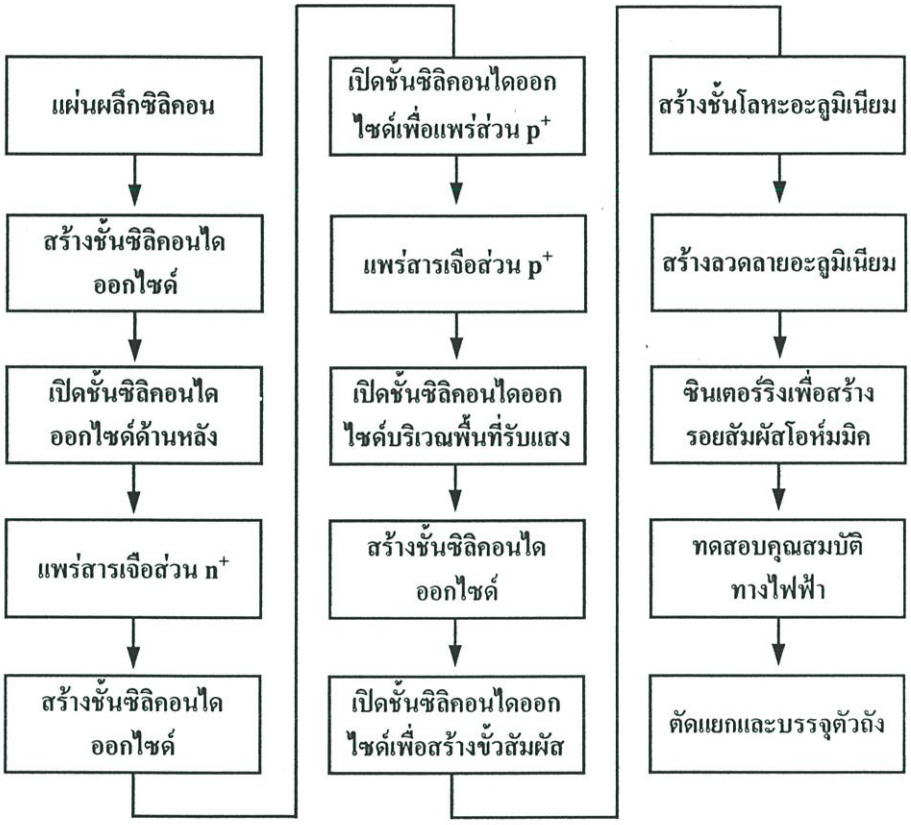
แผ่นที่ 3 Metal mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างลวดลายอะลูมิเนียม สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์



รูปที่ 3.24 กระจกต้นแบบการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

บทที่ 4
เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง

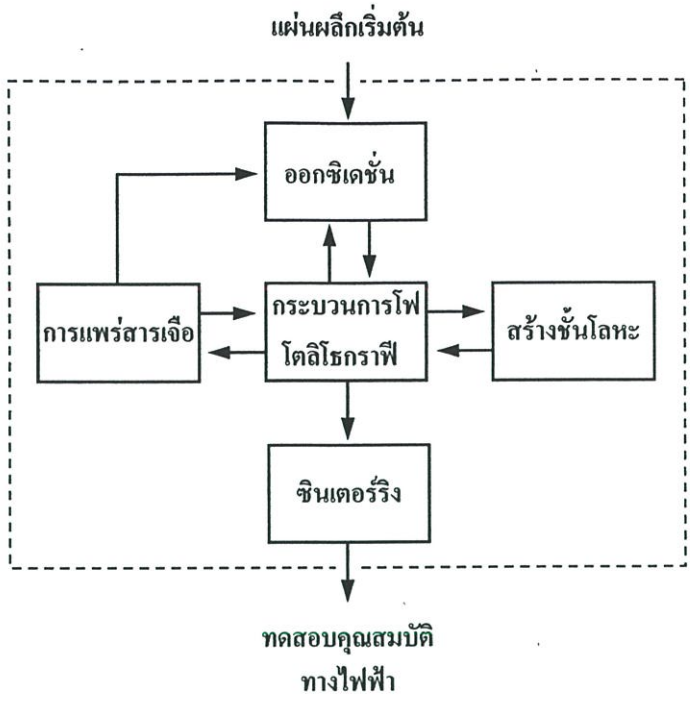
ในบทนี้เป็นการแสดงถึงเทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง เพื่อศึกษาคุณสมบัติการทำงาน และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่เป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด ซึ่งขั้นตอนทั้งหมดแสดงดังแผนภูมิ รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภูมิกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

4.1 เทคโนโลยีการสร้าง

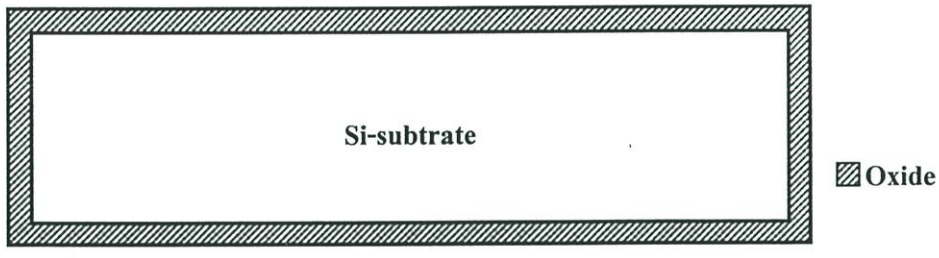
กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ ออกซิเดชั่น กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี การแพร่สารเจือ สร้างชั้นโลหะ และซินเตอร์ริ่ง ดังแสดงในรูปที่ 4.2 ซึ่งรายละเอียดแต่ละกระบวนการจะกล่าวต่อไป



รูปที่ 4.2 กระบวนการสร้างประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน

4.1.1 กระบวนการออกซิเดชั่น

ภายหลังจากขั้นตอนการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ขึ้นปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่น ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาคตัดขวางของแผ่นซิลิคอน ที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชั่น

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่าง คือ เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ (diffusion mask) ใช้ขั้นตอนการแพร่ชั้นสารเจือ และเพื่อป้องกันผิวหน้าแผ่นซิลิคอนเพื่อป้องกันอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ชั้นซิลิคอนได ออกไซด์ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว โดยทั่วไปจะมีความหนาอยู่ในช่วง 5,000 - 10,000 Å กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์หนานี้จะเรียกว่า กระบวนการออกซิเดชั่นด้วยความร้อน (thermal

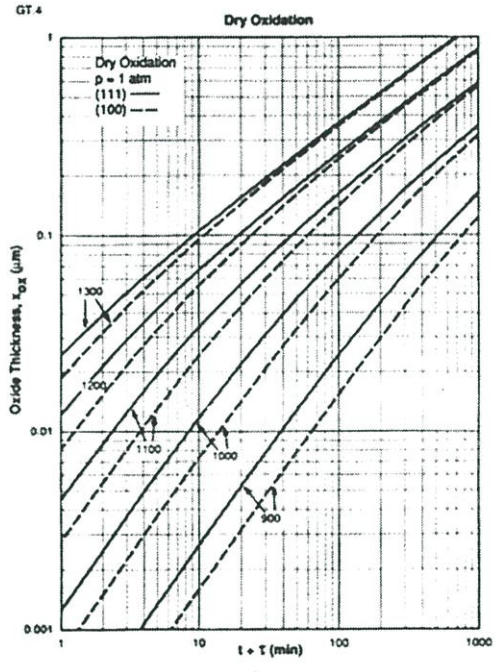
oxidation process) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกริยากับอ๊อกซิเจน (O_2) หรือบรรยากาศที่มีไอน้ำ (O_2+$H_2$0) ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 900 ถึง 1,150 °C ปฏิกริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าซิลิคอน เป็นดังนี้

1. ปฏิกริยาแบบแห้ง : $Si + O_2$----------> SiO_2 (4.1)

2. ปฏิกริยาแบบชื้น : $Si + 2H_2O$---------> $Si0_2 + 2H_2$ (4.2)

กระบวนการออกซิเดชั่นด้วยความร้อน ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

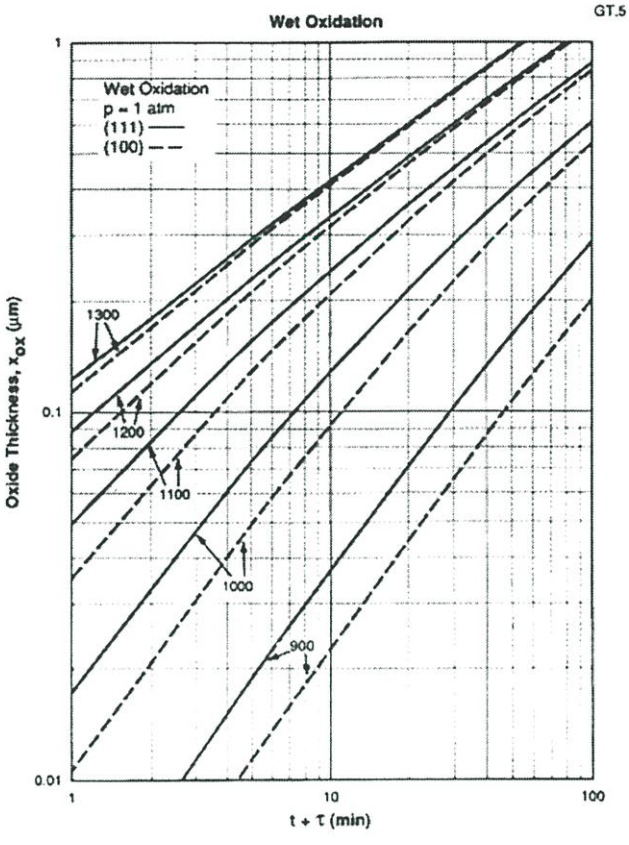
1. การออกซิเดชั่นแบบแห้ง(Dry Oxidation) เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นเจือปน ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 900 ถึง 1,150 °C จะทำให้อุณหภูมิของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ดังในสมการที่(4.1) ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้โดยวิธีดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์กับเวลาในการอ๊อกซิเดชั่น ในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบแห้ง

2. การออกซิเดชั่นแบบชื้น(Wet Oxidation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงในสมการที่ (4.2) อัตราการเกิดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นจะเร็วกว่าอัตราการเกิดที่ได้จากกระบวนการแบบแห้งถึง 4 เท่า เนื่องจากขนาดของโมเลกุลน้ำเล็กกว่าของโมเลกุลออกซิเจนครึ่งหนึ่ง ดังนั้น อัตรา

การแพร่ของ โมเลกุลน้ำไปยังชั้น SiO_2 จึงมากกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจน แม้ว่าอัตราการเกิดออกไซด์ด้วยโมเลกุลน้ำจะมากกว่าออกซิเจน แต่ออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของโครงสร้างออกไซด์สูงกว่าแบบชื้น กระบวนการออกซิเดชั่นทั่วๆ ไปจะใช้ "แห้ง-ชื้น-แห้ง" โดยเริ่มต้นการสร้างชั้นออกไซด์แบบแห้ง จากนั้นจึงสร้างชั้นออกไซด์แบบชื้นเพื่อให้ชั้นออกไซด์หนาขึ้น เนื่องจากการสร้างชั้นออกไซด์แบบชื้นจะสร้างได้เร็วกว่า และสร้างชั้นออกไซด์แบบแห้งเป็นขั้นตอนสุดท้ายสำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์แบบชื้น สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ของความหนาออกไซด์กับเวลาในการอ๊อกซิเดชั่นในการสร้างออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบชื้น

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการสร้างการออกซิเดชั่นด้วยความร้อน มีดังต่อไปนี้

1. การลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติก่อนการสร้างออกไซด์
2. ล้างด้วยน้ำ DI แล้วเป่าแห้งด้วย N_2
3. ปรับอุณหภูมิเตาแพร่ให้คงที่ (อุณหภูมิตามต้องการ)
4. นำแผ่นผลึกซิลิคอนวางบน Boat แล้วนำไปวางไว้ที่ปากท่อควอทซ์ 5 นาที
5. ดัน Boat เข้าไปในส่วนกลางท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที

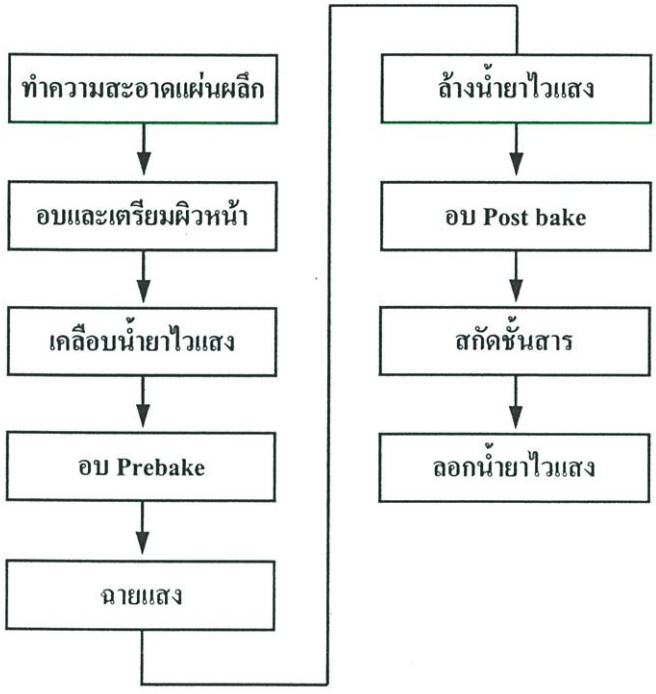
6. ทำการออกซิเดชั่นตามวิธีที่ต้องการ

7. ดึง Boat ออกจากท่อควอทซ์อย่างช้าๆ 5 นาที

8. ทิ้งแผ่นผลึกไว้ปากท่อควอทซ์ 5 นาที

หลังจากกระบวนการออกซิเดชั่นแล้ว จะได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่นผลึกซิลิคอน ต่อจากนั้นทำการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือในบริเวณที่กำหนด

4.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี



รูปที่ 4.6. ขั้นตอนขบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ภายหลังการออกซิเดชั่นแผ่นผลึกซิลิคอนแล้ว ชั้นของ SiO_2 จะเคลือบผิวซิลิคอนทั้งหมด เพื่อป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในเนื้อซิลิคอน ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่างๆ จึงจำเป็นต้องเปิดช่องออกไซด์ออก ซึ่งเรียกว่า กระบวนการทางแสง (photolithography) โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการเปิดช่องออกไซด์หลายครั้ง ขบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากมาส์คไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิ คอน ซึ่งขั้นตอนพื้นฐานของขบวนการนี้ดังแสดงในรูปที่ 4.6

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีต้องการห้องสะอาดสำหรับปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิคอน ในขั้น ตอนน้ำยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสีย

หายขึ้นที่ลวด ลายที่ถ่ายแบบลงไป ดั้งนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับขบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยขั้นตอนของโฟโตลิโธกราฟีเริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิคอน ซึ่งมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบน ไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกลวดลายต้นแบบ ที่เรียกว่าโฟโต้มาส์ค (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ซึ่งได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาส์คจะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมีแสงที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนยังคงเหลืออยู่บนผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกสกัด หลังจากนั้นเมื่อชั้นน้ำยาไวแสงถูกลอกออกก็จะปรากฏภาพหรือลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเหมือนลวดลายบนกระจกต้นแบบ การเกิดลวดลายได้ก็เพราะชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนถูกสกัดออกไปนั่นเอง

ลำดับขั้นตอนของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มีดังต่อไปนี้

1. อบแผ่นผลึกในเตาอบความร้อน อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง
2. ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นผลึกโดยใช้เครื่อง Spinner ที่ 3000 rpm สำหรับ AZ 1350J ประมาณ 30 วินาที
3. Prebrake ด้วยการอบแผ่นในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 อาศาเซลเซียส ประมาณ 30 นาที
4. นำแผ่นไปทำการ Mask Alignment และฉายแสง (Expose) ประมาณ 7 วินาที
5. Development ของ AZ 1350J ให้จุ่มลงใน AZ Developer I และ II อย่างละ 1 นาที แล้วล้างด้วยน้ำ DI
6. เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
7. Postbrake ในเตาอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นานประมาณ 20 นาที แล้วนำออกมาเคลือบสารไวแสงด้านหลังเพื่อป้องกันการกัดออกไซด์ด้านหลังด้วย AZ 1350J จากนั้นอบต่ออีก 10 นาที
8. Etching ด้วย Buffer (HF : NH4F = 1 : 6) ซึ่งมีอัตราการกัดประมาณ 1000 อังสตรอมต่อนาที จนกระทั่งชั้นออกไซด์ถูกกัดออกจนหมด
9. ล้างด้วยน้ำ DI แล้ว เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
10. ล้าง AZ 1350J ออกโดยจุ่มลงใน Acetone แล้วล้างด้วยน้ำ DI
11. ล้างน้ำ DI 10 นาที 2-3 ครั้ง
12. เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

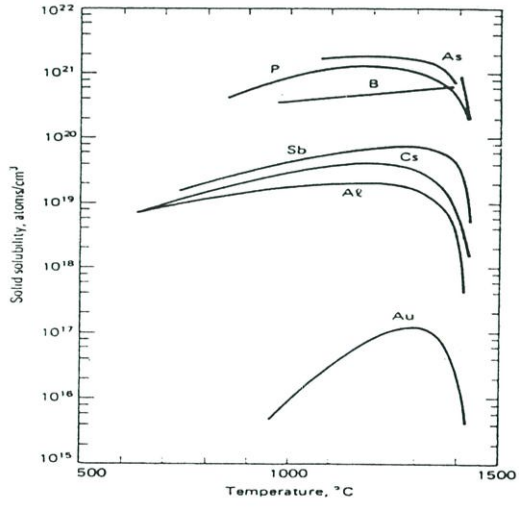
4.1.3 กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นกระบวนการแพร่สารเจือลงในแผ่นฐานรอง ด้วยวิธีการแพร่ที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรอง และถ้าความเข้มข้นอะตอมของสารเจือสูงกว่าของแผ่นฐานรอง ทำให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น

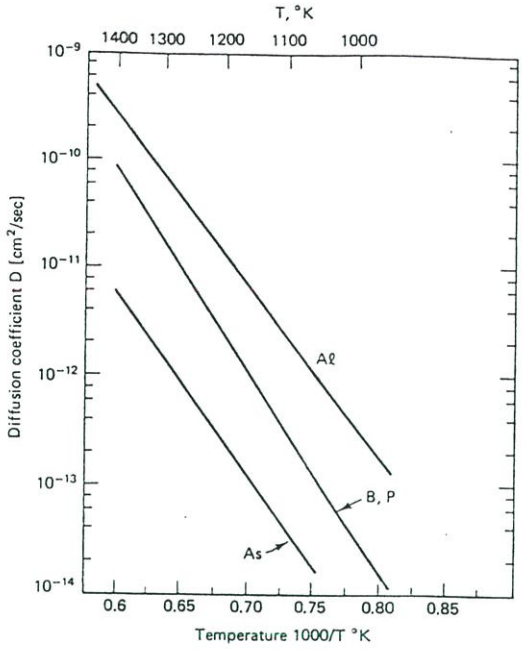
ขั้นตอนของการแพร่สารเจือ ทำโดยการกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือโบรอน (Boron source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพี และใช้ฟอสฟอรัส ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปยังบรรยากาศของสารเจือ อะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นฐานรอง และแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ความเข้มข้นของบรรยากาศอะตอม ความดัน อุณหภูมิ ตลอดจนระยะเวลาที่ใช้ในการแพร่ มีอิทธิพลต่อความลึกและความเข้มข้นของการแพร่ สำหรับเทคนิคการแพร่สารเจือกระทำสองขั้นตอน ทั้งนี้ก็เพื่อง่ายต่อการควบคุม และแก้ไขให้การกระจายของสารเจือเป็นไปตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพโดยที่

ขั้นที่ 1 การแพร่สารเจือขั้นต้น (Pre-deposition)

กระบวนการ pre-depostion กระทำโดยการแพร่สารเจือในเงื่อนไขที่ว่าปริมาณจำนวนอะตอมของสาร เจือที่ผิวมีค่าคงที่ตลอดไปไม่จำกัด การแพร่ชั้นนี้ทำให้ช่วงเวลาสั้นๆ และอุณหภูมิไม่สูงนักราว 1000 ^{0}C การแพร่สารเจือขั้นต้นในอุณหภูมิสูง เป็นการควบคุมปริมาณสารเจือ โดยการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพร่สารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆจะมีปริมาณสารเจือสูงสุดในการแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพร่เข้าในของแข็ง (solid solubility) และปริมาณสารเจือที่ผิวผลึกฐานรอง จะเรียกว่า ความเข้มข้นผิว (surface concen- tration: N_S) โดยความสัมพันธ์ของค่า solid solubility กับอุณหภูมิในการแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 4.7

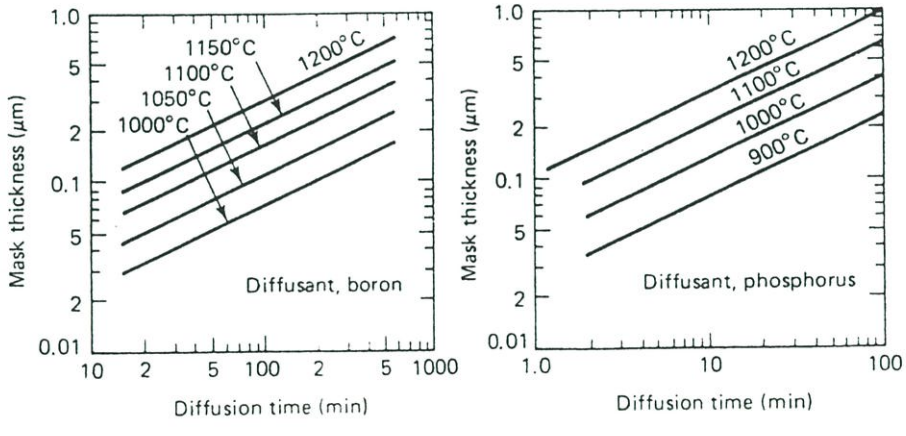


รูปที่ 4.7 ค่า solid solubility ของธาตุต่างๆในซิลิคอน



รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ

สำหรับความสามารถในการแพร่ของสารเจือ เช่น As, P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นหน้ากาก (mask) เพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของผลึกฐานรอง โดยความหนาของชั้นซิลิคอนได ออกไซด์ที่ใช้พิจารณาจากอุณหภูมิ เวลา และสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 ความหนาของชั้น SiO_2 ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส

การกระจายอะตอมสารเจือในผลึกฐานรองซิลิคอน แสดงดังสมการ 4.3

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

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

x คือ ระยะลึกของการแพร่สารเจือจากผิว (cm)

D_p คือ ความสามารถในการแพร่ที่อุณหภูมิการแพร่ขั้นต้น (cm^2/sec)

t_p คือ เวลาที่ใช้ในการแพร่ขั้นต้น (sec)

การหาค่าความเข้มข้น $N(x,t)$ ที่ความลึก x ภายหลังการแพร่ขั้นต้นเป็นเวลา t_p ต้องแทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการ (4.3) สิ่งที่สำคัญ 2 ประการในการแพร่ขั้นต้น คือ ความลึกรอยต่อพี-เอ็น (X_j) ที่ได้จากการแพร่ขั้นต้น และจำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด (Q) ภายหลังการแพร่ ซึ่ง

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

ขั้นที่ 2 เรียกว่า กระบวนการ drive in

ในขั้นนี้จำนวนอะตอมสารเจือที่ผิวจะถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด (คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน เนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1) การแพร่ขั้นนี้ทำที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรกราว 1200 ^{0}C และสามารถควบคุมการกระจาย และความลึกในการแพร่ของสารโดยควบคุมเวลาในการแพร่ นอกจากนี้ขณะที่ทำการแพร่ก็จะทำการออกซิเดชั่นไปพร้อม ๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดชั้นของออกไซด์เคลือบที่ผิวนอกสุดของแผ่นผลึก ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือแพร่ออกมาจากแผ่นผลึก (out diffusion) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิคอน แสดงได้ดังสมการ

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

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

D_d คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในการขับลึก

t_d คือ เวลาที่ใช้ในการขับลึก

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

$$X_j = \sqrt{4D_d t_d}\ \ln\left[Q/\left(N_B\sqrt{\pi D_d t_d}\right)\right] \qquad \text{(cm)} \qquad (4.4)$$

การคำนวณโดยอาศัยสมการการแพร่ จำเป็นต้องพิจารณา และเลือกใช้ให้ถูกกรณี ในกรณีการแพร่ขั้นที่ 1 เงื่อนไขขอบเขตต่างๆ เป็นไปตาม The Complementary Error Function distribution การคำนวณหาการกระจายของอะตอมสารเจือ และในกรณีการแพร่ขั้นที่ 2 เงื่อนไขขอบเขตเป็นไปตามลักษณะของ Gaussian Distribution

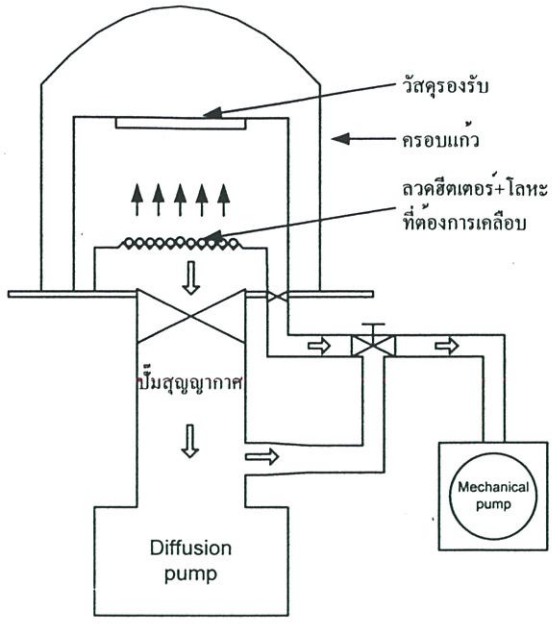
3.1.4 กระบวนการเมตัลไลเซชั่น

ภายหลังจากสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนตามลำดับขั้นตอนต่างๆจนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่างๆของอุปกรณ์ แต่ส่วนต่างๆของอุปกรณ์เหล่านี้จะยังคงแยกกันอยู่ในสภาพที่ยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์เข้าด้วยกันตามรูปแบบโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทำงานตามหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนการเชื่อมต่อส่วนต่างๆของอุปกรณ์ด้วยโลหะเรียกว่า กระบวนการเมตัลไลเซชั่น ซึ่งกระบวนการนี้สามารถสร้างรอยต่อโอห์มมิค (ohmic contact) ซึ่งเป็นแถบโลหะที่ใช้ในการต่อขั้วไฟฟ้า

สำหรับการเลือกโลหะที่ใช้เคลือบบนแผ่นซิลิคอน เพื่อให้เป็นรอยสัมผัสโอห์มมิคหรือแถบความนำต่อเชื่อมภายใน (Interconnector) ของวงจรรวม ควรมีคุณสมบัติ เช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีค่าความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำภายนอกได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ทอง (Au) และเงิน (Ag) เป็นต้น

ตารางที่ 4.1 จุดหลอมเหลว (Melting Points) และสภาพความต้านทาน (Resistivities)

โลหะ	จุดหลอมเหลว (^{0}C)	สภาพความต้านทาน ($\mu\Omega$-cm)
Al	660	2.7
Cr	1878	12
Mo	2615	5.7
Ti	1670	41.2
W	3417	5.6



รูปที่ 4.10 โครงสร้างของเครื่อง Filament Evaporator

เทคนิคในกระบวนการเมตัลไลเซชั่น ใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศ ซึ่งมีเทคนิคหลายอย่างด้วยกัน แต่ในงานวิจัยนี้ใช้เทคนิคการระเหยด้วยไส้ความร้อน (Filament Evaporation) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลของการแพร่กระจายอิออน

กระบวนการเมตัลไลเซชั่นในระบบสุญญากาศ ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 Chamber ที่ได้แสดงไว้เป็นครอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ (Bell Jar) การเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ โดยใช้ Filament Evaporation เมื่อไส้ถูกทำให้ร้อนโดยการผ่านกระแสไฟฟ้าจำนวนมากไหลผ่าน โดยในขณะทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านไส้ เพิ่มขึ้นทีละน้อยๆ จนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะละเหยเป็นไอฟุ้งกระจาย เคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางใน Chamber

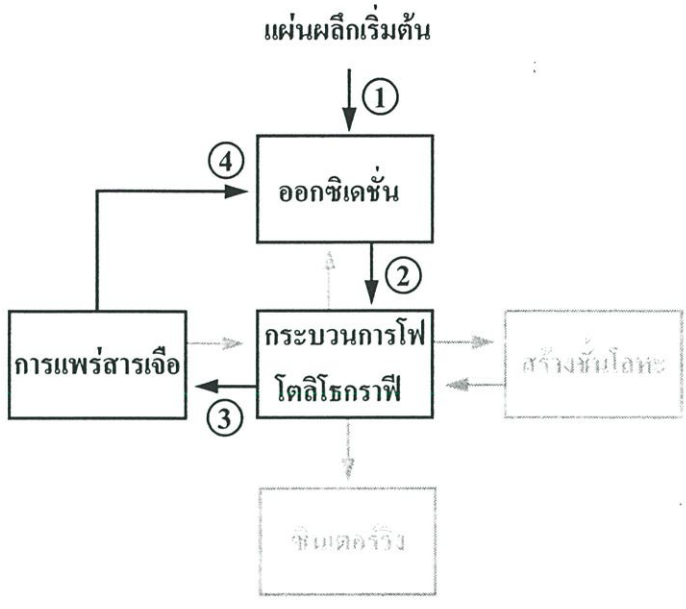
4.1.5 กระบวนการซินเตอร์ริง

หลังจากทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียม และทำการโฟโตลีโธกราฟีแล้วอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มิคแต่รอยสัมผัสนี้อาจจะไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นกระบวนการอัลลอยจะช่วยให้รอยต่อสัมผัสระหว่างโลหะอะลูมิเนียม และซิลิคอนเป็นรอยต่อที่สม บูรณ์ การอัลลอยจะทำในเตาแพร่สารที่ตั้งอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 450-550 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาประมาณ 10-30 นาที ถ้าในขณะอัลลอยปล่อยก๊าซซึ่งมีไฮโดรเจนรวมอยู่ด้วยเข้าไป เรียกว่า การซินเตอร์ริง เป็นเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประ ดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดี และไม่เปลี่ยนง่ายต่อสภาพแวดล้อม

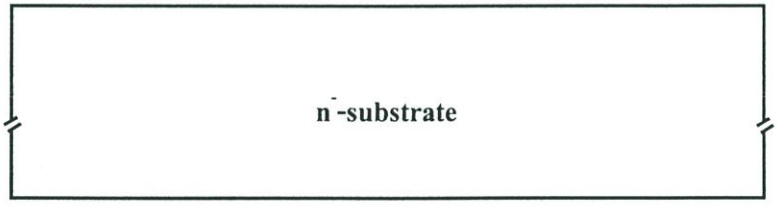
4.2 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

4.2.1 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

4.2.1.1 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น



แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรองของโฟโตไดโอดได้แก่ แผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิค (i-type) ที่มีสภาพต้านทาน 2000 Ω.cm ระนาบ (111) หนาประมาณ 650 ไมโครเมตร



การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละอองเศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็น

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อัลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำ DI (de-ionization water : DI) เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N_2)
- ต้มในกรดไนตริก (HNO_3) เวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที

- ต้มในน้ำ DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เวลา 10 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

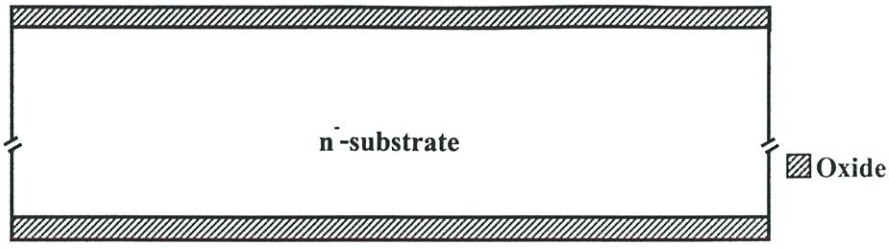
การลอกออกไซด์ (slice etching) ที่เกิดตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค (HF) 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

1. ออกซิเดชั่น (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าขอแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกระบวนการออกซิเดชั่น เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ ใช้อุณหภูมิเตา 1,000°C อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 7,000 Å

Oxidation

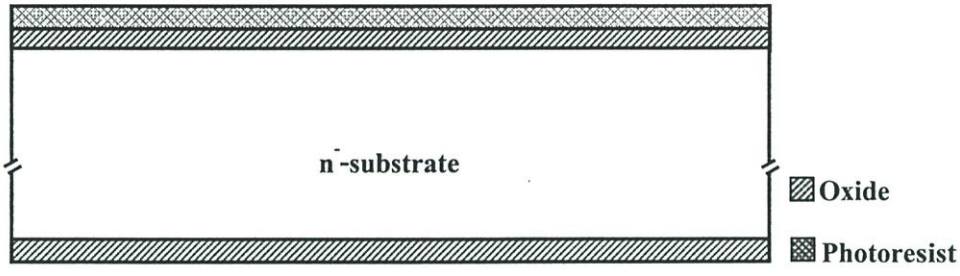
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง



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

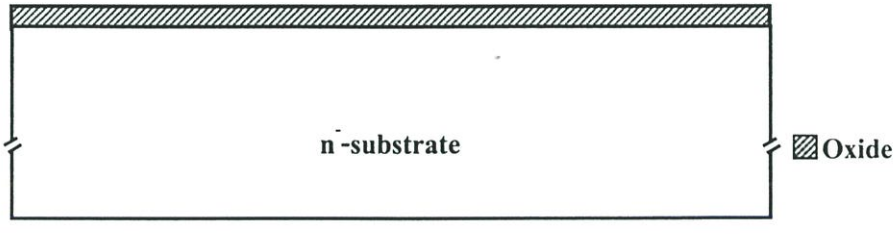
อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที

- ทาน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching)

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



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติก่อนทำการแพร่สารเจือ

จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค 10% เวลา 10 วินาที

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

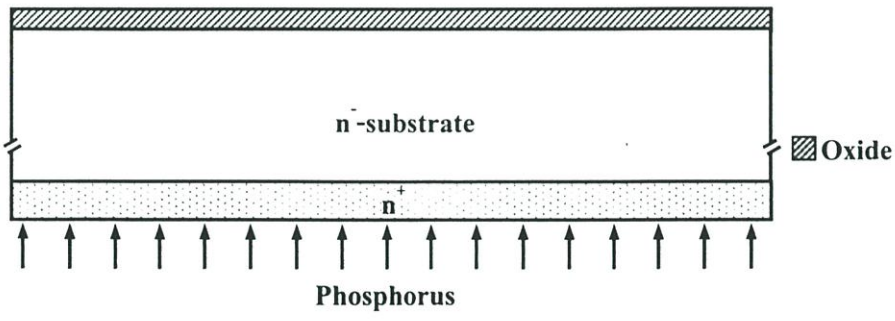
3. การสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+ layer) ของโฟโตไดโอดโดยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นสูง

กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150°C เวลา 10 นาที
- Phosphorus pre-deposition ที่ 1,000°C N_2 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือฟอสฟอรัสที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริคสำหรับฟอสฟอรัส (HF for Phosphorus) 10%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์หนาบริเวณด้านหน้าออก เตรียมทำการสร้างออกไซด์ขึ้นใหม่พร้อมกับการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for phosphorus อัตราส่วน HF47%:6NH_4F)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

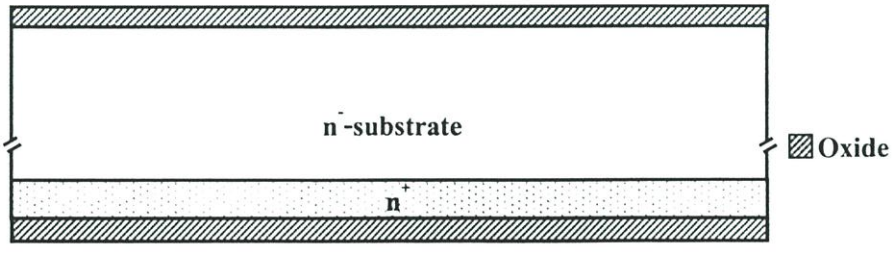
การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

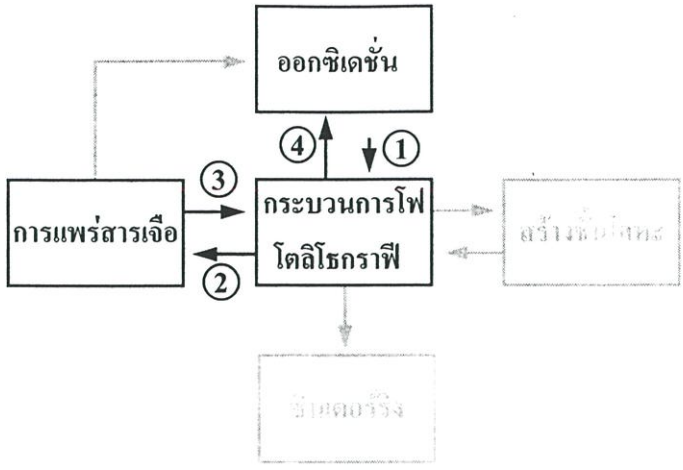
4. การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือโบรอนในขณะสร้างรอยต่อพี-เอ็นและเป็นการขับลึก (drive-in) อะตอมฟอสฟอรัสด้านหลังไปในตัวด้วย ใช้อุณหภูมิเตา 1,000°C อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 7,000 Å

Oxidation

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 3 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง



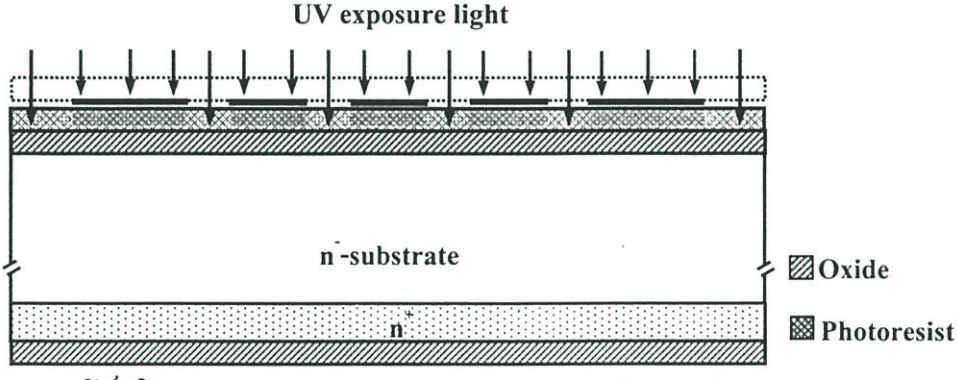
4.2.1.2 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นพีที่เข้มข้น



1. การเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอด ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโตเอตชิงค์ โดยใช้มาสก์ชิ้นที่ 1 เรียกว่า P^+-region Mask

Photolithography Mask#1 (p^+-region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง (Alignment expose)



Develop ฟิล์มโดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2

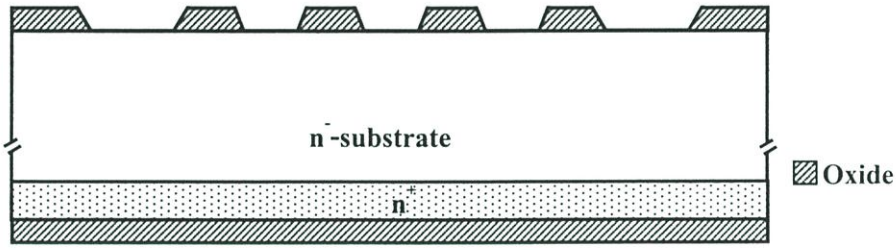
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับการแพร่สารเจือ

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

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติก่อนการสร้างรอยต่อพี-เอ็น

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. การสร้างรอยต่อพี-เอ็น ที่เป็นพื้นที่รับแสงของของโฟโตไดโอดโดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน เข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดเอ็น ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตร

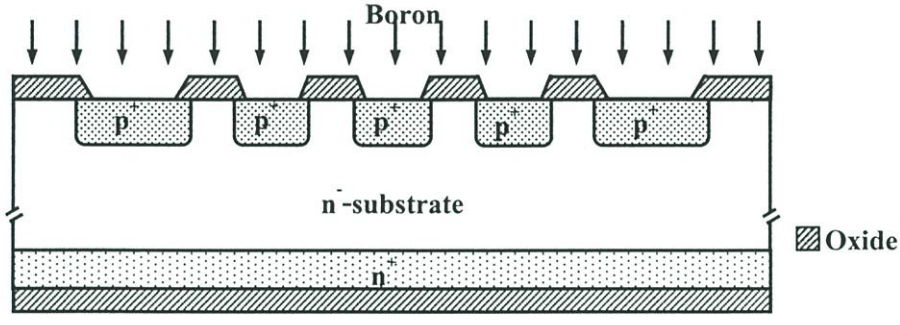
กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือโบรอน ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150°C เวลา 10 นาที
- Boron pre-deposition ที่ 1,000°C N_2 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที

การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือโบรอนที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริคสำหรับโบรอน 10%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

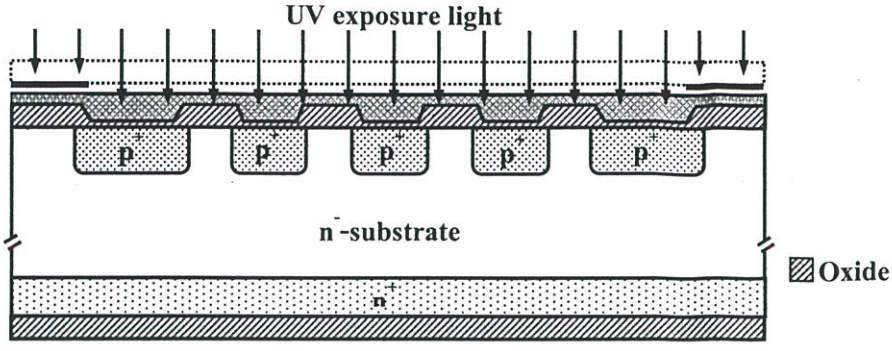
กระบวนการ Drive-in เพื่อขับลึกให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็น



3. การเปิดชั้นออกไซด์ เป็นการลอกชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ของรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของของโฟโตไดโอด ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์ชิ้นที่ 2 เรียกว่า Oxide Mask

Photolithography Mask#2 (Oxide)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง

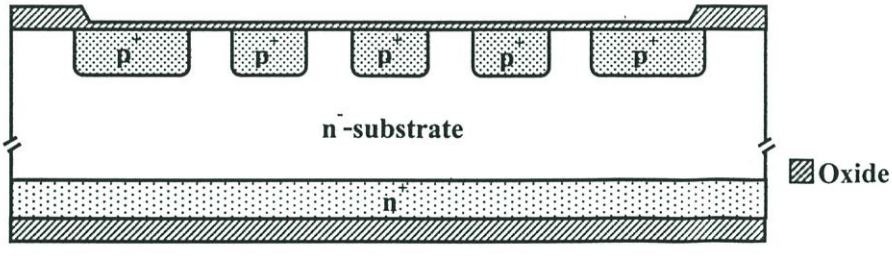


Develop ฟิล์มโดย

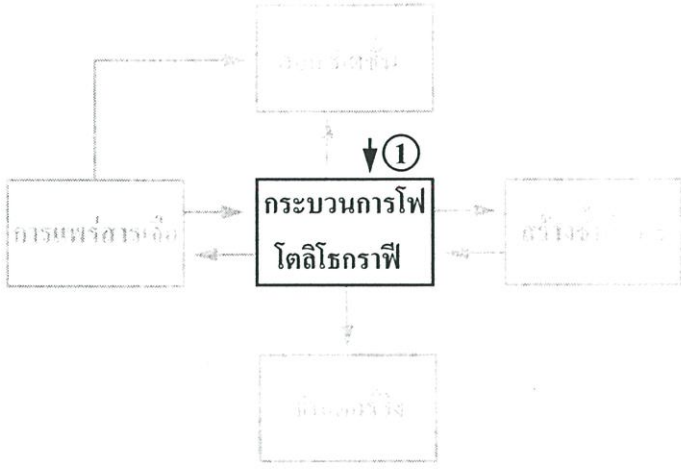
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที (Post bake)

4. การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม

- Oxidation ที่ 1,000°C O_2 1,200°C cc./min. (Dry), O_2 1,000 cc./min. (Wet)



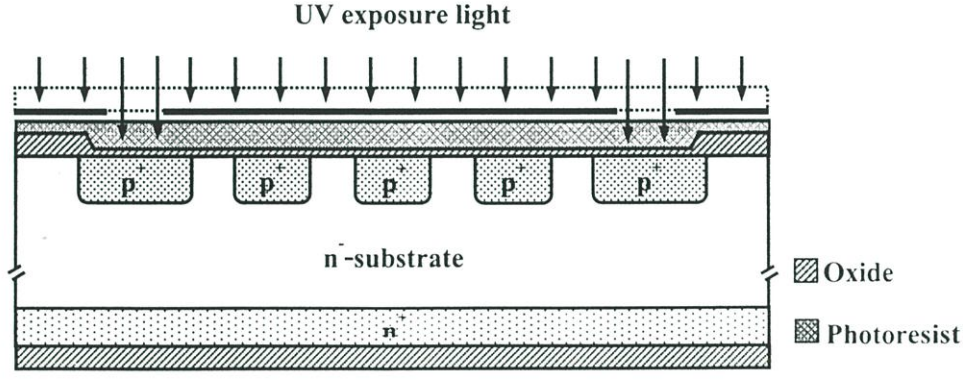
4.2.1.3. กระบวนการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส



1. การเปิดช่องออกไซด์ เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณที่เป็นส่วนขั้วสัมผัส (contact) ของรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของของโฟโตไดโอด ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้ โฟโตมาสก์ชิ้นที่ 3 เรียกว่า Contact Mask

Photolithography Mask#3 (Contact)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง



Develop ฟิล์มโดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที (Post bake)

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ บริเวณด้านหน้าที่มีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม และเนื่องจากออกไซด์บริเวณด้านหลังต้องลอกออกเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอยู่แล้วจึงไม่ได้ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหลัง

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

กระบวนการลอกฟิล์ม

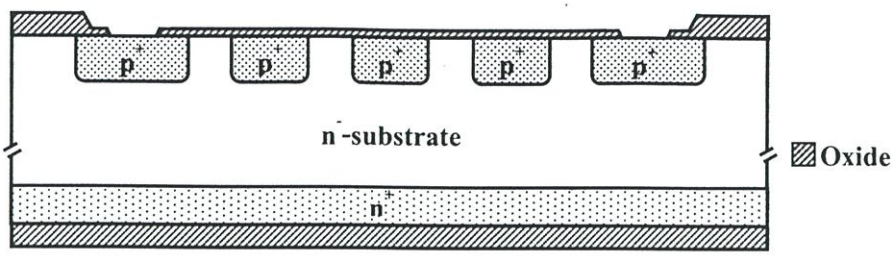
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้า

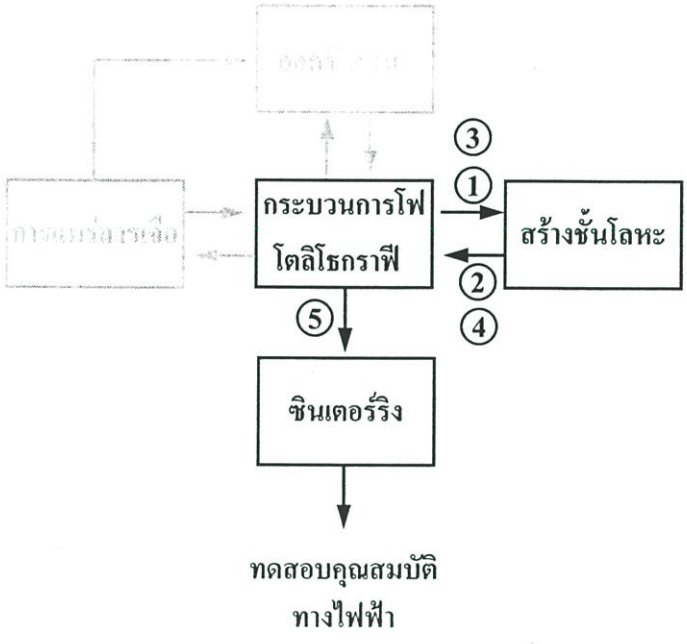
- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติก่อนการเคลือบชั้นโลหะ

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริคสำหรับโบรอน 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



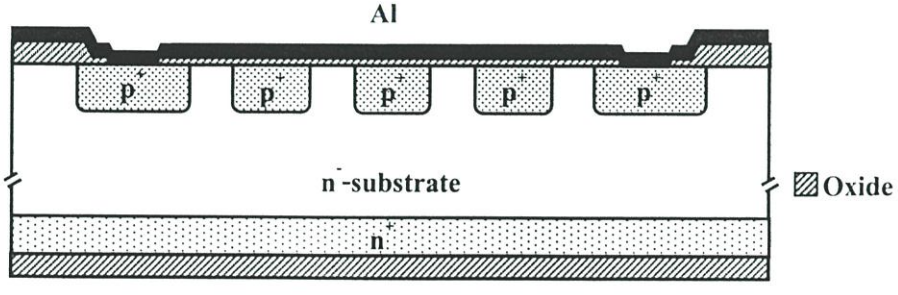
4.2.1.4 กระบวนการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมและขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิค



1. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) อะลูมิเนียมขึ้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีความหนาราว 1 ไมโครเมตร เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

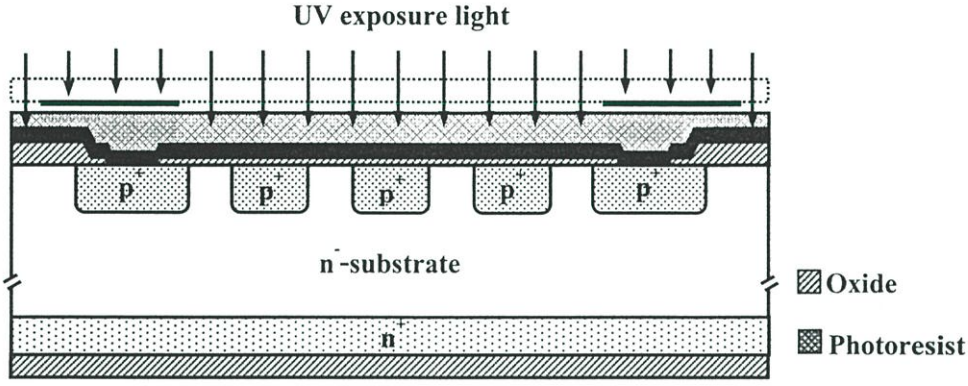
ทำการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



2. การสร้างลวดลายอะลูมิเนียม เป็นการสกัดชั้นของอะลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชิ้นที่ 4 และเรียกว่า Metal Mask

กระบวนการ Photolithography Mask#4 (Metal Mask)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง



Develop ฟิล์มโดย

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

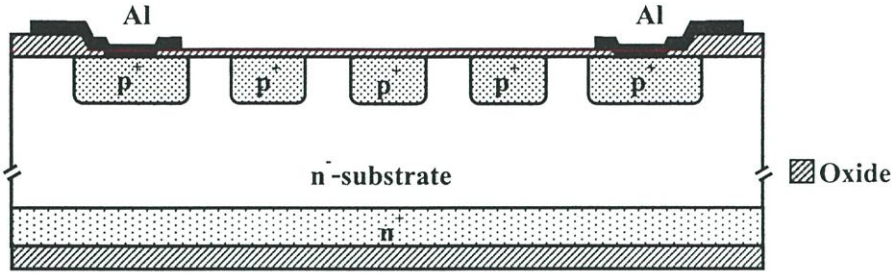
การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

กระบวนการลอกฟิล์ม

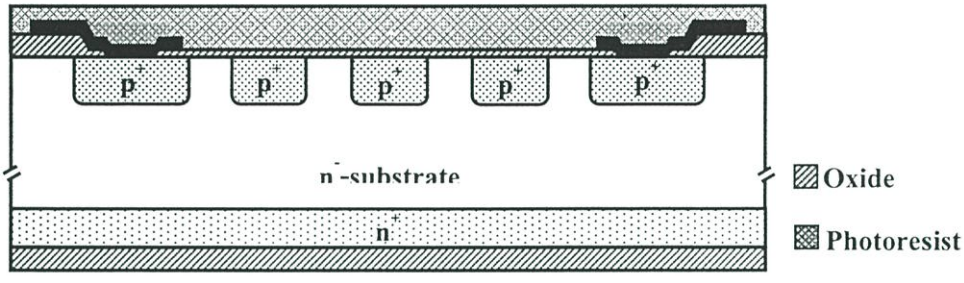
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การลอกชั้นออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่นออก เพื่อเตรียมสร้างขั้วสัมผัสด้านหลัง

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- ทาน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

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

กระบวนการลอกฟิล์ม

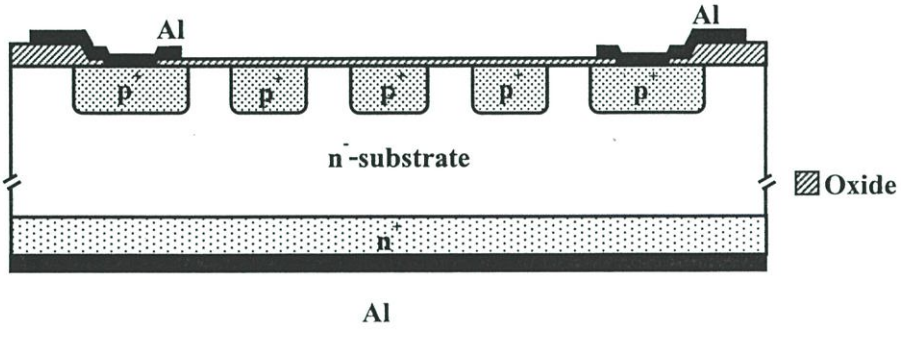
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

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

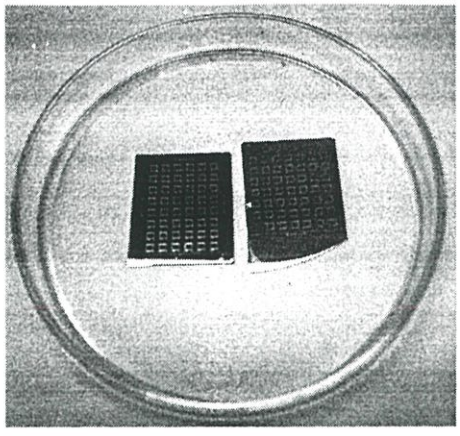
4. กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

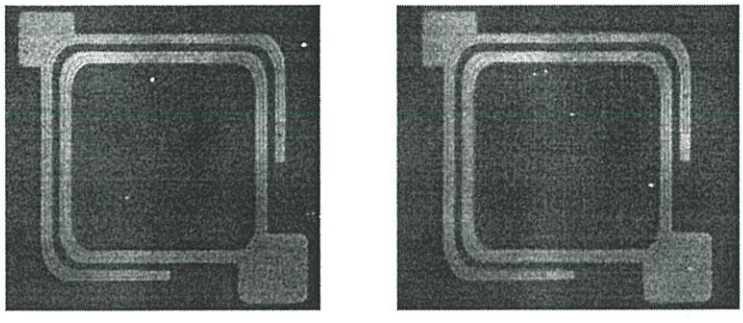


5. กระบวนการซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิค (ohmic contact) ที่ดีและเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

- sintering ที่อุณหภูมิ 500°C N_2 1,000 cc./min. เวลา 12 นาที



(ก)

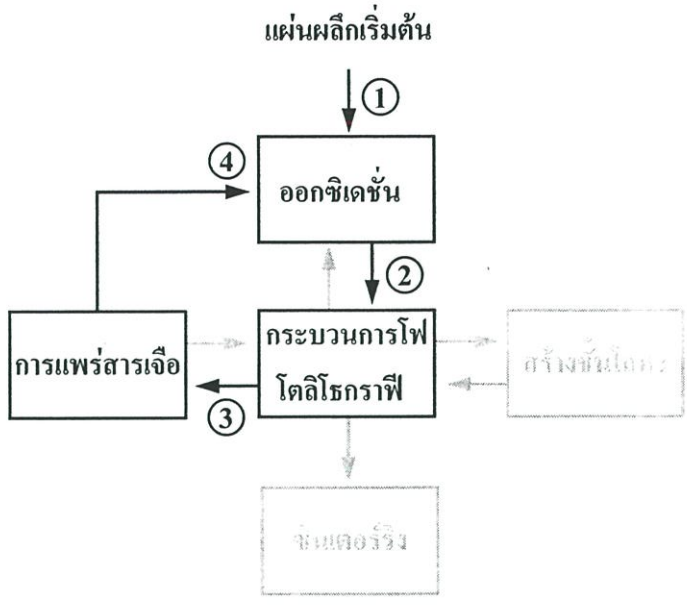


(ข)

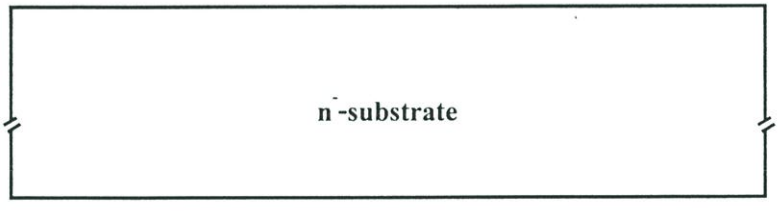
รูปที่ 3.11 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ก) บนแผ่นผลึก (ข) ผิวหน้าอุปกรณ์ขยาย 50 เท่า

4.2.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

4.2.2.1 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น



แผ่นผลึกเริ่มต้นที่เป็นฐานรองของโฟโตไดโอดได้แก่ แผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอิน ทรินซิค (i-type) ที่มีสภาพต้านทาน 2000 Ω.cm ระนาบ (111)



การทำความสะอาดแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่อาจเป็นฝุ่นละอองเศษโลหะ หรือคราบไขมันต่างๆ ที่ผิวของแผ่นผลึก แบ่งเป็น

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อัลตราโซนิค ในน้ำ DI เวลา 2 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดไนตริกเวลา 10 นาที
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่ 1 เวลา 5 นาที
- ต้มในน้ำ DI แก้วที่ 2 เวลา 5 นาที

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 10 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

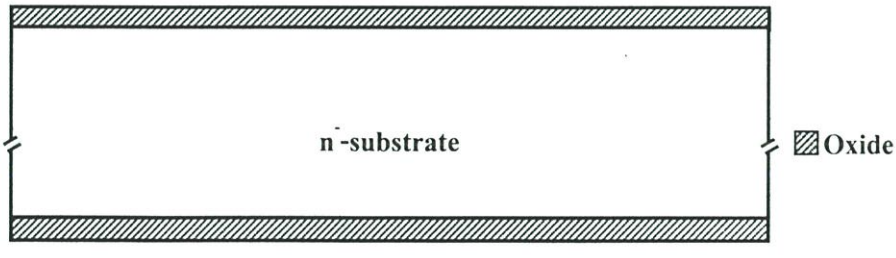
การลอกออกไซด์ ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

1. ออกซิเดชั่น (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นที่ผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยกระบวนการออกซิเดชั่น เพื่อใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นี้ เป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือ ใช้อุณหภูมิเตา 1,000°C อุณหภูมิน้ำ 90°C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 7,000 Å

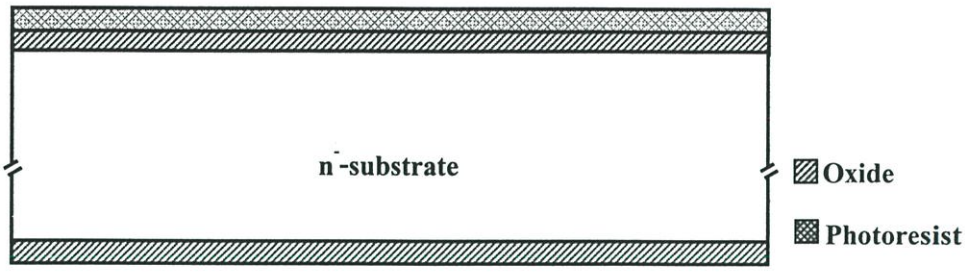
Oxidation

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 3 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง



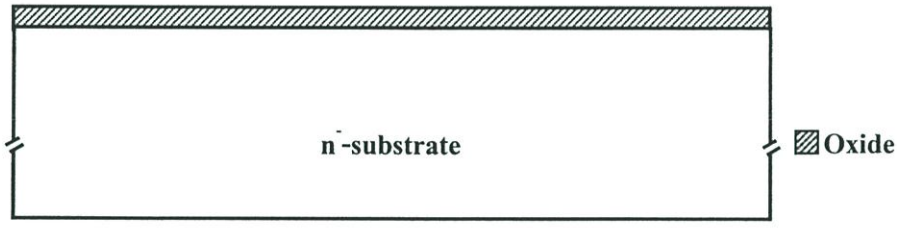
2. ลอกชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่น เพื่อสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+-layer) ของโฟโตไดโอด

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- ทาน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

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



กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 5 นาที

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนทำการแพร่สารเจือ

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

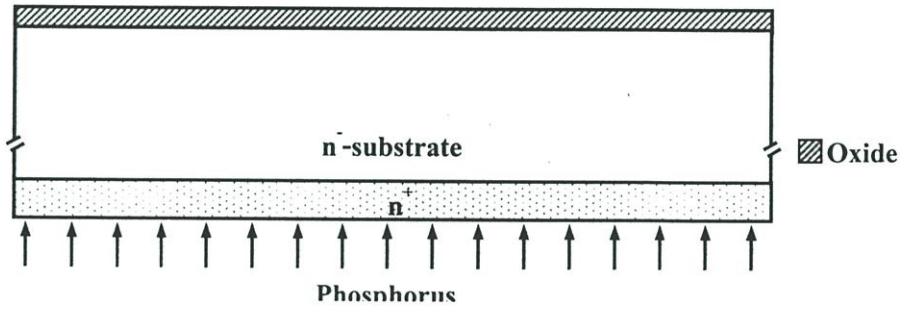
3. การสร้างส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+ -layer) ของโฟโตไดโอดโดยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสที่มีความเข้มข้นสูง

กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150 °C เวลา 10 นาที
- Phosphorus pre-deposition ที่ 1,000°C N_2 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือฟอสฟอรัสที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริคสำหรับฟอสฟอรัส 10%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์หนาบริเวณด้านหน้าออก เตรียมทำการสร้างออกไซด์ขึ้นใหม่พร้อมกับการขับลึก อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for phosphorus อัตราส่วน HF47%:6NH_4F)
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

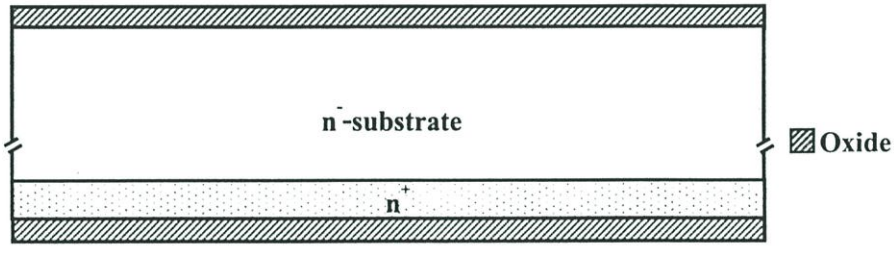
การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนการสร้างออกไซด์

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

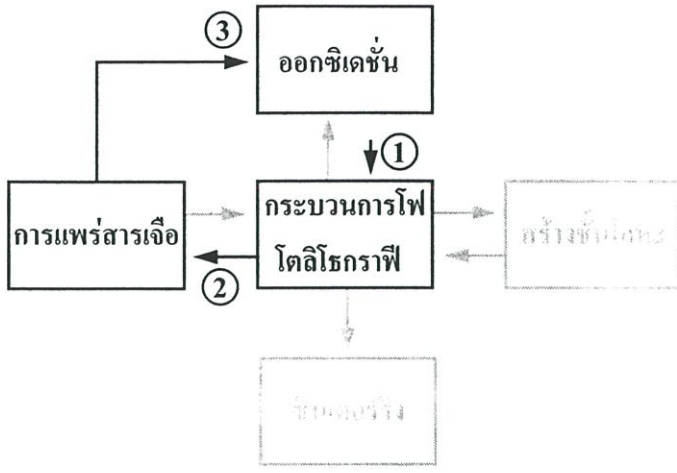
4. การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือโบรอนในขณะสร้างรอยต่อพี-เอ็นและเป็นการขับลึก อะตอมฟอสฟอรัสด้านหลังไปในตัวด้วย ใช้อุณหภูมิเตา 1,000 °C อุณหภูมิน้ำ 90 °C ได้ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 7,000 Å

Oxidation

- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย O_2 1,000 cc./min. เวลา 3 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย O_2 1,200 cc./min. เวลา 2 ชั่วโมง



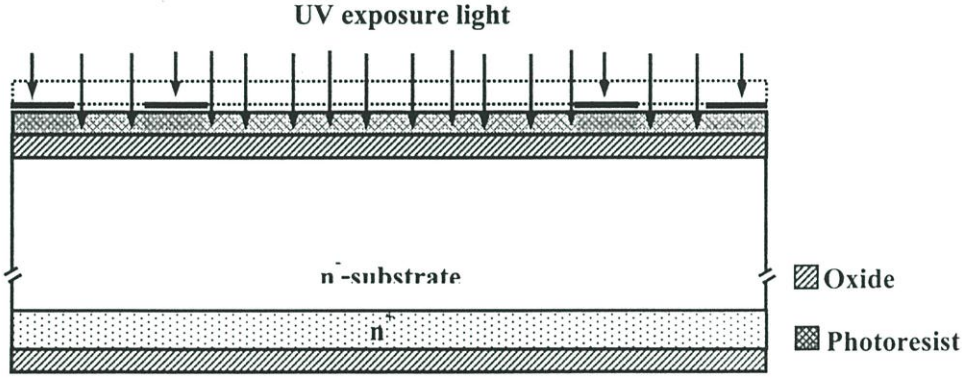
3.2.2.2 กระบวนการแพร่สารเจือเพื่อสร้างส่วนของชั้นพีที่เข้มข้น



1. การเปิดช่องออกไซด์เพื่อแพร่สารเจือ เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ ในบริเวณที่จะสร้างเป็นรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอด ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หรือโฟโตเอตชิงค์ โดยใช้มาสก์ชิ้นที่ 1 เรียกว่า P^+-region Mask

Photolithography Mask#1 (p^+-region)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง



Develop ฟิล์มโดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1

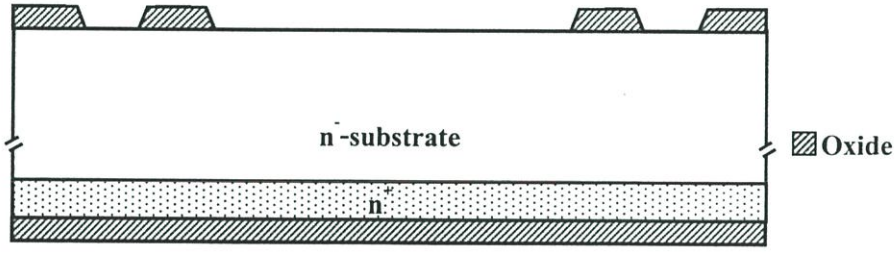
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 10 นาที (Post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับการแพร่สารเจือ

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

กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2

เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนการสร้างรอยต่อพี-เอ็น

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

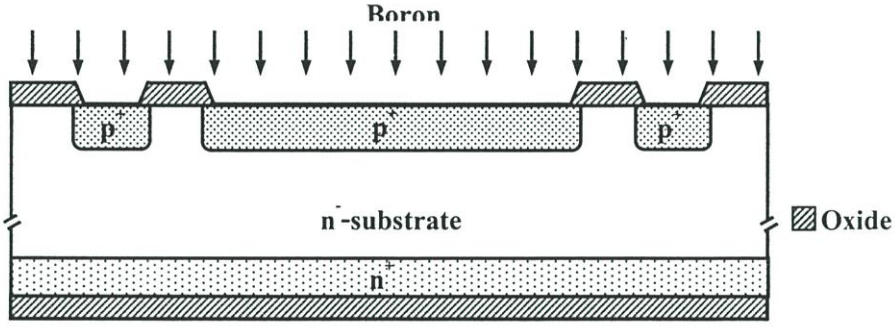
2. การสร้างรอยต่อพี-เอ็น เป็นพื้นที่รับแสงของของโฟโตไดโอดโดยการแพร่อะตอมสารเจือชนิดโบรอน เข้าไปในสารกึ่งตัวนำฐานรองชนิดเอ็น ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นมีค่าประมาณ 1 ไมโครเมตร

กระบวนการ Pre-deposition

- หยดสารละลายอะตอมสารเจือโบรอน ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 20 วินาที
- อบสารละลายที่ 150°C เวลา 10 นาที
- Boron pre-deposition ที่ 1,000°C N_2 1,000 cc./min. เวลา 30 นาที

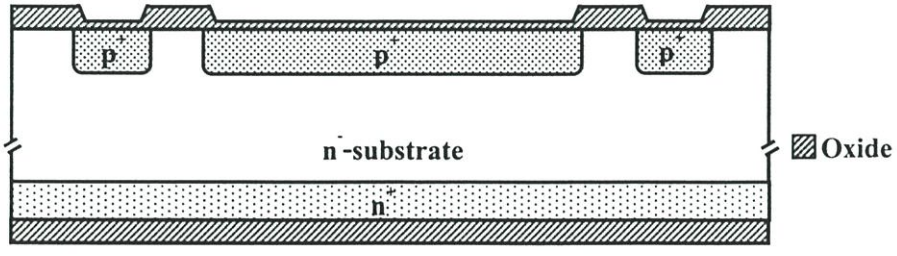
การลอกออกไซด์ เพื่อลอกชั้นออกไซด์ของสารเจือโบรอนที่ผิวหน้า

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริคสำหรับโบรอน 10%
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

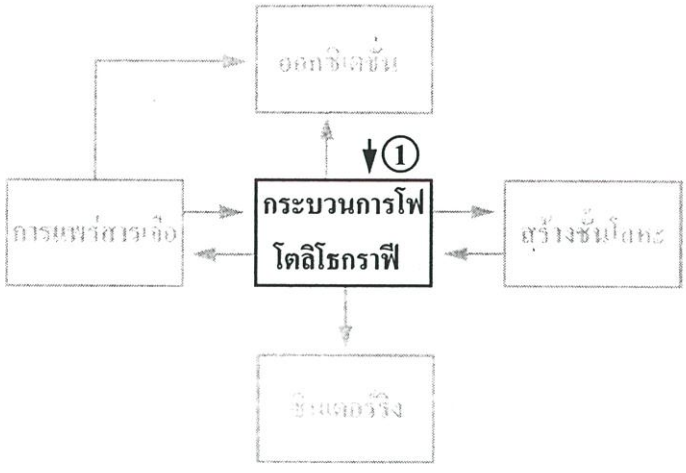


กระบวนการ Drive-in เพื่อขับลึกให้ได้ความลึกของรอยต่อพี-เอ็นตามต้องการ ในขณะเดียวกันก็ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงไปในตัวด้วย ซึ่งชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้นมีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม

- Boron drive-in ที่ 1,000 °C O_2 1,200 °C cc./min. (Dry), O_2 1,000 cc./min. (Wet)



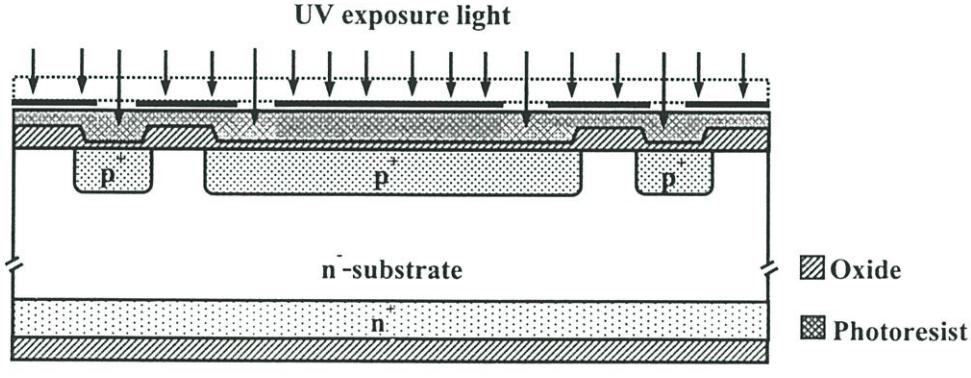
4.2.2.3 กระบวนการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส



1. การเปิดช่องไดออกไซด์ เป็นการเปิดชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณที่เป็นส่วนขั้วสัมผัส (contact) ของรอยต่อพี-เอ็นส่วนที่เป็นพื้นที่รับแสงของของโฟโตไดโอด ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้ โฟโตมาสก์ชิ้นที่ 2 เรียกว่า Contact Mask

Photolithography Mask#2 (Contact)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง



Develop ฟิล์มโดย

- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เวลา 15 วินาที
- จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เวลา 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 30 นาที (Post bake)

การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ บริเวณด้านหน้าที่มีความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม และเนื่องจากออกไซด์บริเวณด้านหลังต้องลอกออกเพื่อสร้างขั้วสัมผัสอยู่แล้วจึงไม่ได้ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหลัง

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

กระบวนการลอกฟิล์ม

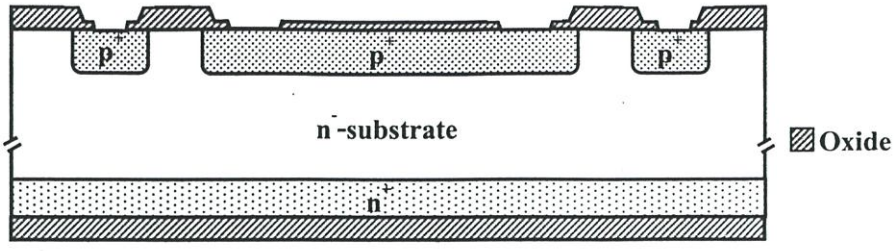
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้า

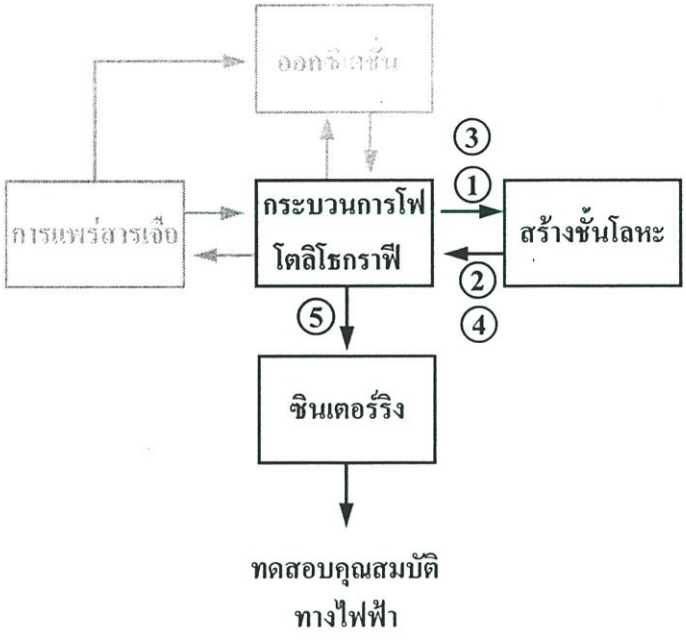
- ต้มในไตรโคลโรเอทธิลีน เวลา 5 นาที
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน เวลา 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ (slice etching) เพื่อลอกออกไซด์ที่เกิดตามธรรมชาติ ก่อนการเคลือบชั้นโลหะ

- จุ่มในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริคสำหรับฟอสฟอรัส 10% เวลา 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



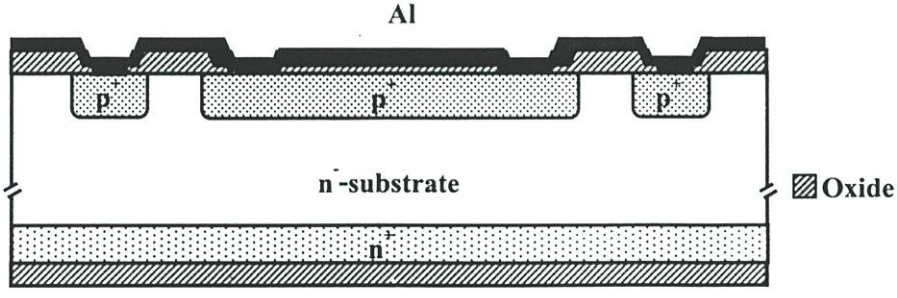
4.2.2.4 กระบวนการสร้างลวดลายอะลูมิเนียมและขั้วสัมผัสแบบโอห์มมิค



1. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) อะลูมิเนียมขึ้นที่ผิวหน้าทั้งหมดของแผ่นผลึกซิลิคอน ด้วยกระบวนการระเหยโลหะในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของโฟโตไดโอด ชั้นของโลหะนี้ได้แก่ อะลูมิเนียมบริสุทธิ์ ที่มีความหนาราว 1 ไมโครเมตร เพื่อให้มีค่าความนำไฟฟ้าสูง สามารถนำไฟฟ้าได้ดี

การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

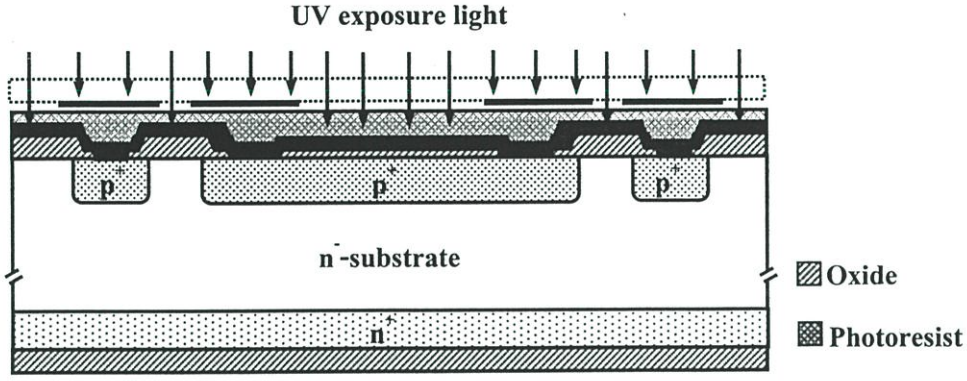
ทำการเคลือบชั้นอะลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



2. การสร้างลวดลายอะลูมิเนียม เป็นการสกัดชั้นของอะลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอน ให้เป็นลวดลายแถบตัวนำ (ขั้วสัมผัส) ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยใช้โฟโตมาสก์สำหรับแถบโลหะ (Metal Mask) ซึ่งเป็นโฟโตมาสก์ชิ้นที่ 3 และเรียกว่า Metal Mask

กระบวนการ Photolithography Mask#3 (Metal Mask)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90°C เวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ความเร็ว 3,000 rpm เวลา 40 วินาที
- อบฟิล์มที่ 90°C เวลา 15 นาที
- ฉายแสง



Develop ฟิล์มโดย

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

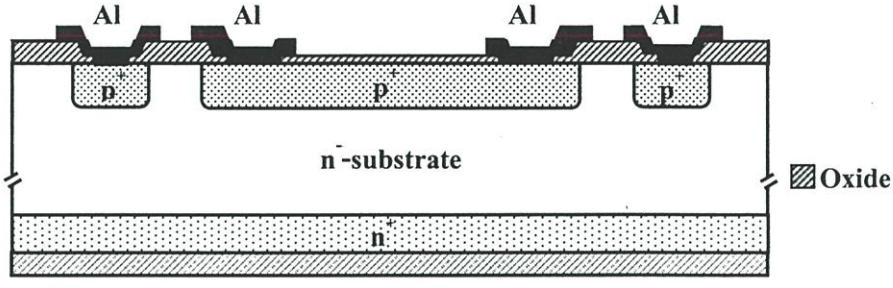
การสกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al-Etching)

- จุ่มในสารละลาย Al-Etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40°C
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

กระบวนการลอกฟิล์ม

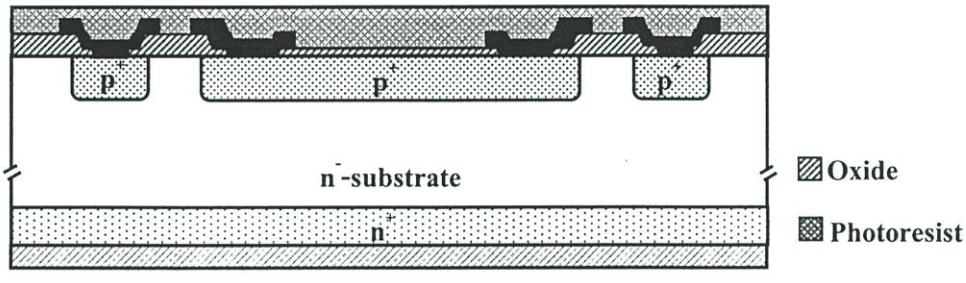
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที

- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การลอกชั้นออกไซด์บริเวณด้านหลังแผ่นออก เพื่อเตรียมสร้างขั้วสัมผัสด้านหลัง

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่ 90 °C เวลา 30 นาที
- ทาน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ที่ด้านหน้าแผ่น
- อบฟิล์มที่ 90 °C เวลา 30 นาที



การใช้สารละลายสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching)

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

กระบวนการลอกฟิล์ม

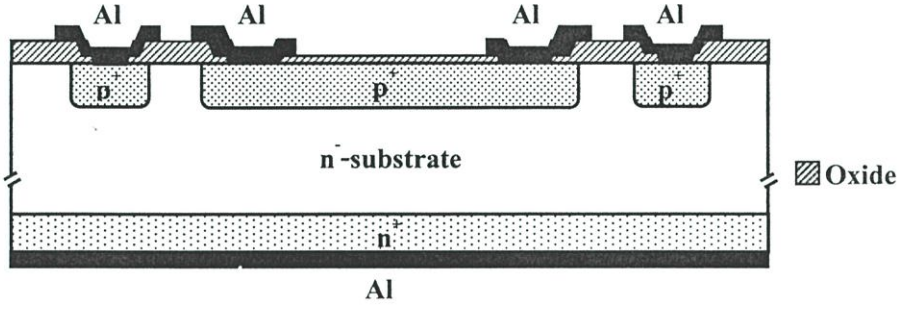
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเคลือบชั้นอะลูมิเนียม

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

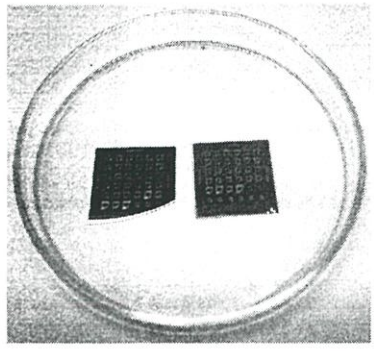
4. กระบวนการลอกฟิล์ม

- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 1 เวลา 1 นาที
- จุ่มลงในอะซิโตน แก้วที่ 2 เวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 1
- จุ่มในน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

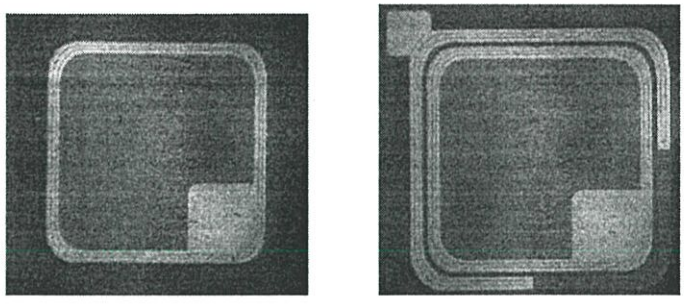


5. กระบวนการซินเตอร์ริง (sintering) เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นอัลลอย (Al-Si Alloy) ซึ่งจะทำให้มีคุณสมบัติเป็นรอยสัมผัสโอห์มิค (ohmic contact) ที่ดีและเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

- sintering ที่อุณหภูมิ 500 °C N_2 1,000 cc./min. เวลา 12 นาที



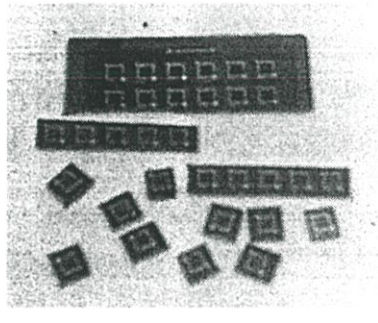
(ก)



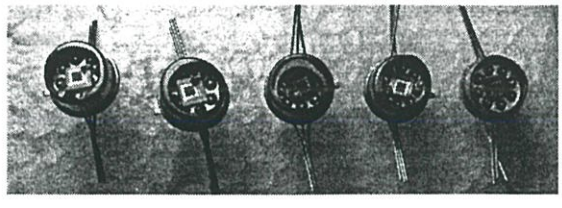
(ข)

รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริงเสร็จสมบูรณ์ (ก) บนแผ่นผลึก (ข) ผิวหน้าอุปกรณ์ขยาย 50 เท่า

แผ่นผลึกซิลิคอนจะถูกนำไปตัดแยกเป็นไดโอดแต่ละตัว และนำไปติดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋องโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 4.13 ก่อนที่จะถูกนำไปทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป



(ก)



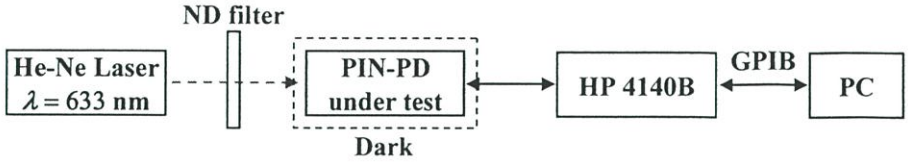
(ข)

รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่สร้างเสร็จ (ก) ตัดแยกเป็นไดโอดแต่ละตัว (ข) นำไปติดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋อง

4.3 การทดลอง

4.3.1 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

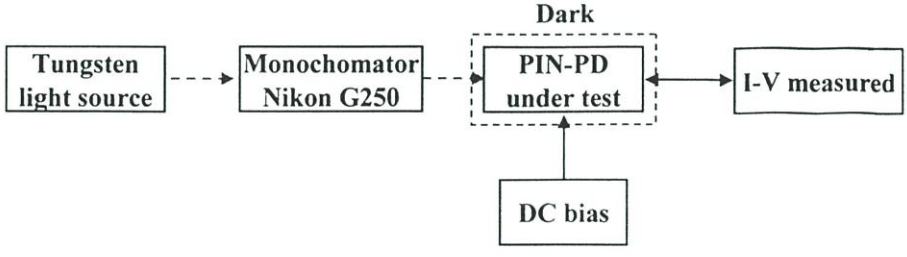
การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น คือ การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง และย้อนกลับ ทั้งในขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง เพื่อหาค่ากระแสมืด กระแสแสงของโฟโตไดโอด โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้จาก แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm และแสงจากหลอด UVC ที่มีความยาวคลื่น 254 nm ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 บล็อกไดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

4.3.2 การหาสภาพการตอบสนอง

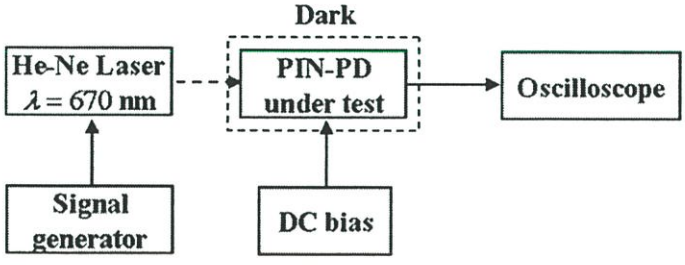
เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอด ไดโอดจะถูกนำไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 1 kΩ และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่โฟโตไดโอด กระแสแสงของโฟโตไดโอดหาด้วยวิธีโดยอ้อมจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จากนั้นนำไปหาค่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม และประสิทธิควอนตัมของโฟโตไดโอดต่อไป แหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ ใช้หลอดทังสเตนส่งแสงผ่าน momochromator ของ Nikon รุ่น G250 เพื่อเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสง โดยความยาวคลื่นแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 400 -1050 nm ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 บล็อกไดอะแกรมการหาสภาพการตอบสนอง

4.3.3 การหาความเร็วในการตอบสนอง

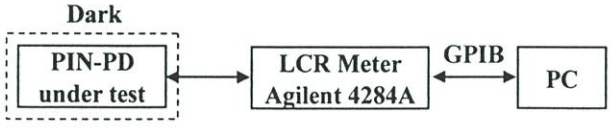
ในการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอดเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานโฟโตไดโอดในส่วนของความเร็วในการทำงาน และเชื่อมโยงไปถึงแบนด์วิทของอุปกรณ์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอด โดยการป้อนสัญญาณความถี่ค่าต่างๆ เข้ากับแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm ส่งผ่านไปยังโฟโตไดโอดที่ถูกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน และที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับไว้ วัดสัญญาณเอาต์พุตด้วยออสซิลโลสโคป จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตในลักษณะนอร์มอไลซ์ (Normalize) กับกึ่งล็อกความถี่ ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 บล็อกไดอะแกรมการหาความเร็วในการตอบสนอง

4.3.4 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า

การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 บล็อกไดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า

บทที่ 5

ผลการทดลองและการอภิปราย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลอง และการอภิปรายผลการทดลองของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โดยแบ่งผลการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อแรก กล่าวถึงการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งเป็นโฟโตไดไอดชนิด PIN ที่มีพื้นที่รับแสงเป็นลักษณะแถบ p^+ เล็กๆ หลายแถบ (multi stripe-shaped) ผลการทดลองนำเสนอผลการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดทั้งในขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง ผลของระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (p^+ stripe-shaped) ผลของความกว้างแถบชนิดพี การวัดสภาพตอบสนองทางแสงเชิงสเปกตรัม ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า และการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอด

หัวข้อที่สอง ผลการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง เพื่อศึกษาผลของการ์ดริง (guard ring) ที่ล้อมรอบโฟโตไดโอดที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โดยผลการทดลองศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าพื้นฐานของโฟโตไดโอด ผลของระยะห่างระหว่างการ์ดริงกับโฟโตไดโอด (หรือผลของตำแหน่งการ์ดริง) ผลของความกว้างการ์ดริง และอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

หัวข้อสุดท้าย เป็นผลการศึกษาการศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเป็นตรวจวัดรังสีเอกซ์ ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานที่จำเป็น ได้แก่ ประวัติการค้นพบ คุณลักษณะของรังสีเอกซ์ และการเกิดรังสีเอกซ์ เป็นต้น ส่วนของการทดลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โดยการวัดผลการตอบ สนองรังสีเอกซ์ของโฟโตไดโอด การต่อโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยาย แสดงลักษณะรูปคลื่น และขนาดสัญญาณเอาต์พุต สุดท้ายเป็นผลการศึกษาการลดทอนรังสีเอกซ์ของวัสดุตัวอย่าง

ผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นการศึกษาลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่สำคัญ และจำเป็นในการทำความเข้าใจหลักการทำงาน ลักษณะสมบัติพื้นฐาน ข้อควรคำนึง รวมถึงการนำซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้ ซึ่งรายละเอียดแต่ละหัวข้อจะนำเสนอดังนี้

5.1 การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

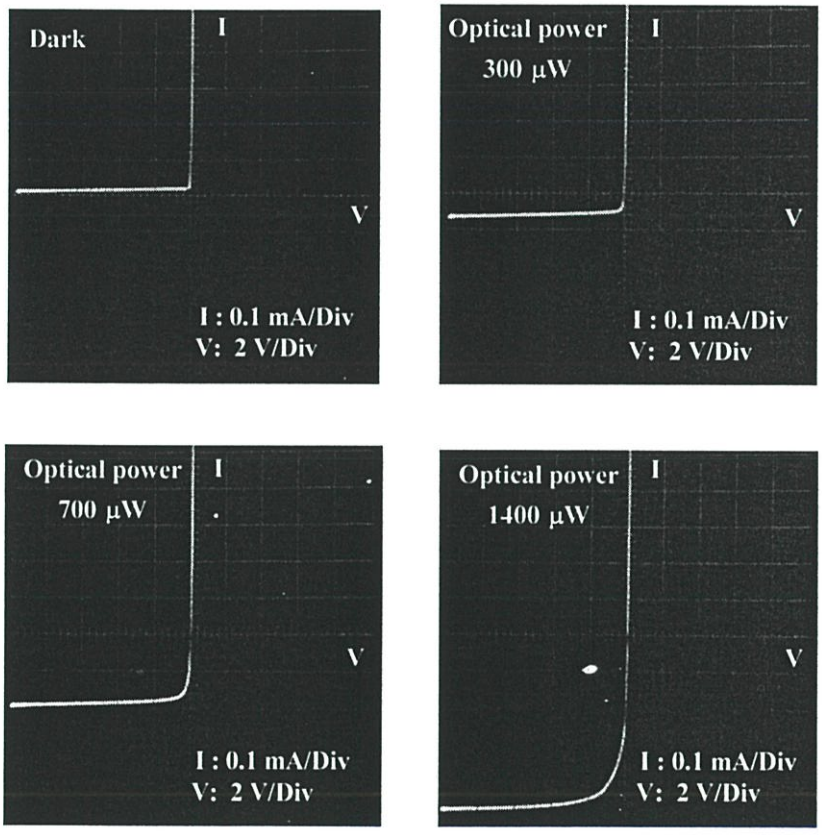
ผลการทดลองเพื่อศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ นำเสนอลักษณะสมบัติต่างๆ ที่สำคัญของโฟโตไดโอด ดังนี้

5.1.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น คือ การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบธรรมดา เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง และย้อนกลับ ทั้งในขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง เพื่อหาค่ากระแสมืด กระแสแสงของโฟโตไดโอด โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้จาก แสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm และแสงจากหลอด UVC ที่มีความยาวคลื่น 254 nm

5.1.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติทรานซิสเตอร์

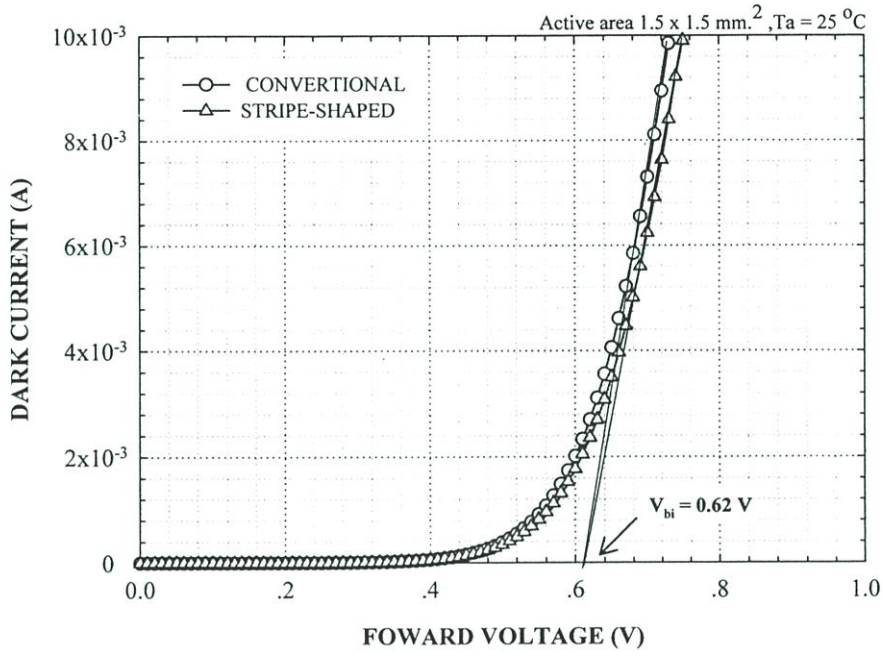
ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเบื้องต้น ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติทรานซิสเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ 5.1 จะเห็นได้ว่าตัวอุปกรณ์มีคุณสมบัติเร็คติไฟร์ (rectifier) มีกระแสมืดต่ำ กระแสแสงเพิ่มตามพลังงานแสงที่ได้รับ จากผลดังกล่าวนี้ จึงสามารถนำโฟโตไดโอดไปใช้งานได้



รูปที่ 5.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดด้วยเครื่องวัดคุณสมบัติทรานซิสเตอร์ ภายใต้เงื่อนไขไม่ได้รับแสง และได้รับแสงความยาวคลื่น 633 nm ที่ความเข้ม 300, 700 และ 1400 μW

5.1.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง

ผลการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 5.2 จากกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง (forward bias) พบว่ารอยต่อพี-เอ็น มีค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเท่ากับ 0.62 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องกับการค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน โดยการคำนวณด้วยสมการที่ 5.1 ได้ดังนี้ [23]



รูปที่ 5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left[\frac{N_A N_D}{n_i^2}\right] \tag{5.1}$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่โบสต์มันส์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

N_A คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้รับ

N_D คือ ค่าความหนาแน่นของอะตอมสารเจือผู้ให้

n_i คือ ค่าความหนาแน่นอินทรินซิค

เนื่องจาก กรณีไดโอดเป็นรอยต่อ p^+-n แบบขั้นบันได ซึ่ง $N_A >> N_D$

ดังนั้น แทนค่า $\frac{kT}{q}$ = 0.0259 โวลต์, $N_A = 10^{18}$ อะตอม/ลบ.ซม., $N_D = 2.5 \times 10^{12}$ อะตอม/ลบ.ซม.,

และ $n_i^2 = 10^{10}$ อะตอม/ลบ.ซม. ในสมการที่ 5.1 จะได้

$$V_{bi} = (0.0259) ln\left[\frac{10^{18} x 2.5x10^{12}}{10^{20}}\right] = 0.62 \text{ โวลต์}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเท่ากับ 0.62 โวลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด ในรูปที่ 5.2

นอกจากนี้แล้ว กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง สามารถใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวที่ไหลผ่านโฟโตไดโอด โดยเขียนกราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 5.3 อาศัยสมการของช็อกเคล์ย (Shockley ' equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไบอัสของไดโอดรอยต่อ พี- เอ็น ได้ดังนี้

$$I = I_o(e^{qV_A/kT} - 1) \tag{5.2}$$

โดยที่

$$I_o = qA n_i^2 (\frac{D_n}{L_n N_A} + \frac{D_p}{L_p N_D}) \tag{5.3}$$

โดยที่ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

V_A คือ แรงดันไบอัสที่ป้อนให้ไดโอด

k คือ ค่าคงที่โบสต์มันส์

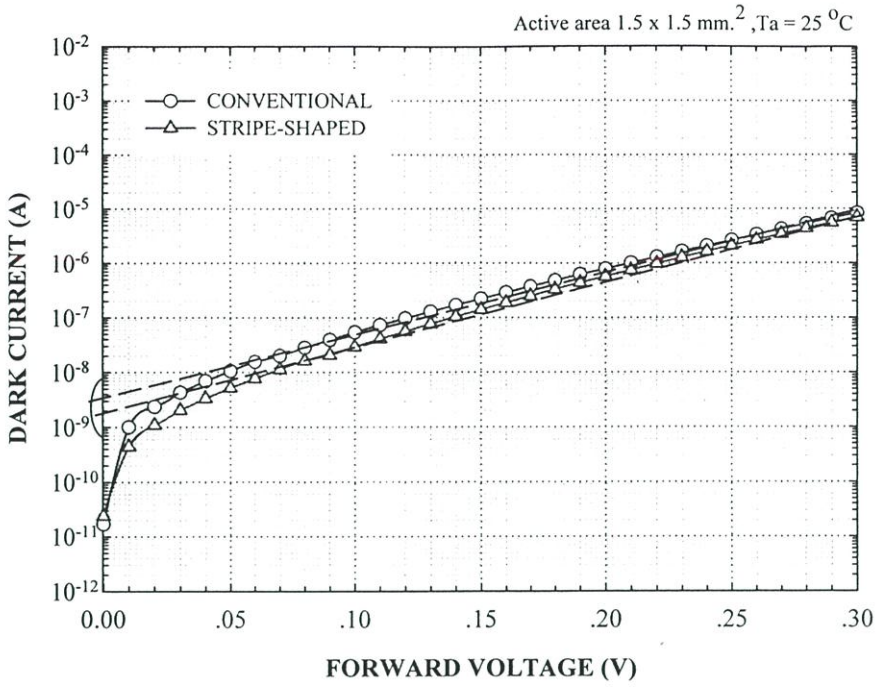
T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

จากสมการที่ 5.2 ในกรณีที่ $V_A > \frac{kT}{q}$ เช่น ที่อุณหภูมิห้อง T = 300 K จะได้ว่า $\frac{kT}{q}$ = 0.0259 โวลต์ ซึ่งน้อยมาก ดังนั้น สมการที่ 5.2 อาจเขียนโดยประมาณเป็น

$$I \approx I_0 e^{qV_A/kT} \tag{5.4}$$

และ

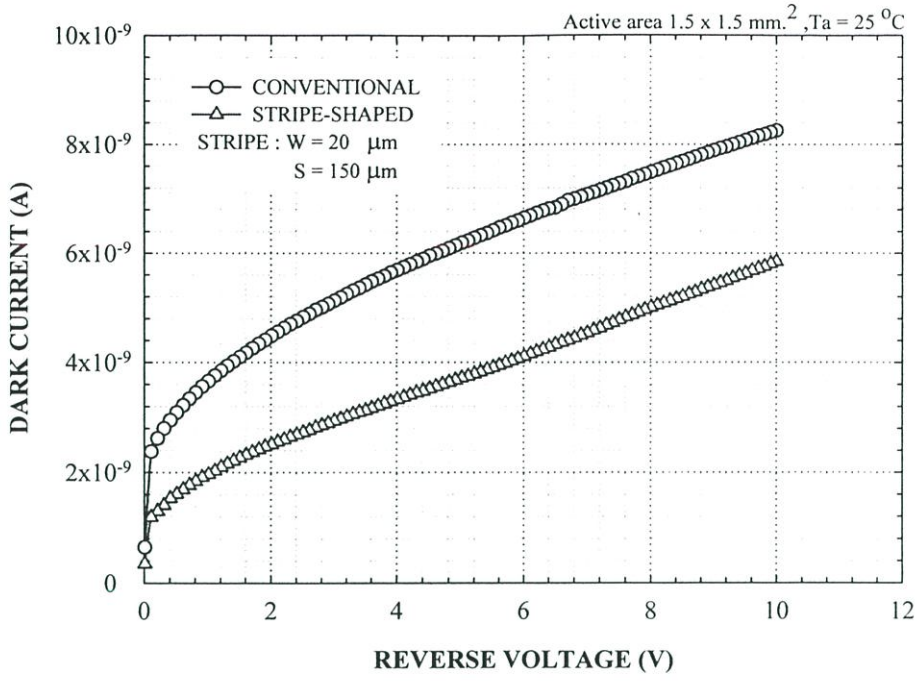
$$ln(I) \approx ln(I_0) + \frac{qV_A}{kT} \tag{5.5}$$



รูปที่ 5.3 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

จากสมการที่ 5.5 จะเห็นว่าที่ $V_A > 0$ บนกราฟกึ่งล็อก (semi-log) ระหว่าง $ln\ (I)$ กับ V_A จะปรากฏย่านที่เป็นช่วงเชิงเส้น โดยเส้นตรงนี้จะตัดแกนกระแส I ที่ Io ดังแสดงในรูปที่ 5.3 พบว่าค่ากระแสอิ่มตัวที่อ่านได้จากกราฟประมาณ 2×10^{-9} A (2 nA)

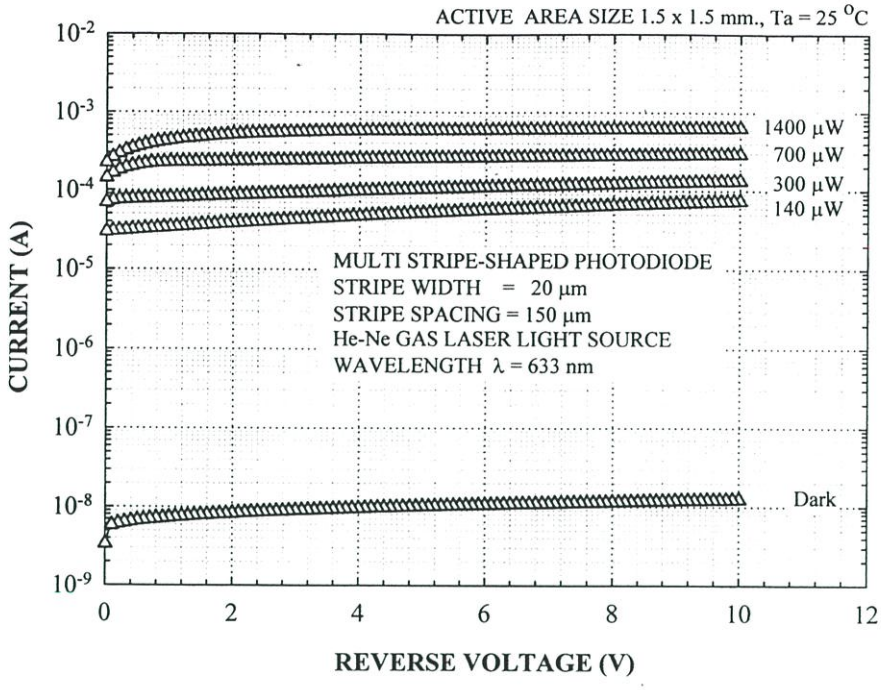
เพื่อการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่สมบูรณ์ ในรูปที่ 5.4 แสดงกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) โดยเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ (stripe-shaped) และแบบแนวตั้งธรรมดา (conventional) ซึ่งโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 เท่ากัน ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 150 μm พบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 5 V และ 10 V มีค่ากระแสมืดต่ำเพียง 2.7 nA และ 5.5 nA ตามลำดับ ส่วนแบบแนวตั้งธรรมดามีค่ากระแสมืดเท่ากับ 6.2 nA และ 8.3 nA ตามลำดับ สังเกตุเห็นว่ากระแสมืดของโฟโตไดโอดยังเพิ่มตามแรงดันไบอัสย้อนกลับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้ไดโอดมากขึ้น มีผลให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสมืดเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสย้อน เพราะกระแสมืดส่วนใหญ่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ



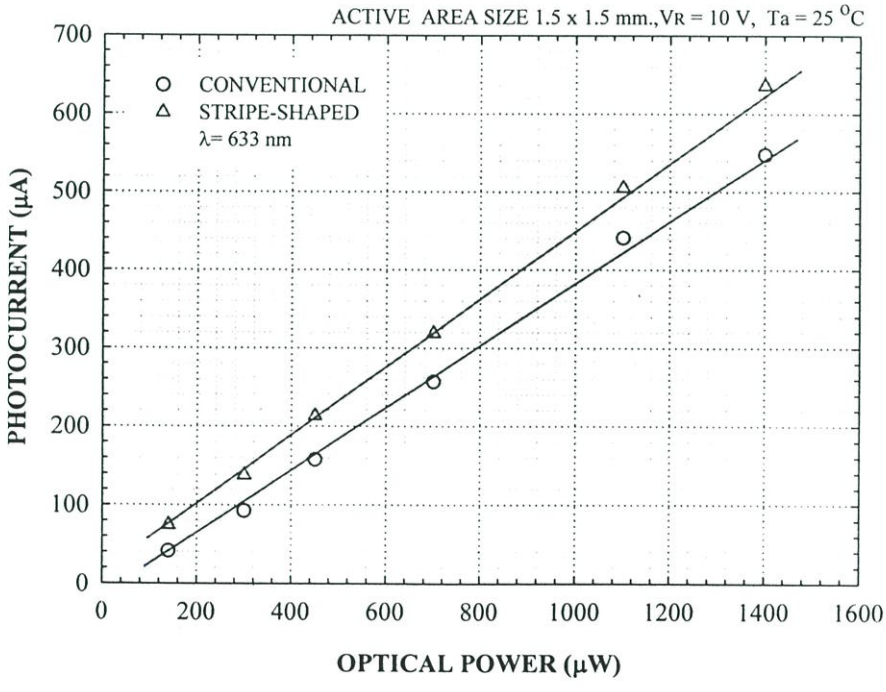
รูปที่ 5.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

5.1.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

การทดสอบคุณสมบัติของของโฟโตไดโอด เพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำ HP รุ่น 4061A ใช้ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ และเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงค่าต่างๆ ด้วย ND ฟิลเตอร์ (Neutral Density filter) ที่วางไว้ระหว่าง He-Ne เลเซอร์กับตัวอุปกรณ์ สำหรับลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่ความเข้มค่าต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 5.5 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 150 μm เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น 4 ระดับ ในช่วง 140 - 1400 μW จะได้รับกระแสแสงมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสง 1400 μW แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้ประมาณ 630 μA โดยที่อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดเท่ากับ 7.59 x 10^4 เท่า ซึ่งถือว่าเป็นโฟโตไดโอดที่ดี เพราะว่ามีอัตราส่วนกระแสแสง และกระแสมืดสูงมาก ซึ่งถ้ากระแสมืดต่ำสัญญาณรบกวนลดลงได้ ทำให้ความไวแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วน *S/N* มากขึ้น



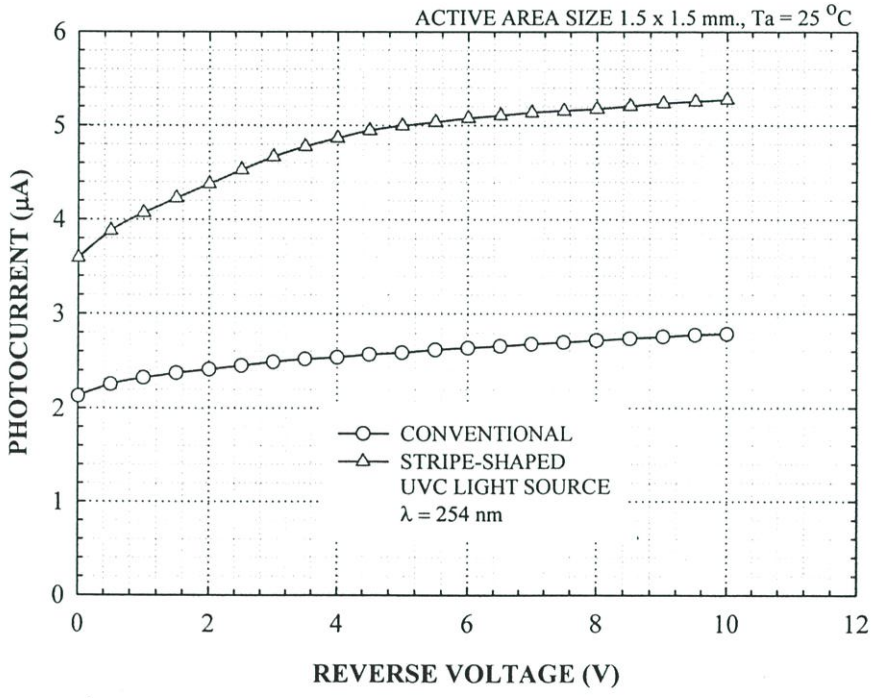
รูปที่ 5.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ ได้รับแสง และขณะได้รับแสงจากหลอดเลเซอร์ที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 5.6 กราฟความเป็นเชิงเส้นกระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

รูปที่ 5.6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสแสง ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่างๆ จะเห็นว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นความเข้มแสง โดยซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ สามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงกว่าแบบแนวตั้งธรรมดา ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจจับแสง

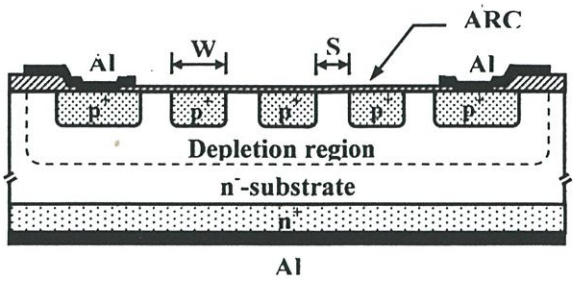
นอกใช้ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ ในการทดลองนี้ ยังนำเสนอลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงจากหลอด UVC ที่มีความยาวคลื่น 254 nm ที่ความเข้มค่าหนึ่ง โดยเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ และแบบแนวตั้งธรรมดา ดังแสดงในรูปที่ 5.7 เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ สามารถจ่ายกระแสแสงได้ประมาณ 5.2 μA ในขณะที่แบบแนวตั้งธรรมดาจ่ายกระแสแสงได้เพียง 2.7 μA จากผลดังกล่าวจึงน่าจะนำซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ใช้เป็นตัวตรวจจับแสงอุลตร้าไวโอเล็ต (UV) ได้



รูปที่ 5.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสงจากหลอด UVC ที่ความเข้มค่าหนึ่ง

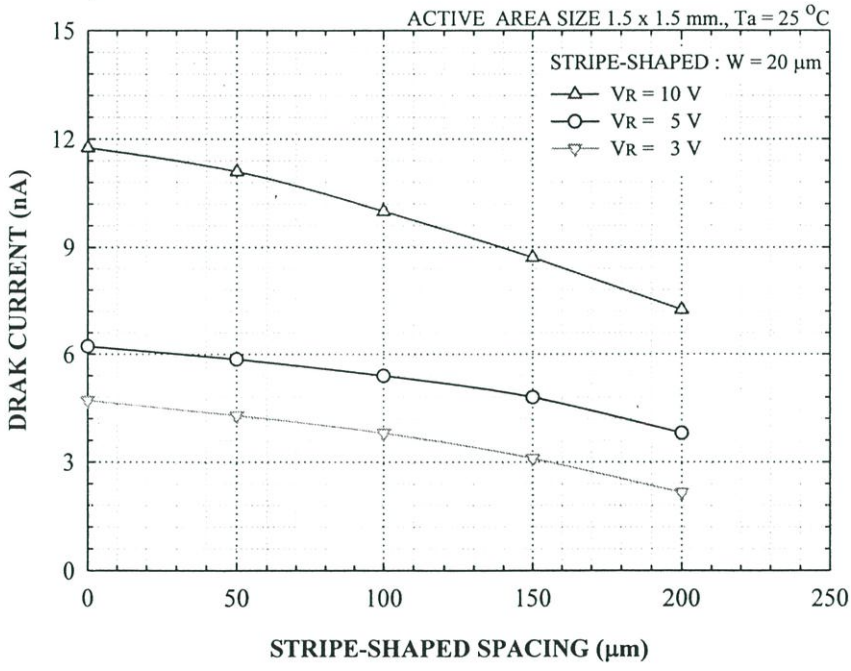
5.1.2 ผลของระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อหาระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีที่เหมาะสม โฟโตไดโอดทุกตัวถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 เท่ากัน และชั้นรับแสงมีลักษณะเป็นแถบ



รูปที่ 5.8 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

เล็กๆ หลายแถบนั้น มีขนาดความกว้างคงที่ (W) 20 μm และเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างแถบ (S) 50, 100, 150 และ 200 μm โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ แสดงดังในรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่แรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ

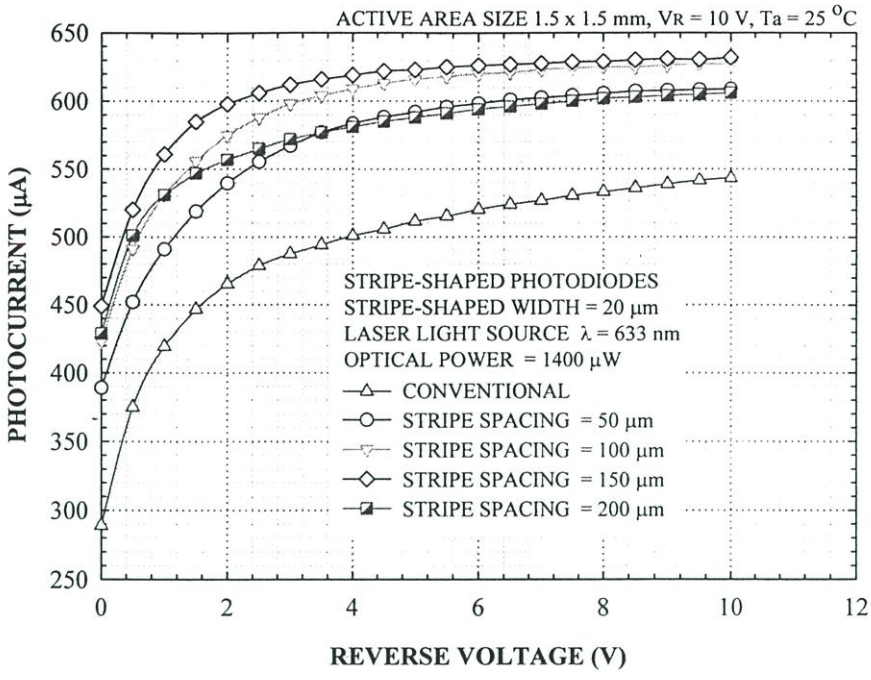
โดยการทดลองได้เปรียบเทียบทั้งกระแสมืด และกระแสแสง กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดาด้วย (ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ) ในรูปที่ 5.9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 3 V, 5 V และ 10 V ตามลำดับ กระแสมืดจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีมากขึ้น โดยในทุกเงื่อนไขการทด

ลองกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ต่ำกว่าแบบแนวตั้งธรรมดา (จากกราฟซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดา คือ ที่ระยะห่างระหว่างแถบมีค่าเป็นศูนย์) เนื่องจากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่โครงสร้างแบบหลายแถบพื้นที่รอยต่อ p^+/i ลดลง และกระแสมืดของไดโอดแปรผันกับพื้นที่รอยต่อ เมื่อพื้นที่รอยต่อลดลงกระแสมืดจึงลดลงด้วย รายละเอียดแสดงดังในตารางที่ 5.1

ตารางที่ 5.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด เงื่อนไขการสร้างแถบ p^+ มีความกว้างคงที่ 20 μm ระยะห่างค่าต่างๆ ขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

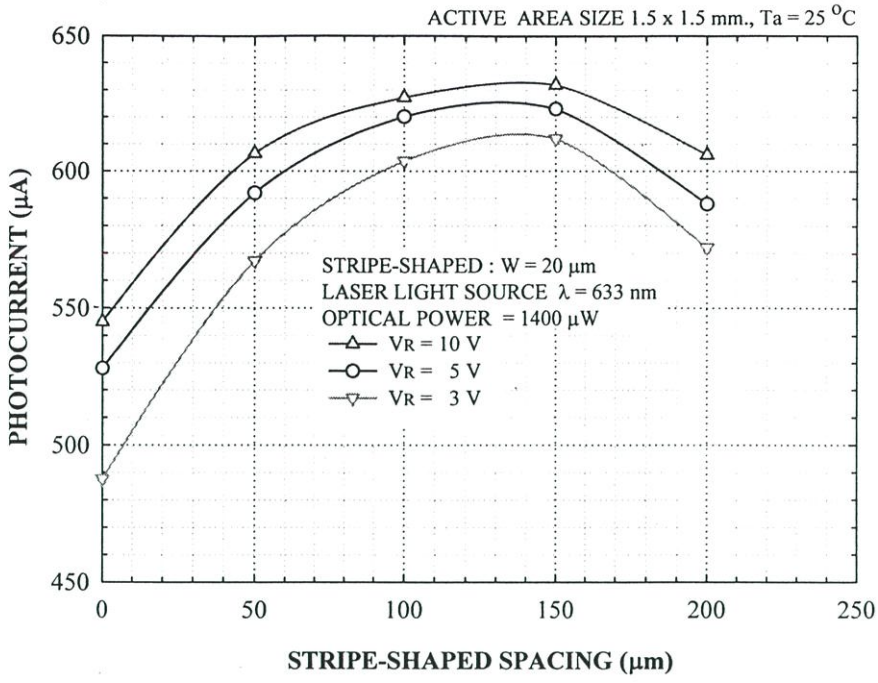
Device Type	Stripe spacing (μm)	Number of stripe	Active area (%)	intrinsic surface (%)	Dark current (nA)
PIN	-	-	100	-	11.7
STs_50	50	18	45.7	72.3	11
STs_100	100	10	36.4	84.6	10
STs_150	150	7	33	89.2	8.7
STs_200	200	5	30.7	92.3	7.2

เพื่อศึกษาการเพิ่มของกระแสแสง และหาเงื่อนไขเหมาะสมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ โดยได้เปรียบเทียบกระแสแสงระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดา (ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ) กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง (W) 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ (S) 50, 100, 150 และ 200 μm ตามลำดับ ใช้ He-Ne เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง และมีความเข้มแสง 1400 μW โดยพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ดังในรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงจากหลอดเลเซอร์ มีความเข้มแสง 1400 μW

สามารถเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง กับระยะห่างระหว่างแถบ p^+ ค่าต่างๆ เปรียบเทียบโครงสร้างธรรมดา (ระยะห่างระหว่างแถบมีค่าเป็นศูนย์) แสดงในรูปที่ 5.11 กระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้ม 1400 μW มีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีค่าต่างๆ กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ จะเพิ่มขึ้นกับระยะห่างระหว่างแถบ p^+ เท่ากับ 0 (p^+ ไม่เป็นแถบ), 50, 100 และ 150 μm ตามลำดับ และโฟโตไดโอดจะจ่ายกระแสแสงมากที่สุด เมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 150 μm จากนั้นกระแสแสงจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 200 μm จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 150 μm บริเวณปลอดพาหะระหว่างแถบ p^+ จะขยายจนเต็ม ด้วยเหตุนี้โฟโตไดโอดที่มีระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 150 μm จะจ่ายกระแสแสงมากที่สุด เพราะมีบริเวณปลอดพาหะที่ผิวมากที่สุด และเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 200 μm บริเวณปลอดพาหะระหว่างแถบ p^+ จะขยายไม่เต็ม และมีบริเวณนิวทรัลทำบริเวณปลอดพาหะลดลงกระแสแสงจึงลดลงด้วย เนื่องจากกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นเงื่อนไขที่ทำให้ได้บริเวณปลอดพาหะมากสุด จึงสามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงสุด และเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างตั้งปกติ (ระยะห่างระหว่างแถบเป็นศูนย์) โฟโตไดโอสามารถจ่ายกระแสแสงได้น้อยกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบทุกเงื่อนไข เพราะบริเวณปลอดพาหะอยู่ลึกลงไปใต้ชั้น p^+ โฟตอนบางส่วนจึงสูญเสียไปในชั้นนี้

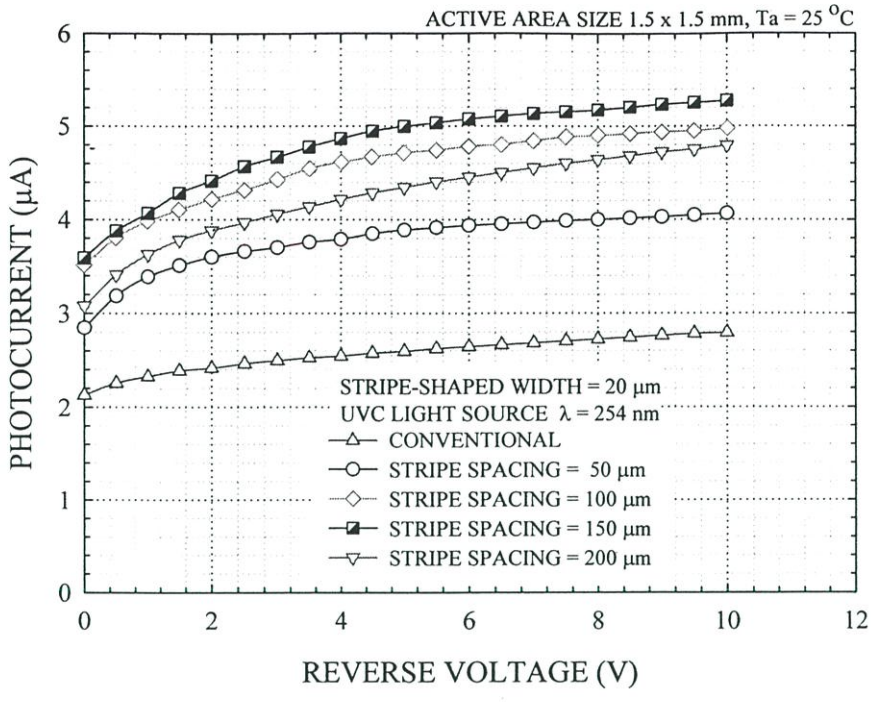


รูปที่ 5.11 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่ความเข้มแสง 1400 μW และแรงดันไบอัสค่าต่างๆ

จำนวนแถบ p^+ ที่ระยะห่างต่างๆ พื้นที่แถบ p^+ เปรียบเทียบกับพื้นที่รับแสงทั้งหมด และกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอด แสดงในตารางที่ 5.2

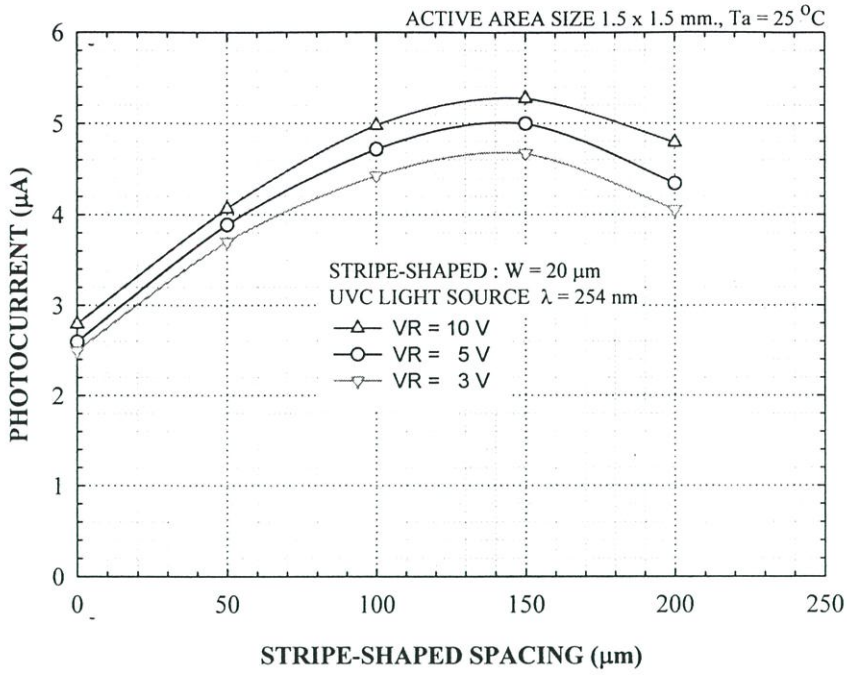
ตารางที่ 5.2 ลักษณะสมบัติทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอด เงื่อนไขการสร้างแถบ p^+ มีความกว้างคงที่ 20 μm ระยะห่างค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสง 1400 μW ขณะแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

Device Type	Stripe spacing(S) (μm)	Number of stripe	Effective active area (%)	p^+/i (W/S) (%)	Photocurrent λ = 633 nm (μA)
PIN	-	-	100	-	544
STs_50	50	18	28	40	606
STs_100	100	10	15	20	627
STs_150	150	7	11	13	631
STs_200	200	5	8	10	605



รูปที่ 5.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงจากหลอด UVC ที่ความเข้มค่าหนึ่ง และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

นอกจากนี้ในการศึกษาการเพิ่มของกระแสแสง และหาเงื่อนไขเหมาะสมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ยังได้ทดลองใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด UVC มีความยาวคลื่น 254 nm ที่ความเข้มแสงค่าหนึ่ง โดยได้เปรียบเทียบกระแสแสงระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดา (ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ) กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง (W) 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ (S) 50, 100, 150 และ 200 μm ตามลำดับ เช่นเดียวกับกรณีที่ใช้ He-Ne เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงจากหลอด UVC ที่ความเข้มค่าหนึ่ง และไดรับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V แสดงดังในรูปที่ 5.12 จะเห็นได้ว่าโฟโตไดโอดจะจ่ายกระแสแสงมากที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 150 μm และเมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง กับระยะห่างระหว่างแถบ p^+ ค่าต่างๆ เปรียบเทียบโครงสร้างธรรมดา (ระยะห่างระหว่างแถบมีค่าเป็นศูนย์) แสดงในรูปที่ 5.13

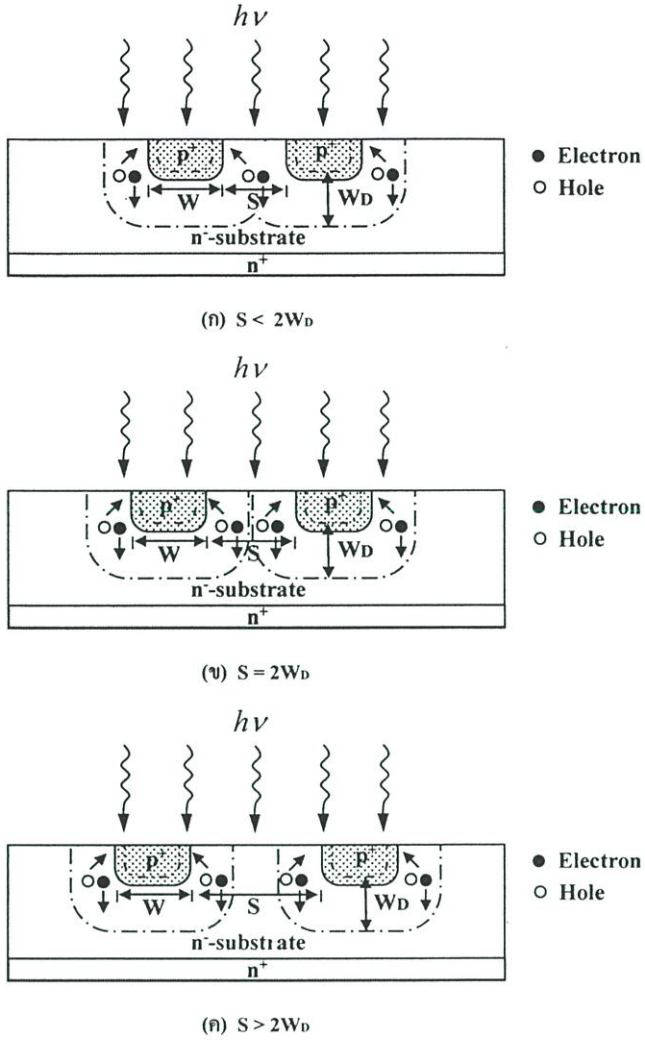


รูปที่ 5.13 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีขณะได้รับแสงจากหลอด UVC ที่ความเข้มค่าหนึ่ง และแรงดันไบอัสค่าต่างๆ

ผลการทดลองการใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอด UVC ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ สามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงกว่า โครงสร้างธรรมดาเกือบเท่าตัว กล่าวคือ เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบมีค่ากระแสแสงราว 5.2 μA ส่วนแบบแนวตั้งธรรมดามีค่ากระแสแสงเท่ากับ 2.7 μA ชี้ให้เห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ เหมาะกับการใช้เป็นตัวตรวจจับแสงอุลตร้าไวโอเล็ต ทั้งนี้เนื่องจากแสงอุลตร้าไวโอเล็ตเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น (short wavelength) มีระยะการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนสั้นมาก (ใกล้บริเวณพื้นผิว) จากสาเหตุที่กล่าวมานี้ ทำให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ เป็นโครงสร้างที่เหมาะสม เพราะว่ามีบริเวณปลอดพาหะอยู่ที่ผิว จึงสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นอย่างแสงอัลตร้าไวโอเล็ตได้ดี ทำให้สามารถจ่ายกระแสแสงได้มากขึ้น

จากผลการทดลองเพื่อศึกษากลไกการเพิ่มกระแสแสง และหาเงื่อนไขระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่เหมาะสมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ทำให้ทราบว่าการเพิ่มของกระแสแสงที่เกิดขึ้นเป็นผลมาจากบริเวณปลอดพาหะที่พื้นผิวเพิ่มขึ้น การดูดกลืนแสงในบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำเกิดมากขึ้น (อัตราการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงมากขึ้น) โฟโตไดโอดจึงสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากขึ้น ส่วนเงื่อนไขระยะห่างระ

หว่างแถบชนิดพี ที่เหมาะสม ควรมีค่าประมาณสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($2W_D$) ดังแสดงในรูปที่ 5.14

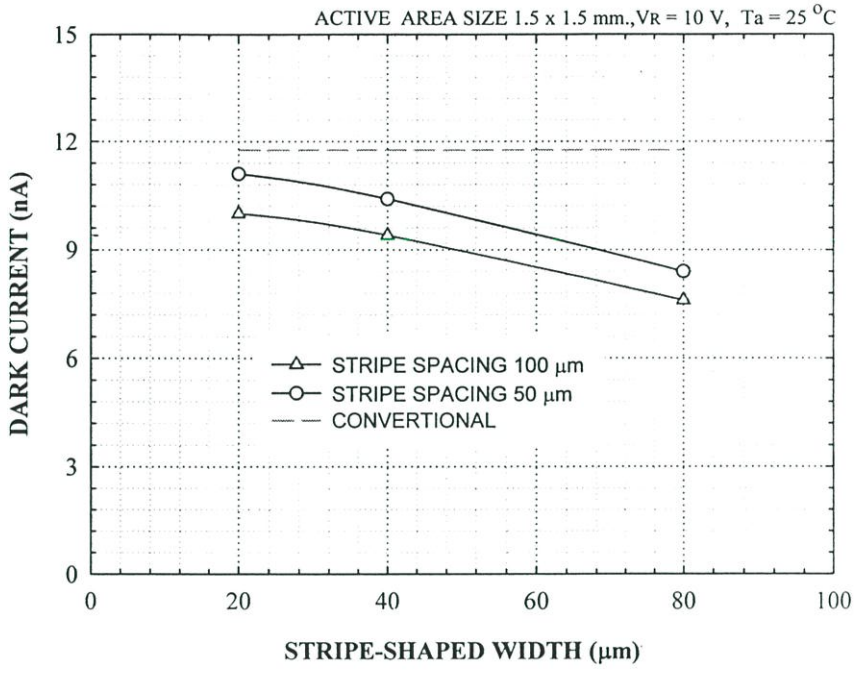


รูปที่ 5.14 แบบจำลองระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (ก) น้อยกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (ข) เท่ากับสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (ค) มากกว่าสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

เนื่องจากเป็นระยะห่างที่ทำให้บริเวณปลอดพาหะที่ผิวมากสุด ดังนั้นในการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ให้สามารถจ่ายกระแสงได้สูงสุด ต้องพิจารณาถึงค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือของฐานรอง และค่าแรงดันไบอัสที่ป้อนให้กับอุปกรณ์ เพราะปัจจัยทั้งสองเป็นตัวกำหนดความกว้างบริเวณปลอดพาหะ นั้นเอง

5.1.3 ผลของความกว้างแถบชนิดพี

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของความกว้างแถบชนิดพี ต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของโฟโตไดโอด โฟโตไดโอดทุกตัวถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 เท่ากัน และชั้นรับแสงมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบนั้นมีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี คงที่ (S) เท่ากับ 50 μm และ100 μm โดยเปลี่ยนแปลงความกว้างแถบชนิดพี (W) 20, 40 และ 80 μm ตามลำดับ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอด ดูได้จากรูปที่ 5.8



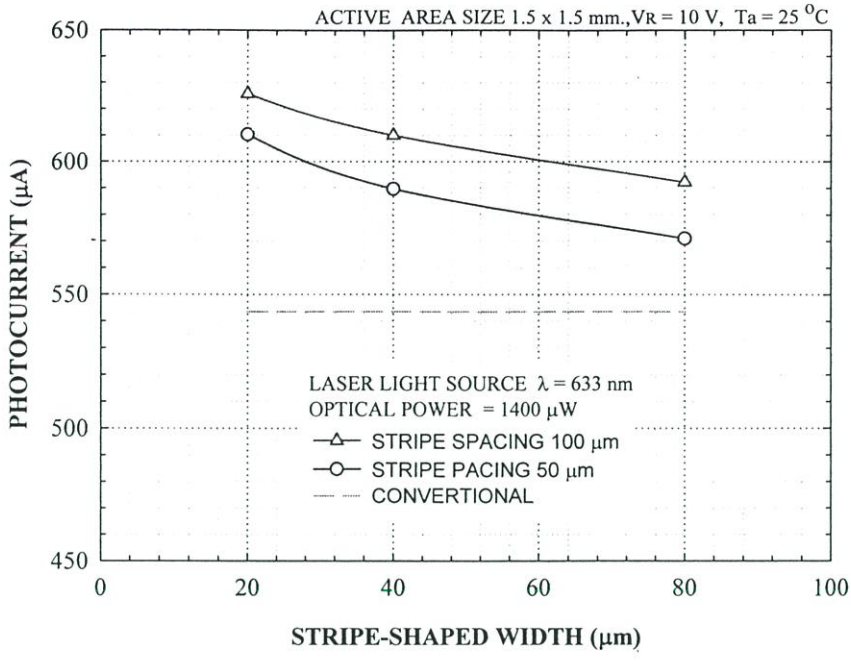
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับความกว้างแถบชนิดพี ที่แรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ

โดยการทดลองได้เปรียบเทียบทั้งกระแสมืด และกระแสแสง กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดาด้วย (ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ) ในรูปที่ 5.15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด กับความกว้างแถบชนิดพี ที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสมืดจะลดลงเมื่อความกว้างแถบชนิดพีขึ้น โดยในทุกเงื่อนไขการทดลองกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ต่ำกว่าแบบแนวตั้งธรรมดา โดยที่ระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีคงที่เท่ากับ 50 μm ค่ากระแสมืดมากกว่า กรณีที่มีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี 100 μm เนื่องจากที่ระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีคงที่เท่ากับ 50 μm จะทำให้ได้จำนวนแถบชนิดพีมากกว่า พื้นที่รอยต่อจึงมากขึ้นส่งผลให้มีค่ากระแสมืดมากกว่ากรณีที่มีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี 100 μm รายละเอียดดูได้จากตารางที่ 5.3

ตารางที่ 5.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด เงื่อนไขการสร้างแถบ p^+ มีความระยะห่างคงที่ 50 และ 100 μm ความกว้างค่าต่างๆ ขณะไม่ได้รบแสง และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

Stripe width(W) (μm)	Stripe spacing(S) (μm)	Number of stripe	Active area (%)	intrinsic surface (%)	Dark current (nA)
PIN	-	-	100	-	11.7
20	50	18	45.7	72.3	11.1
40	50	14	57.2	56.9	10.4
80	50	10	71.1	38.4	8.4
20	100	10	36.4	84.6	10
40	100	9	45.7	72.3	9.4
80	100	5	48	69.2	7.6

รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างแถบชนิดพี ที่ความเข้มแสง 1400 μW และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V โดยได้เปรียบเทียบกระแสแสงระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งธรรมดา (ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ) กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี คงที่ (S) เท่ากับ 50 μm และ100 μm โดยเปลี่ยนแปลงความกว้างแถบชนิดพี (W) 20, 40 และ 80 μm ตามลำดับ ตามลำดับ ใช้ He-Ne เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง ซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงสุด เมื่อความกว้างแถบชนิดพีมีค่า 20 μm ทั้งกรณีที่แถบ p^+ มีระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี เท่ากับ 50 μm และ100 μm โดยระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี เท่ากับ 100 μm ให้กระแสสูงกว่าเท่ากับ 50 μm ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ผ่านมา



รูปที่ 5.16 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความกว้างแถบชนิดพี ที่ความเข้มแสง 1400 μW และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

เงื่อนไขความกว้างแถบชนิดพีที่เหมาะสม ควรมีค่าเล็กที่สุดเท่าที่เป็นไปได้ และสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (*S*) กับความกว้างแถบชนิดพี (W) ได้จากความสัมพันธ์ของอัตราส่วน $\frac{W}{W+S}$ ดังนั้นแถบชนิดพีควรเล็ก ระยะห่างระหว่างแถบมากสุดได้ไม่เกินสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($2W_D$) ค่าดังกล่าวจะทำให้บริเวณปลอดพาหะที่ผิวมากสุด ไฟโตไดโอดสามารถดูดกลืนแสงได้โดยตรงที่ผิว อีกทั้งช่วยลดการรวมตัวใหม่ของพาหะเพราะพาหะเหล่านั้นเกิด และเคลื่อนที่ในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งเป็นบริเวณที่มีสนามไฟฟ้า

จากตารางที่ 5.3 เห็นได้ว่าเงื่อนไขที่สามารถจ่ายกระแสแสงได้มากที่สุด คือ เงื่อนไขที่มีระหว่างระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (*S*) เท่ากับ 100 μm และความกว้างแถบชนิดพี (W) เท่ากับ 20 μm ซึ่งมีอัตราส่วน $\frac{W}{W+S}$ น้อยที่สุดในกลุ่ม คือ 18 % โดยสามารถจ่ายกระแสแสงได้ 625 μA

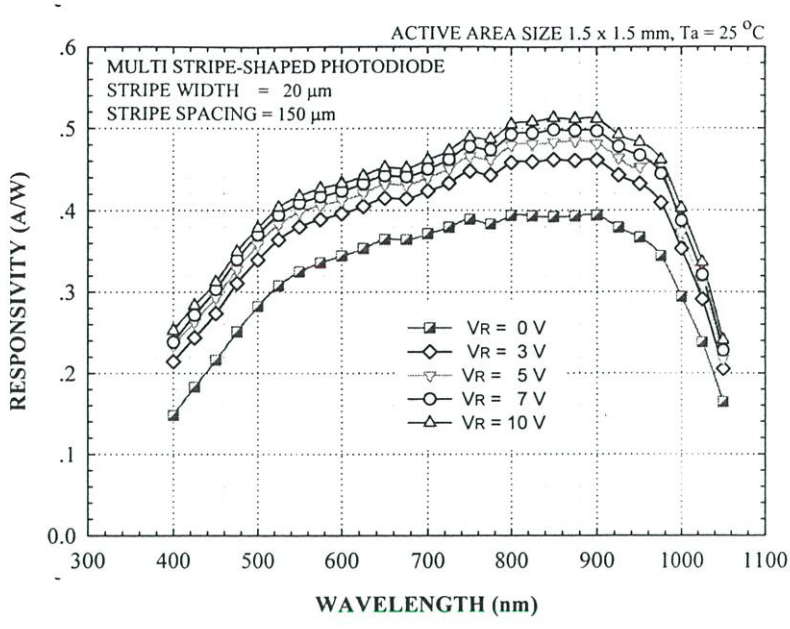
ตารางที่ 5.4 ลักษณะสมบัติทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ ระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีคงที่ (S) เท่ากับ 50 μm และ100 μm เปลี่ยนแปลงความกว้างแถบชนิดพีค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสง 1400 μW และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

Stripe width(W) (μm)	Stripe spacing(S) (μm)	Number of stripe	Effective active area (%)	p^+/i (W/S) (%)	Photocurrent $\lambda = 633$ nm (μA)
PIN	-	-	100	-	544
20	50	18	27.7	38.3	610
40	50	14	43.1	75.7	589
80	50	10	61.5	160	570
20	100	10	15.4	18.2	625
40	100	9	27.7	38.3	609
80	100	5	30.8	44.4	592

4.1.4 การวัดสภาพตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด

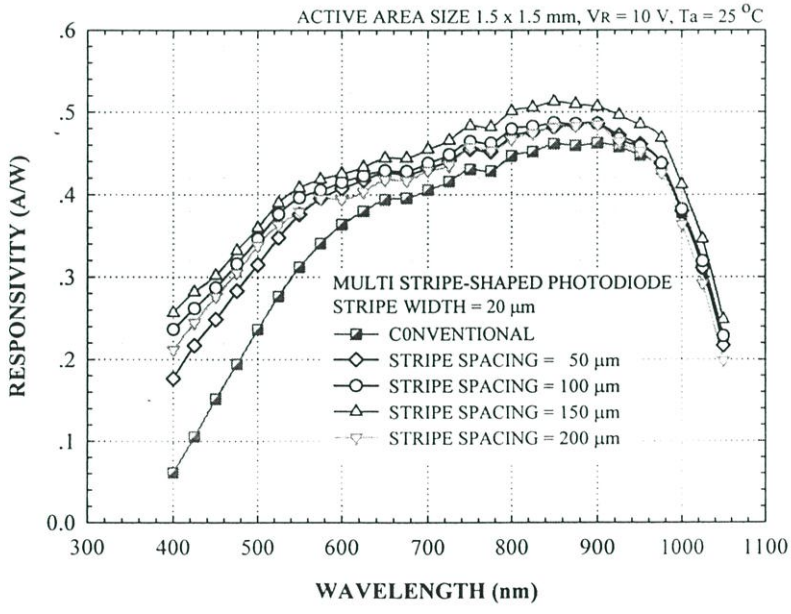
เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอด ไดโอดจะถูกนำไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 1 kΩ และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่โฟโตไดโอด กระแสแสงของโฟโตไดโอดหาด้วยวิธีโดยอ้อมจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จากนั้นนำไปหาค่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม และประสิทธิควอนตัมของโฟโตไดโอดต่อไป แหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ ใช้หลอดทังสเตนส่งแสงผ่าน momochromator ของ Nikon รุ่น G250 เพื่อเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสง โดยความยาวคลื่นแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 400 -1050 nm

รูปที่ 5.17 แสดงผลการทดลองเพื่อศึกษาผลของแรงดันไบอัสที่มีต่อสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม โดยการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่โฟโตไดโอดค่า 0V, 3V, 5V, 7V และ 10 V ตามลำดับ จากกราฟเห็นได้ว่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะ ห่างระหว่างแถบ 150 μm เพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัส เนื่องจากเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มสนามไฟฟ้า และความกว้างบริเวณปลอดพาหะมากขึ้นด้วย กระแสแสงของโฟโตไดโอดจึงมากขึ้น ส่งผลให้สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดเพิ่มตามแรงดันไบอัส



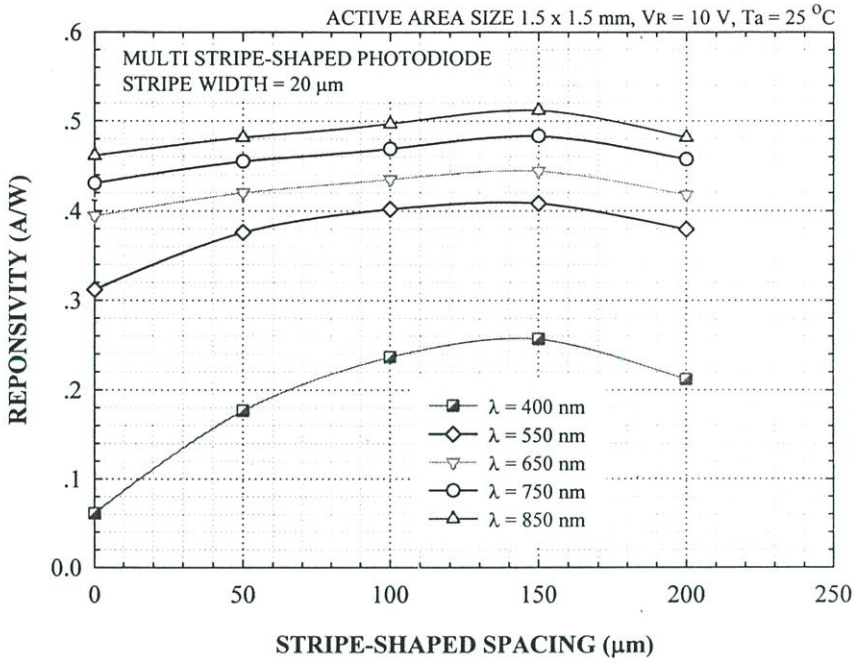
รูปที่ 5.17 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ

สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง (W) 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ (S) 50, 100, 150 และ 200 μm ตามลำดับ แสดงดังในรูปที่ 5.18 โฟโตไดโอดโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ มีสภาพตอบสนอง



รูปที่ 5.18 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ

เชิงสเปกตรัมสูงกว่าโครงสร้างแบบธรรมดาในทุกความยาวคลื่น โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นสั้นๆ สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 150 μm มีสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงกว่าโครงสร้างแบบธรรมดาเป็นอย่างมาก และสูงสุดในกลุ่ม



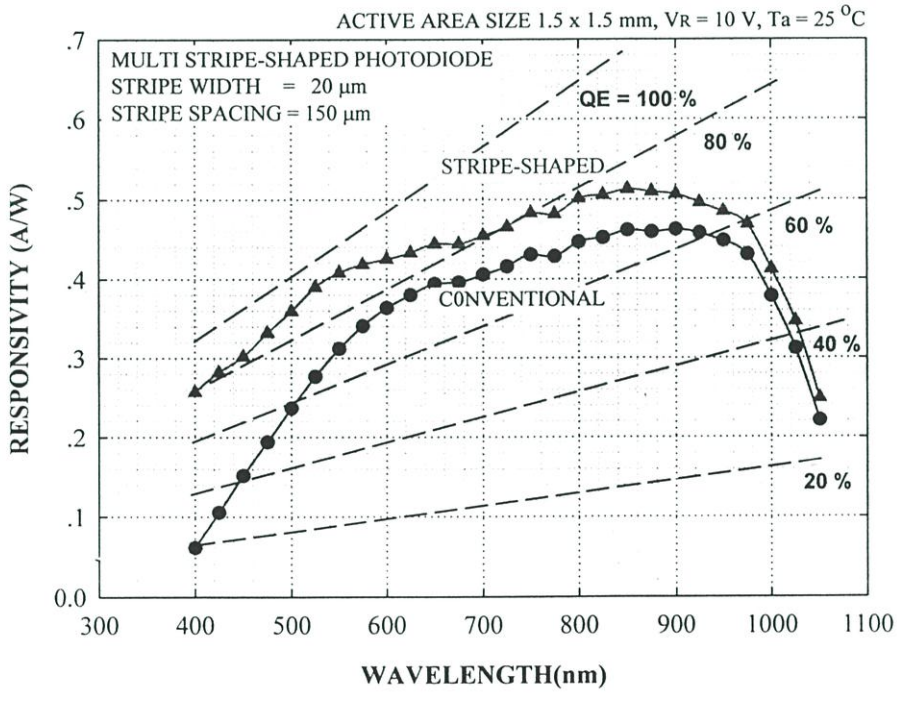
รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม กับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

รูปที่ 5.19 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม กับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมจะเพิ่มขึ้นตามความยาวคลื่นจาก 400 nm, 550 nm, 650 nm, 750 nm และมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 850 nm โดยที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 150 μm มีสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงสุด สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เงื่อนไขการสร้าง และความยาวคลื่นค่าต่างๆ แสดงในตารางที่ 5.5 เห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างธรรมดา กับแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะ ห่างระหว่างแถบ 150 μm ที่ความยาวคลื่นจาก 400 nm, 550 nm, 650 nm, 750 nm และ 850 nm สภาพตอบสนองเพิ่มจาก 0.06 A/W เป็น 0.25 A/W, 0.31 A/W เป็น 0.40 A/W, 0.39 A/W เป็น 0.45 A/W, 0.43 A/W เป็น 0.48 A/W และ 0.46 A/W เป็น 0.51 A/W ตามลำดับ

ตารางที่ 5.5 ลักษณะสมบัติทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เงื่อนไขการสร้าง และความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ขณะได้รับแรงดันไบอัส -10 V ตัวต้านทานโหลด 1 kΩ

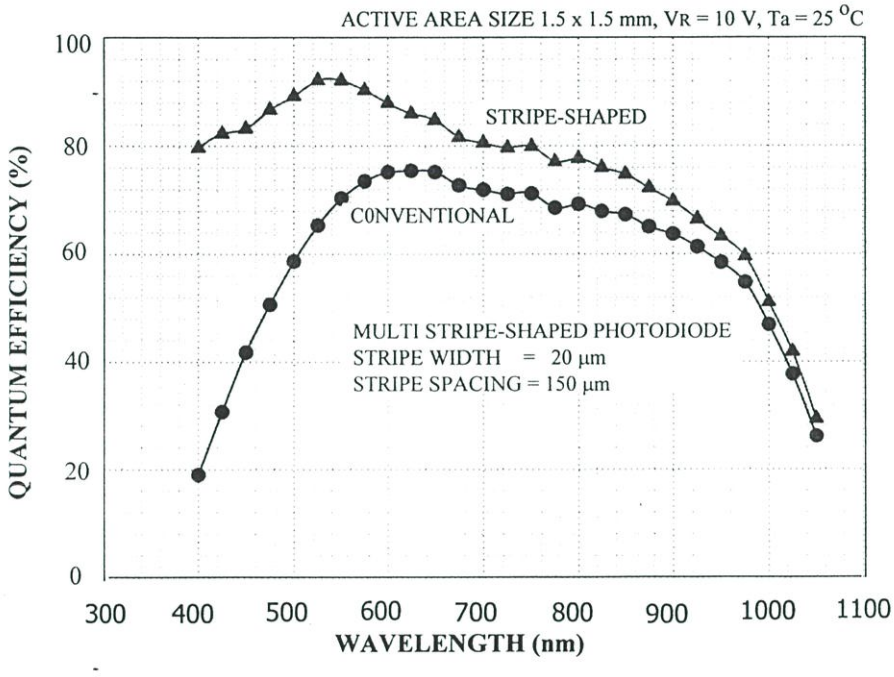
Device Type	Spectral response λ (nm)	λpeak (nm)	Responsivity (A/W) Wavelength (nm)				
			400	550	650	750	850
PIN	400 to 1050	850	0.06	0.31	0.39	0.43	0.46
ST_50			0.17	0.37	0.42	0.45	0.48
ST_100			0.23	0.39	0.42	0.46	0.48
ST_150			0.25	0.40	0.45	0.48	0.51
ST_200			0.21	0.37	0.41	0.45	0.48

เมื่อเปรียบเทียบสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง (W) 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ (S) 150 μm จะเห็นว่ามีสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมในความคลื่นช่วง 400-700 nm มีการเพิ่มมากกว่าในความคลื่นช่วง 700- 1000 nm ดังแสดงในรูปที่ 5.20



รูปที่ 5.20 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

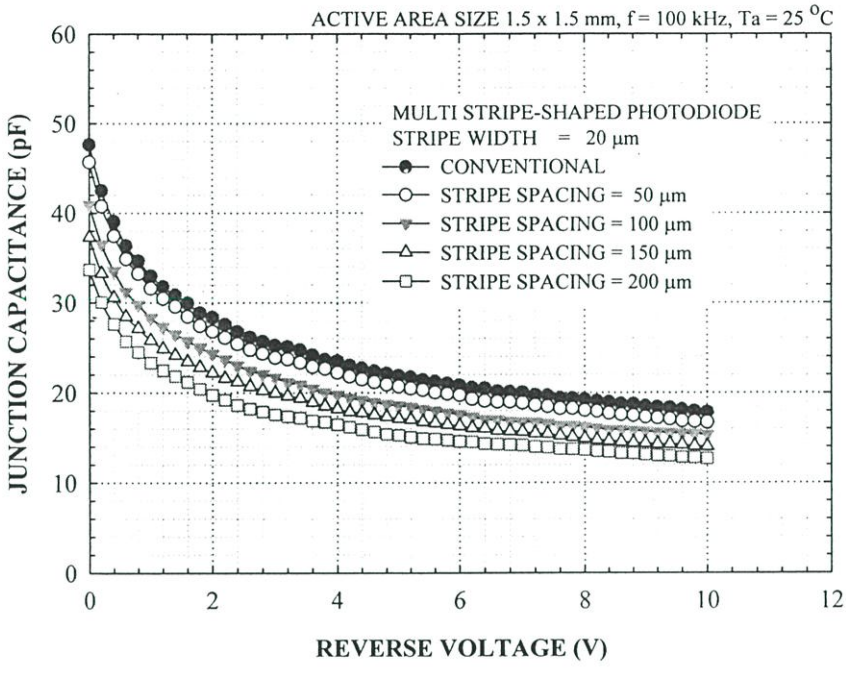
เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิควอนตัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง (W) 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ (S) 150 μm จะเห็นว่ามีประสิทธิควอนตัมสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในความคลื่นช่วง 400- 700 nm สูงกว่า 80 % ดังแสดงในรูปที่ 5.21 จากที่กล่าวแล้วว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ เป็นโครงสร้างที่ถูกพัฒนาโดยการนำชั้นอินทรินซิค ซึ่งเป็นพื้นที่ไวแสงและมีสนามไฟฟ้า ขึ้นมารับแสงโดยตรง ด้วยการเปิดชั้นหน้าต่างรับแสงพีออกเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ ดังนั้นความไวแสงของโฟโตไดโอดจึงมากขึ้น เพราะว่ามีบริเวณปลอดพาหะอยู่ที่ผิว จึงสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นได้ดี ทำให้สามารถจ่ายกระแสแสงได้มากขึ้น จากสาเหตุที่กล่าวมาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ จึงมีประสิทธิควอนตัมสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งในความคลื่นช่วง 400- 700 nm และสูงกว่าโครงสร้างธรรมดา



รูปที่ 5.21 ประสิทธิควอนตัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

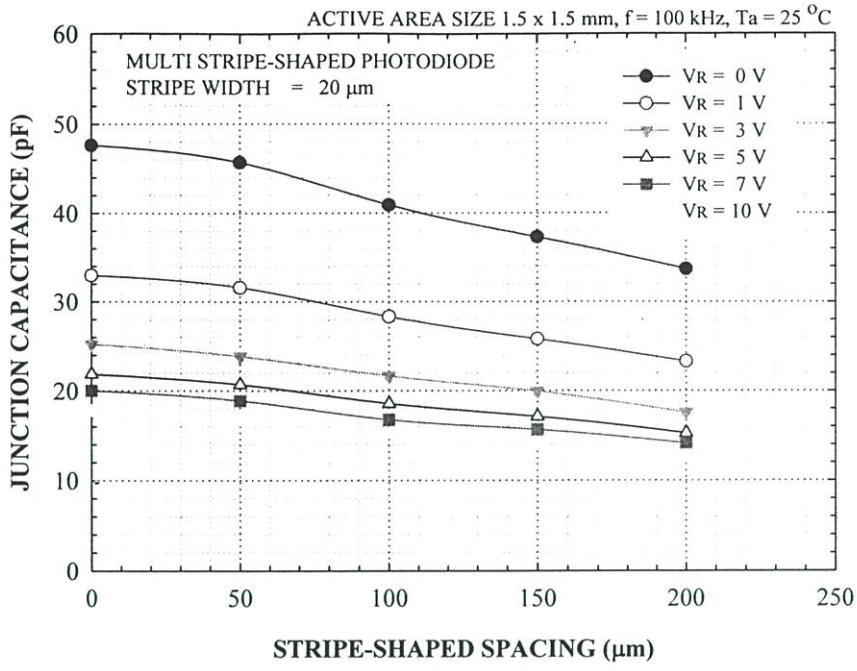
5.1.5 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 50, 100, 150 และ 200 μm แสดงดังในรูปที่ 5.22



รูปที่ 5.22 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด เมื่อระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี และแรงดันไบอัสค่าต่าง ๆ

ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อของโฟโตไดโอดจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส โดยที่โฟโตไดโอดโครงสร้างแบบธรรมดามีค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อสูงกว่าแบบแนวตั้งหลายแถบ แต่ไม่ต่างกันมากนัก และมีแนวโน้มลดลงตามระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่ระยะห่างระหว่างแถบ 50, 100, 150 และ 200 μm และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 0 V ความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าเท่ากับ 45, 40, 37 และ 33 pF ตามลำดับ นอกจากค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อของโฟโตไดโอดจะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสแล้ว ยังเปลี่ยนแปลงกับพื้นที่รอยต่อ ดังนั้นเมื่อระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีเพิ่มมากขึ้นทำให้พื้นที่รอยต่อลดลง มีผลให้ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อของโฟโตไดโอดลดลงตามระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี และสามารถเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ารอยต่อกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีค่าต่าง ๆ ดังในรูปที่ 5.23



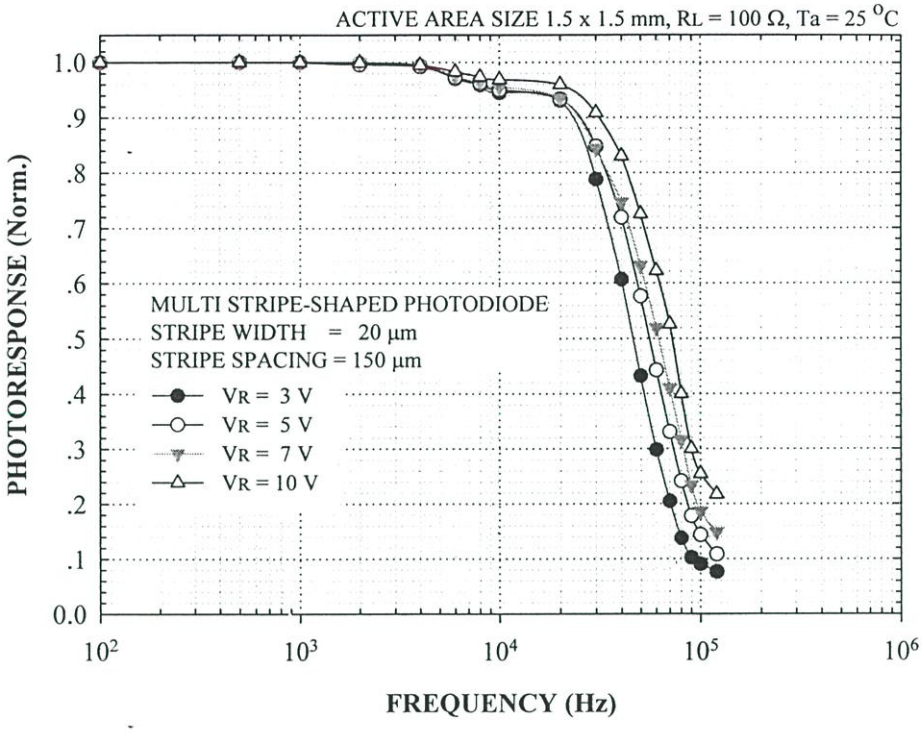
รูปที่ 5.23 ความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ารอยต่อกับระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีค่าต่าง ๆ

จากกราฟรูปที่ 5.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ารอยต่อ พบว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบมีค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อ น้อยกว่าแบบธรรมดา ซึ่งน่าจะส่งให้โฟโตไดโอดมีความเร็วในการทำงานสูงขึ้น เพราะค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อเป็นตัวแปรหนึ่งที่กำหนดค่าคงที่ทางเวลา (RC time constant) ของไดโอด

5.1.6 การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอด

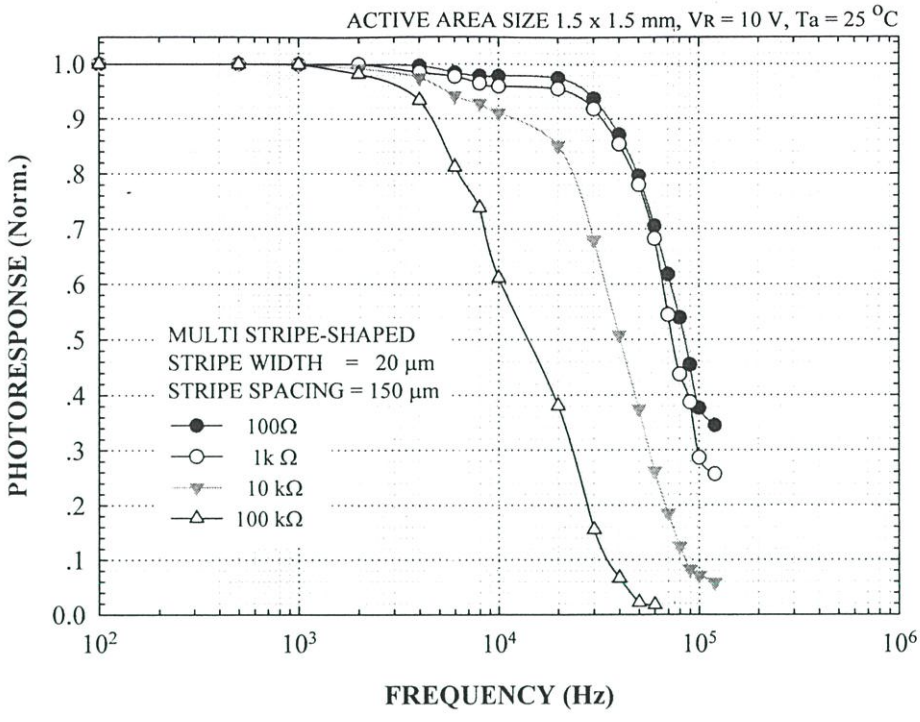
ในการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอดเป็นสิ่งที่สำคัญ เพราะจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์ใช้งานโฟโตไดโอดในส่วนของความเร็วในการทำงาน และเชื่อมโยงไปถึงแบนด์วิทของอุปกรณ์ ดังนั้นในหัวข้อนี้จะนำเสนอผลวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอด โดยการป้อนสัญญาณความถี่ค่าต่างๆ เข้ากับแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm กำลังงาน 2.8 mW ส่งผ่านไปยังโฟโตไดโอดที่ถูกต่ออนุกรมอยู่กับตัวต้านทาน และที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับไว้ วัดสัญญาณเอาต์พุตด้วยออสซิลโลสโคป จากนั้นนำข้อมูลมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของสัญญาณเอาต์พุตในลักษณะนอร์มอไลซ์ (Normalize) กับความถี่

รูปที่ 5.24 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอด เมื่อต่อโหลดความต้านทานอนุกรม 100 Ω และเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสให้มีค่าเท่ากับ 3V, 5V, 7V และ 10 V ตามลำดับ พบว่าความถี่คัทออฟจะมีเพิ่มขึ้นจาก 25, 32, 40 และ 53 kHz ตามลำดับ



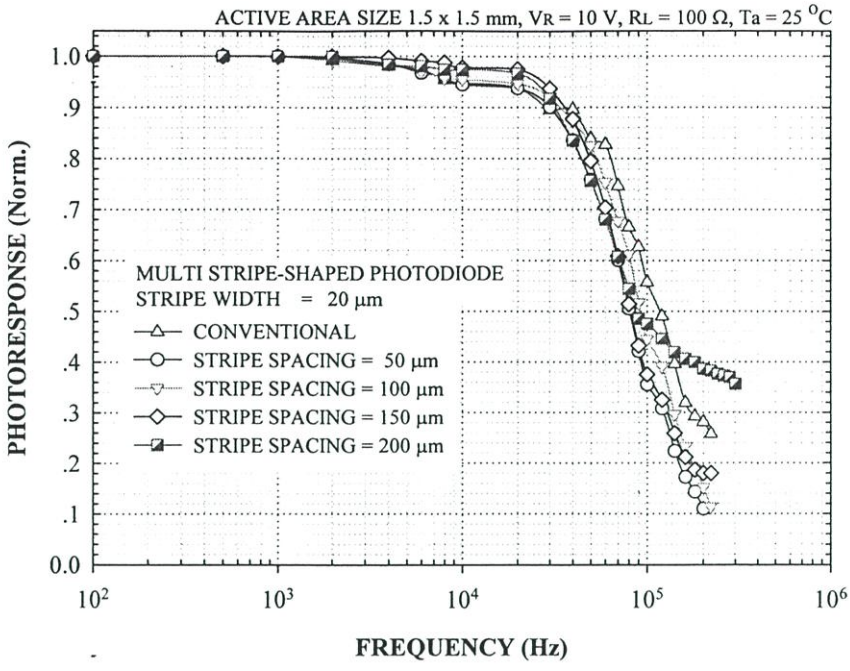
รูปที่ 5.24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เกิดจากผลของแรงดันไบอัส

เพื่อศึกษาผลของโหลดความต้านทานอนุกรม โดยการเปลี่ยนแปลงความต้านทานให้มีค่า 100, 1k, 10k และ 100kΩ ตามลำดับ และป้อนแรงดันไบอัสคงที่เท่ากับ 10 V ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอด จะลดลงอย่างชัดเจนเมื่อความต้านทานมีค่ามากขึ้น ความถี่คัทออฟจะมีลดลงจาก 53, 47, 18 และ 4 kHz ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5.25



รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เกิดจากผลของความต้านทานอนุกรม

การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแบบธรรมดา และแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 50, 100, 150 และ 200 μm ตามลำดับ ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เกิดจากผลระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีค่าต่าง ๆ ในรูปที่ 5.26 จะเห็นได้ว่าความถี่คัทออฟที่เงื่อนไขต่างๆ ไม่ต่างกันมากอยู่ในช่วง 47 ถึง 58 kHz จากการทดลองนี้ ทำให้ทราบว่าผลตอบสนองเชิงความถี่ซิลิคอนโฟโตไดโอด ขึ้นอยู่กับตัวแปรต่างๆ ทั้ง แรงดันไบอัสเนื่องจากความเร็วในการตอบสนองของโฟโตไดโอดนั้นขึ้นแปรผกผันกับผลคูณของค่าความต้านทานกับค่าความจุไฟฟ้า (RC Time Constant) ดังนั้นเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสให้สูงขึ้นจะทำให้เขตปลอดพาหะขยายขึ้น ส่งผลให้ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง รวมถึงความเข้มสนามไฟฟ้าซึ่งทำให้ความถี่คัทออฟจะมีค่าเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ผลของเวลาเคลื่อนที่ของพาหะข้ามชั้น i ด้วย



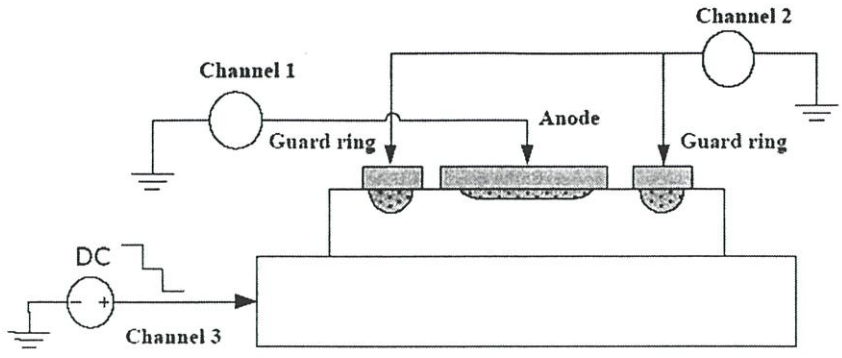
รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เกิดจากผลระยะห่างระหว่างแถบชนิดพีค่าต่าง ๆ

5.2 การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง เพื่อศึกษาผลของการ์ดริง (guard ring) ที่ล้อมรอบโฟโตไดโอดว่ามีเป็นอย่างไรต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โดยผลการทดลองศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าพื้นฐานของโฟโตไดโอด ผลของระยะห่างระหว่างการ์ดริงกับโฟโตไดโอด ผลของความกว้างการ์ดริง และอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด โดยมีรายละเอียดดังนี้

5.2.1 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

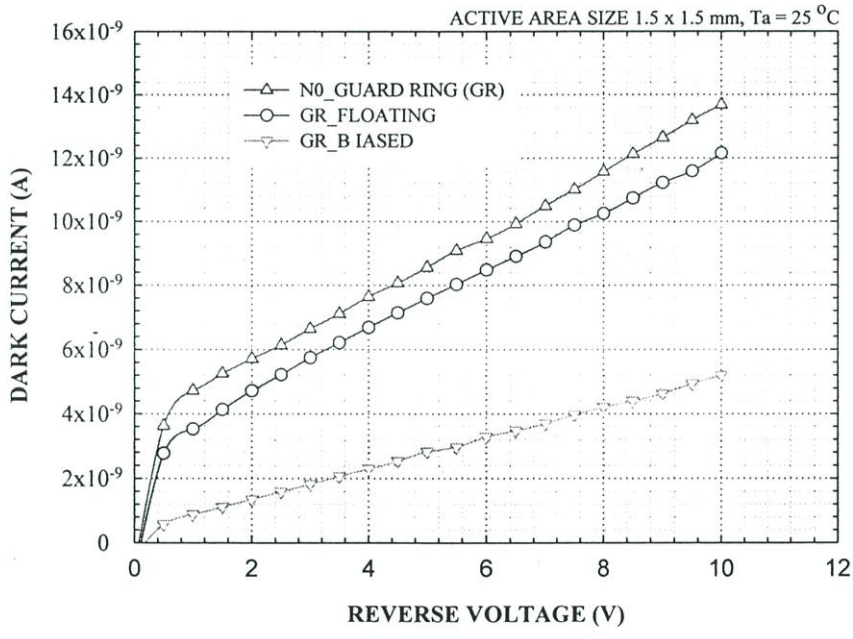
การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเพื่อศึกษาผลของการ์ดริง โดยวัดเปรียบเทียบกับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ (ไม่มีการ์ดริง) การวัดกระแสมืดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง วงจรวัดกระแสมืดของโฟโตไดโอดแสดงดังในรูปที่ 5.27 ขั้วแอโนดต่อกับแรงดัน 0 V และฐานรองป้อนแรงดันไบอัสค่าสูง และเปลี่ยนแรงดันจาก 0 V ถึง 10 V เงื่อนไขการวัดเปรียบเทียบกับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ กับ แบบแนวตั้งเพื่อศึกษาผลของการ์ดริง ทั้งขณะปล่อยลอยการ์ดริง และได้รับไบอัส



รูปที่ 5.27 วงจรวัดกระแสมืดของโฟโตไดโอด

5.2.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง

เพื่อการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเพื่อศึกษาผลของการ์ดริง ในรูปที่ 5.28

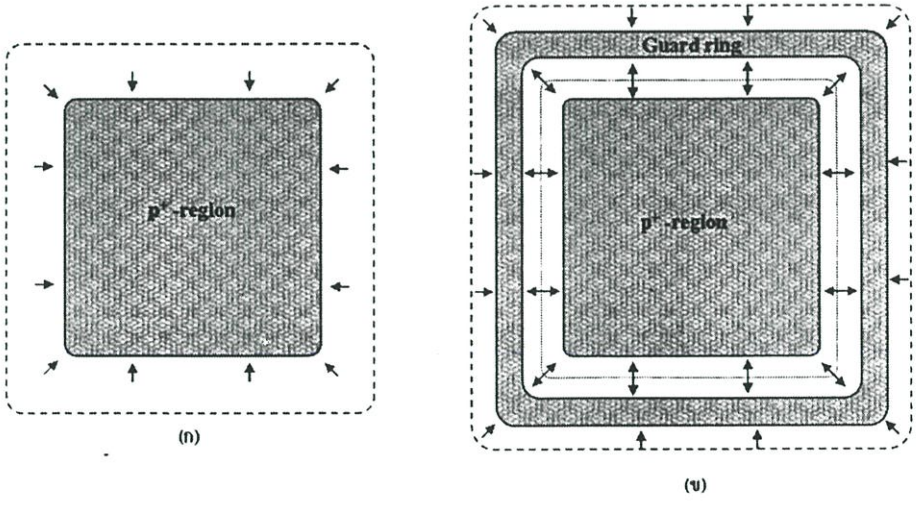


รูปที่ 5.28 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด ขณะไม่ ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยเปรียบเทียบกับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ และแบบแนวตั้งเพื่อศึกษาผลของการ์ดริง สังเกตุเห็นว่ากระแสมืดของโฟโตไดโอดยังเพิ่มตามแรงดันไบอัส

ย้อนกลับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้ไดโอดมากขึ้น มีผลให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น เนื่องจากกระแสมืดส่วนใหญ่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ ส่งผลให้กระแสมืดเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสย้อน

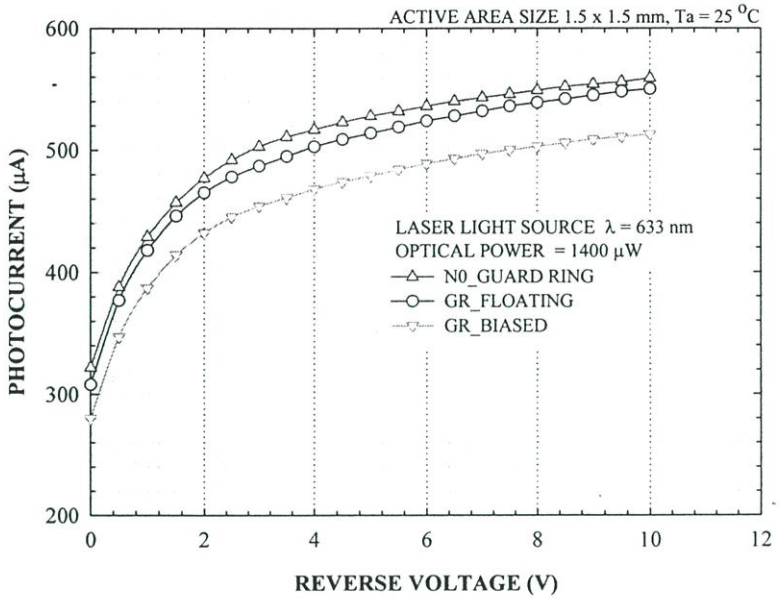
พิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V แบบแนวตั้งแบบปกติมีค่ากระแสมืดเท่ากับ 14 nA ส่วนแบบแนวตั้งขณะที่การ์ดริงปล่อยลอย มีค่ากระแสมืด 12 nA และขณะที่การ์ดริงได้รับไบอัส มีค่ากระแสมืดต่ำเพียง 5 nA ตามลำดับ กระแสมืดโฟโตไดโอดขณะที่การ์ดริงได้รับไบอัส มีค่ากระแสต่ำกว่าประมาณครึ่งหนึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับ กระแสมืดแบบแนวตั้งแบบปกติ และแบบแนวตั้งการ์ดริงปล่อยลอย หน้าที่สำคัญของการ์ดริง คือการลดกระแสมืดของโฟโตไดโอด โดยโฟโตไดโอดที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้โฟโตไดโอด กระแสมืดส่วนใหญ่นอกบริเวณพื้นที่ไวแสง หรือบริเวณขอบนอกของไดโอดจะไหลไปยังการ์ดริง ดังแสดงในรูปที่ 5.29 กลไกที่ช่วยลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดชนิด PIN โดยแสดงเปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง และโครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัส ในกรณีของโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่ไม่มีการ์ดริง กระแสมืดส่วนใหญ่นอกบริเวณพื้นที่ไวแสงจะไหลไปยังไดโอดทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 5.29 (ก) จึงมีผลให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าสูงกว่ากรณีโครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้โฟโตไดโอด โดยกลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของกระแสมืด คือ เมื่อชั้นการ์ดริง p^+ ได้รับแรงดันไบอัสสนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอดจะถูกเบี่ยงเบน ให้มีทิศทางไปยังการ์ดริง ส่งผลให้พาหะที่จะก่อให้เกิดกระแสมืดที่เกิดในเนื้อสาร และระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 เคลื่อนที่ไปยังการ์ดริงแทนที่จะไปยังโฟโตไดโอด ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริงมีค่าลดลง



รูปที่ 5.29 กลไกที่ช่วยลดกระแสมืดของโฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) โครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง (ข) โครงสร้างที่มีการ์ดริง และการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัส

5.2.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

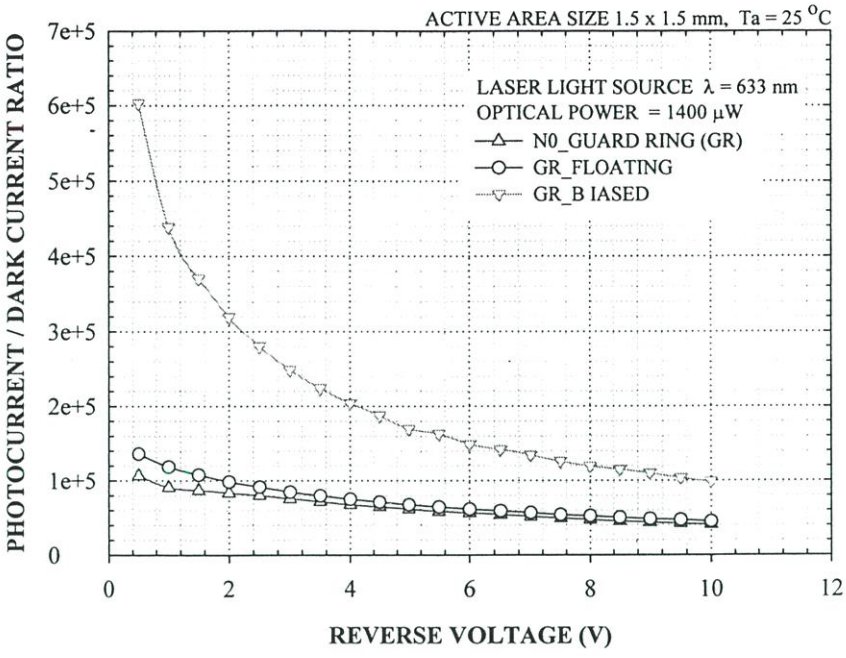
การทดสอบคุณสมบัติของของโฟโตไดโอด เพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง ใช้ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ สำหรับลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่ความเข้มความเข้มแสง 1400 μW แสดงดังในรูปที่ 5.30



รูปที่ 5.30 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงของไดโอดแบบไม่มีการ์ดริง การ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส

จากกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V โฟโตไดโอดแบบแนวตั้งแบบปกติมีค่ากระแสแสงได้ 558 μA ส่วนแบบแนวตั้งขณะที่การ์ดริงปล่อยลอย มีค่ากระแสแสง 549 μA และขณะที่การ์ดริงได้รับไบอัส มีค่ากระแสแสงลดลงเหลือ 512 μA ตามลำดับ กระแสแสงของโฟโตไดโอดขณะที่การ์ดริงได้รับไบอัส มีค่ากระแสต่ำกว่า กระแสแสงแบบแนวตั้งแบบปกติ และแบบแนวตั้งการ์ดริงปล่อยลอย โดยกระแสแสงที่ลดลงนั้นเกิดจากกลไกเดียวกันกับการลดลงของกระแสมืด คือ เมื่อชั้นการ์ดริง p^+ ได้รับแรงดันไบอัสสนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอดจะถูกเบี่ยงเบน ให้มีทิศทางไปยังการ์ดริง ส่งผลให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดจากแสงบางส่วน เคลื่อนที่ไปยังการ์ดริงแทนที่จะไปยังโฟโตไดโอด ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริงมีค่าลดลง แต่เมื่อหาอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดของโฟโตไดโอดทั้งสาม กลับพบว่า อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดขณะที่การ์ดริงได้รับไบอัสมีค่าสูงสุด เท่ากับ 6 x 10^5 เท่า ซึ่งถือว่าเป็นโฟโตไดโอดที่ดีกว่า เพราะถ้าสัญญาณรบกวน

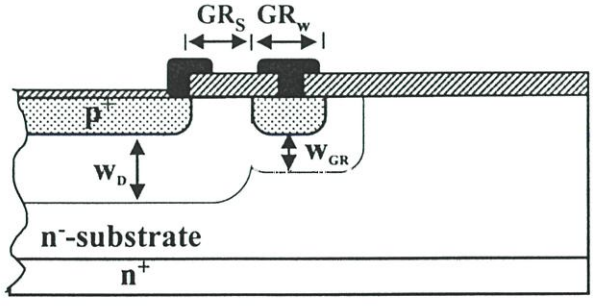
ลดลงได้ทำให้ความไวแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอัตราส่วน *S/N* มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.31



รูปที่ 5.31 อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ของไดโอดแบบไม่มีการ์ดริง การ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส

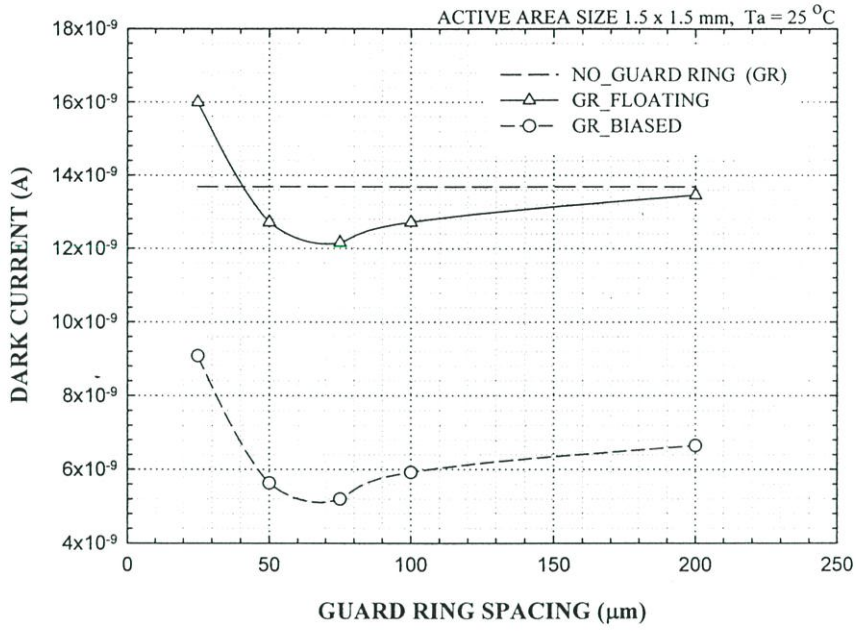
5.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างการ์ดริงกับโฟโตไดโอด

ในการทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของตำแหน่งการ์ดริง ที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด ซึ่งมีการ์ดริงล้อมรอบ ถูกออกแบบให้มีความกว้างของการ์ดริง (GR_w) เท่ากับ 100 μm และระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง(GR_S) มีค่า 25, 50 ,75 ,100 และ 200 μm ตามลำดับ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริง แสดงในรูปที่ 5.32



รูปที่ 5.32 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริง

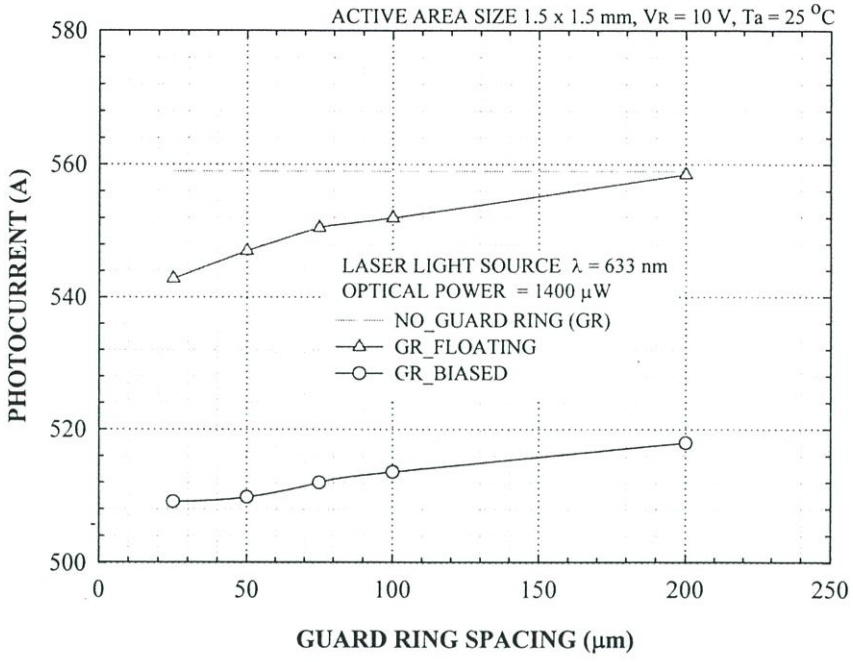
โดยการทดลองได้เปรียบเทียบทั้งกระแสมืด และกระแสแสง ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ (ไม่มีการ์ดริง) และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ด ในรูปที่ 5.33 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง ที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสมืดจะน้อยที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริงเท่ากับ 75 μm ทั้งกรณีการ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส ทั้งอาจจะเกิดจากระยะดังกล่าวการเลี้ยวเบนสนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอด มีค่าเหมาะสมที่สุด



รูปที่ 5.33 ค่ากระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างการ์ดริงค่าต่างๆ

เพื่อศึกษาการเพิ่มของกระแสแสง และหาเงื่อนไขเหมาะสมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ด โดยได้เปรียบเทียบกระแสแสงระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ (ไม่มีการ์ดริง) และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ด ซึ่งความกว้างการ์ดริง (GR_W) เท่ากับ 100 μm และระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง (GR_S) มีค่า 25, 50 ,75 ,100 และ 200 μm ตามลำดับ ทั้งที่การ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส ใช้ He-Ne เลเซอร์เป็นแหล่งกำเนิดแสง และมีความเข้มแสง 1400 μW ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ดังในรูปที่ 5.32 กระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้ม 1400 μW มีระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริงค่าต่างๆ จะเพิ่มขึ้นกับระยะห่างระหว่างการ์ดริงที่เพิ่มขึ้น และโฟโตไดโอดจะจ่ายกระแสแสงมากที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 200 μm เมื่อชั้น p^+ การ์ดริง มีตำแหน่งที่ห่างจากโฟโตไดโอดมากขึ้น ทำให้การเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอด

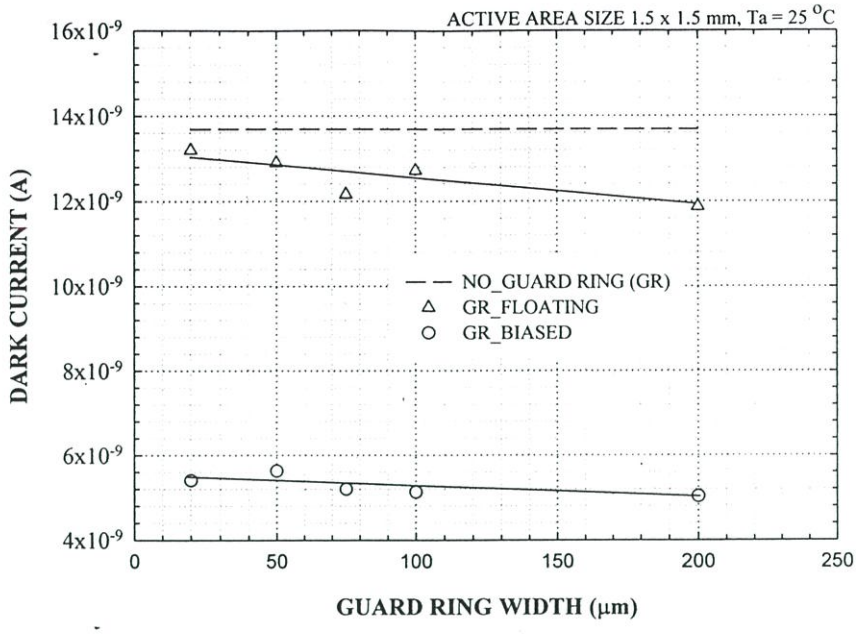
ไปยังการ์ดริงลดลง ส่งผลให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดจากแสงเคลื่อนที่ไปยังการ์ดริงลดลง กระแสแสงของโฟโตไดโอดจึงเพิ่มตามระยะระหว่างการ์ดริงกับไดโอดที่มากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.34



รูปที่ 5.34 ค่ากระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างการ์ดริงค่าต่างๆ

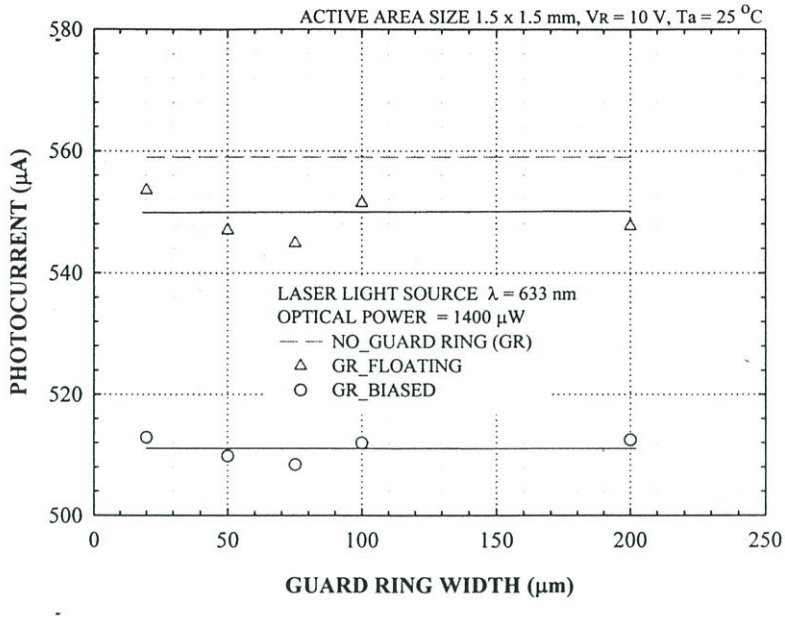
5.2.3 ผลของความกว้างการ์ดริง

ในการทดลองนี้เพื่อศึกษาผลของความการ์ดริง ที่มีต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด ซึ่งมีการ์ดริงล้อมรอบ ถูกออกแบบให้ระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง(GR_S) มีค่าคงที่ 100 μmและความกว้างของการ์ดริง (GR_W) เท่ากับ 25, 50 ,75 ,100 และ 200 μm ตามลำดับ โดยการทดลองได้เปรียบเทียบทั้งกระแสมืด และกระแสแสง ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ (ไม่มีการ์ดริง) และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ด ในรูปที่ 5.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง ที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสมืดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความกว้างของการ์ดริงเพิ่มขึ้น ทั้งกรณีการ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส แต่กระแสมืดลดลงไม่มากนัก



รูปที่ 5.35 ค่ากระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ความกว้างค่าต่างๆ

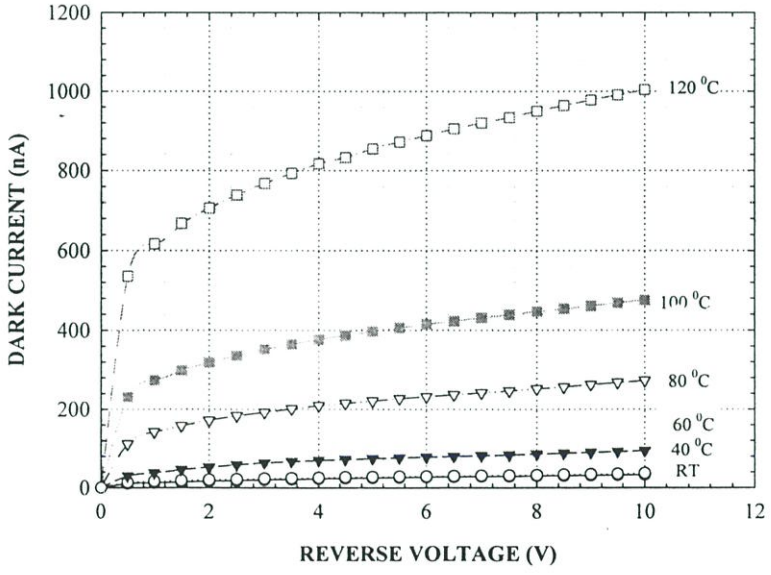
เพื่อศึกษาการเพิ่มของกระแสแสง และหาเงื่อนไขเหมาะสมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ด โดยได้เปรียบเทียบกระแสแสงระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ (ไม่มีการ์ดริง) และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ด ซึ่งระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริง(GR_S) มีค่าคงที่ 100 μm และความกว้างของการ์ดริง (GR_W) เท่ากับ 25, 50 ,75 ,100 และ 200 μm ตามลำดับ ทั้งที่การ์ดริงปล่อยลอย และได้รับไบอัส ใช้ He-Ne เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง และมีความเข้มแสง 1400 μW ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ดังในรูปที่ 5.36 กระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้ม 1400 μW ที่ความกว้างการ์ดริงค่าต่างๆ ไม่เปลี่ยนแปลงกับความกว้างการ์ดริง เนื่องจากความกว้างของการ์ดริงเพิ่มขึ้น แต่ระยะห่างระหว่างไดโอดกับการ์ดริงมีค่าคงที่ จึงทำให้การเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอดไปยังการ์ดริงมีเกือบค่าคงที่ด้วย ส่งผลให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดจากแสงเคลื่อนที่ไปยังการ์ดริงค่าคงที่ กระแสแสงของโฟโตไดโอดจึงไม่เปลี่ยนแปลงกับความกว้างการ์ดริงที่มากขึ้น



รูปที่ 5.36 ค่ากระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างการ์ดริงค่าต่างๆ

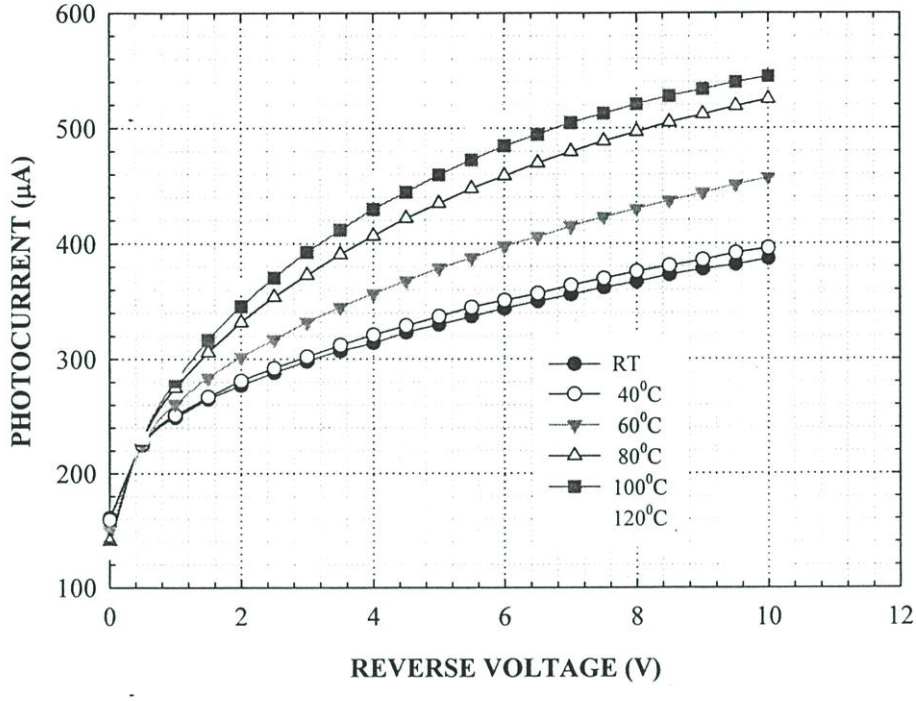
5.2.4 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด

เพื่อการนำไปใช้งานในอุณหภูมิที่เหมาะสม ดังนั้นจึงได้ทำการหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-แรงดันของโฟโตไดโอด ที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ดังรูปที่ 5.37



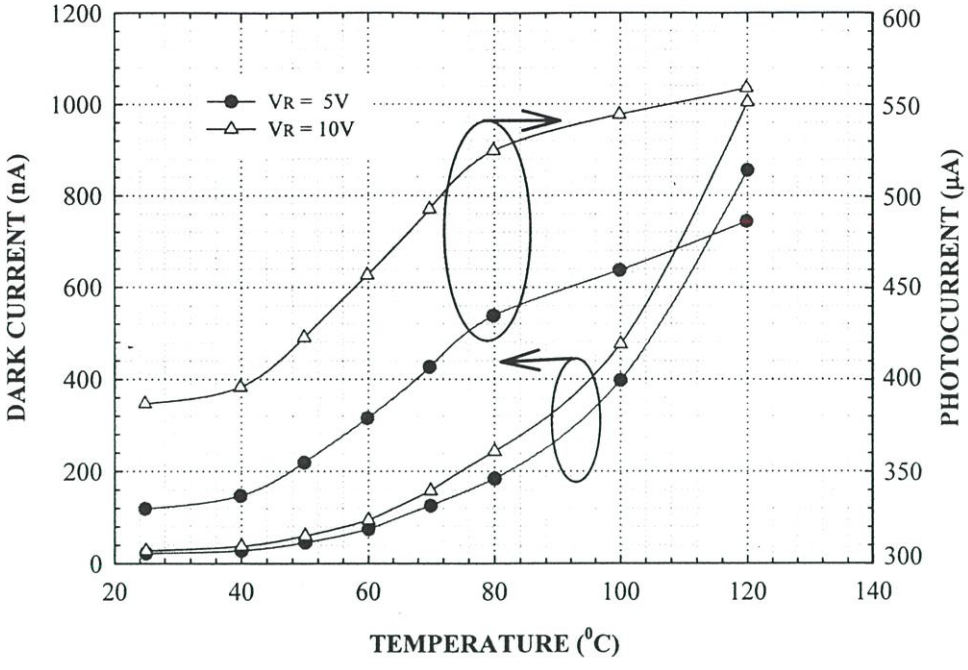
รูปที่ 5.37 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด-แรงดันของโฟโตไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

แสดงให้เห็นว่าโฟโตไดโอดชนิดนี้มีขีดจำกัดในการใช้งานคือ อุณหภูมิในการใช้งานซึ่งจากผลการทดลองพบว่าควรใช้งานโฟโตไดโอดนี้ที่อุณหภูมิห้อง (25 ^{o}C) เนื่องจากที่อุณหภูมิดังกล่าวนั้น โฟโตไดโอดจะมีค่ากระแสมืดที่ต่ำส่งผลให้สามารถแยกแยะสัญญาณที่แท้จริงออกจากสัญญาณรบกวนได้ และกระแสมืดจะมีค่าสูงขึ้นจาก 28 nA เป็น 1004 nA เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจาก 25^{o}C เป็น 120^{o}C ที่แรงดัน 10 V ส่วนกระแสแสงนั้นก็เช่นกัน เมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นกระแสแสงเพิ่มขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดที่อุณหภูมิค่าต่างๆ

เมื่อเขียนกราฟกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด และกระแสแสง กับอุณหภูมิที่โฟโตไดโอดได้รับ ดังรูปที่ 5.39 พบว่ากระแสมืดจะเพิ่มขึ้น 1.5 เท่าทุกๆ 10 ^{o}C เนื่องจากเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นโอกาสการเกิดคู่พาหะจากความร้อนมีมากขึ้น มีผลให้กระแสมืดเพิ่มขึ้น ส่วนกระแสแสงมีอัตราการเพิ่มสูงในช่วงอุณหภูมิ 40 ^{o}C ถึง 80 ^{o}C แต่เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 80 ^{o}C อัตราการเพิ่มลดลง ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นสภาพคล่องตัวของคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล มีค่าลดลง ส่งผลให้กระแสแสงมีค่าลดลง



รูปที่ 5.39 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด และกระแสแสง กับอุณหภูมิของโฟโตไดโอดที่แรงดันค่าต่างๆ

5.3 การศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งสำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์

ในปัจจุบันการพัฒนาทางด้านตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ได้เจริญก้าวหน้าไปมากในต่างประเทศ เนื่อง จากการนำประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ ไม่ว่าด้านการแพทย์ การรักษาความปลอดภัย และทางอุตสาหกรรม ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งสำหรับตรวจวัดรังสีเอกซ์ [2],[3],[4],[27],[28],[29] เพื่อเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาและก่อให้เกิดผลในเชิงกว้างต่อการพัฒนาเทคโนโลยีทางด้านนี้ต่อไป

5.3.1 บทนำ [30]

รังสีเอกซ์ คือ รังสี หรือ แสงชนิดหนึ่งที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า เช่น เดียวกับแสงสว่างธรรมดา รังสีเอกซ์นี้มีลักษณะเป็นทั้งคลื่นและอนุภาคของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงคลื่นสั้นมาก ความยาวช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.04-1000 อังสตรอม หรือ อยู่ระหว่างรังสีแกมม่า กับรังสีอุลตร้าไวโอเล็ต คุณสมบัติของรังสีเอกซ์ คล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาเป็นส่วนใหญ่ แต่คุณสมบัติพิเศษของมัน คือ มีอำนาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆ ได้มากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับ ความแน่นทึบ และ

น้ำหนักอะตอมของวัตถุที่มันผ่าน นอกจากนั้น ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งทางเคมีชีวะและอื่น ๆ อีกด้วย

5.3.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอกซ์

ผู้ที่ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรก คือ นักฟิสิกซ์ชาวเยอรมัน ชื่อ วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น (Wilhelm Conrad Roentgen) การพบนี้เกิดขึ้นในตอนเย็น ของวันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ.1895 ภายในห้องทดลอง ณ มหาวิทยาลัยวูซบรุค (Wurzburg) ประเทศเยอรมัน



รูปที่ 5.40 วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น ผู้ที่ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรก เมื่อปี ค.ศ. 1985

เรินท์เก้นได้พบรังสีเอกซ์โดยบังเอิญ คือ ขณะที่เขากำลังทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่อง "Absorption of cathode rays" โดยใช้หลอดทดลองที่เรียกว่า Crooke's tube เขาสังเกตเห็นว่า Cathdes rays ที่ออกมาจากหลอดทดลอง ทำให้กระดาษแข็งที่ฉาบด้วย แบเรี่ยมปลาติโนไซยาไนด์ (Barium platinocyanide) เกิดเรืองแสง (Fluoresec) ขึ้น ระยะไกลที่สุด ที่ยังมีการเรืองแสงบนกระดาษแข็ง คือ 120 เซนติเมตร ในขณะเดียว กันเขาสังเกตเห็นอีกว่า ตัวอักษร A ที่ทาด้วยแบเรี่ยมปลาติโนไซยาไนด์ อยู่ห่างออกไปเกือบสิบฟุตเกิดเรืองแสงขึ้นด้วย ทั้ง ๆ ที่ไม่อยู่ในระยะของ Cathode rays เรินท์เก้นจึงคิดว่า เขาได้ค้นพบรังสีชนิดใหม่ขึ้นแล้ว และให้ชื่อว่า "X-rays" และเขาได้ใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ต่อมา ทำการสังเกตถึงการทะลุทะลวง (Penetration) ของรังสีเอกซ์ผ่านกระดาษ ผ่านโลหะ และแม้กระทั่งผ่านเนื้อหนังของคน และเขาได้ถ่ายภาพรังสี ของมือของภรรยาเขาไว้ด้วย ในที่สุดเขาจึงประกาศให้โลกได้รู้ว่า เขาได้ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรก



รูปที่ 5.41 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ภาพแรกซึ่งเป็นภาพถ่ายมือภรรยาของวิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น

5.3.1.2 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอกซ์

1. เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีช่วงคลื่นสั้นมาก คืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.04-1000 A หรืออยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมม่า กับ รังสีอุลตร้าไวโอเล็ต

2. มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เป็นต้นว่า เดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสูญญากาศแล้ว เดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ $3x10^{10}$ เซนติเมตร/วินาที นอกจากนั้นแล้ว ยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และ เบี่ยงเบนได้ เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา

3. ไม่หักเหโดยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า

4. เกิดจาการที่อนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งไปชนเป้า (Target) อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้ จะไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ที่อยู่ในวงโคจรของอะตอม ของเป้า ให้หลุดกระเด็น ออกนอกวงโคจร

5. ทำให้เกิดการเรืองแสง (Fluorescence และ Phosphorescence) ในสารพิเศษบางอย่าง

6. ดูดกลืน (Absorbed) โดยสสาร (Matter) ทุกชนิดมากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และน้ำหนักของอะตอมของสสารนั้น

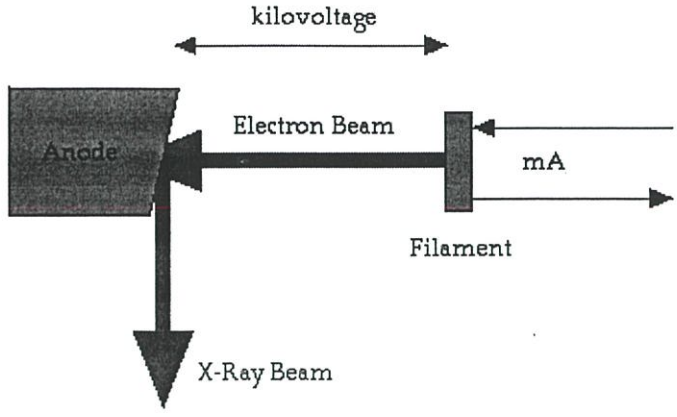
7. ทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า (Ionization) เมื่อผ่านไปในอากาศหรือก๊าซ

8. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อรังสีเอกซ์ไปถูกฟิลม์ถ่ายรูปจะทำให้ฟิล์มนั้นดำ จึงนำผลอันนี้มาใช้ในการบันทึกภาพรังสีลงบนแผ่นฟิล์มรังสีเอกซ์

9. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ เป็นต้นว่า ทำให้เซลล์ของร่างการเปลี่ยนแปลงหรือ เกิดการผ่าเหล่า (Genetic mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็น จำนวนมาก และนานพอ

10. มีอำนาจในการทะลุทะลวง (Penetration) สูง สามารถทะลุผ่าน เนื้อหนังของมนุษย์และ สัตว์ได้แต่ไม่สามารถทะลุผ่าน แผ่นตะกั่ว หรือคอนกรีต หนาๆ ได้

5.3.1.3 การเกิดรังสีเอกซ์



รูปที่ 5.42 ลักษณะการเกิดรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เกิดขึ้นโดยที่อนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงไปชนเป้า (Target) ผลทำให้เกิดเป็นรังสีเอกซ์และความร้อน การเกิดของรังสีเอกซ์นี้อาศัยองค์ประกอบสำคัญ 5 ประการ คือ

1. ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน หรือ การแยกอิเล็กตรอนนอกจากอะตอมของโลหะ อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้น หรือแยกจากอะตอม ของโลหะ ที่ทำเป็นไส้หลอดรังสีเอกซ์ โดยการที่เราผ่านกระแสไฟฟ้า เข้าไปในไส้หลอด (Filament) จนกระทั่ง ไส้หลอดร้อนขึ้น ประมาณ 2000 ^{o}C หรือมากกว่านั้น จะมีผลทำให้เกิดเทอร์มิโอนิคอิมิชั่น (Thermionic Emission) คือ อิเล็กตรอนหลุดออกจากเซลล์ หรือวงโคจรของมัน เมื่อถูกความร้อนอิเล็กตรอนที่หลุดอกมานี้ จะมาออกันอยู่รอบๆ ผิวหน้าของโลหะ จนกลายเป็นกลุ่ม (Cloud) เรียกว่า Space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอน ไม่สามารถหลุดพ้น ไปจากผิวหน้าโลหะ เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่าง อิเล็กตรอน และอะตอม ของโลหะยังมีอยู่

2. การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุด และเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง

- วิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมไปได้ คือ ต้องหาสิ่งที่มีพลังงานหรือแรงดึงดูด มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน กับอะตอมของโลหะ มาดึงดูดอิเล็กตรอน สิ่งนั้นก็ คือ ไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) ไฟฟ้าแรงสูงนี้ นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของโลหะแล้ว ยังทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือวิ่งไปด้วยความเร็วสูง กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ ต้องทำให้ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวก และขั้วลบให้ต่างกัน ความต่างศักย์นี้ ถ้ายิ่งมีค่ามากขึ้นเท่าใด ก็ยิ่งทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของไส้หลอดได้มาก และวิ่งไปด้วยความเร็วสูงขึ้น ความต่างศักย์ 100 kV จะทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็ว เท่ากับประมาณ 165 กิโลเมตรต่อวินาที
- การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไป ต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง
- จึงจะทำให้ อิเล็กตรอนวิ่งไป ด้วยความเร็วสูง

- ดังนั้น ภายในหลอดรังสีเอกซ์ จึงเป็นสูญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศ หรือก๊าซอยู่ภายในหลอด แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลง เนื่องจากเกิดไอออนไนเซชั่น (Ionization)

4. การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้ม (Concentration of electron)

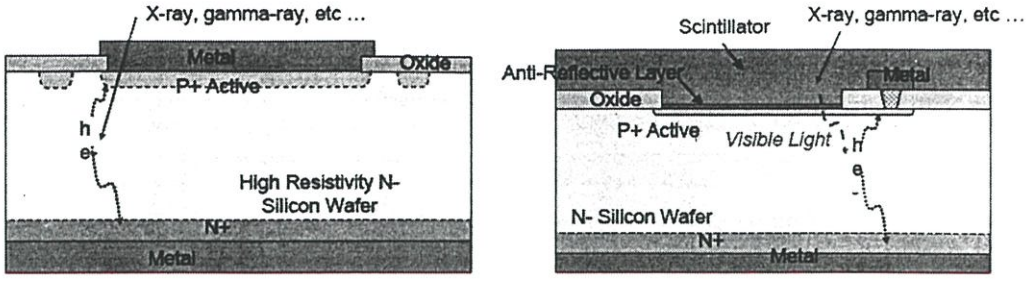
- จะต้องมีวิธีการที่จะให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางเดียวกัน คือ พุ่งไปหาจุดโฟกัสของเป้าด้วยปริมาณ (ความเข้ม) ที่มากพอสมควร ซึ่งทำให้ได้โดยการใช้ เครื่องมือที่เรียกว่า "Electron focusing device" คอยควบคุม ให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ ไปตกในบริเวณจุด โฟกัสของเป้า

5. การทำให้อิเล็กตรอนหยุดวิ่งในทันทีทันใด

- การที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งมาด้วยความเร็วสูง นี้หยุดวิ่ง ในทันทีทันใด ทำได้โดยหาวัตถุมากั้น หรือขวางอิเล็กตรอนวัตถุนั้นก็คือ เป้า (Target) ผลที่เกิดขึ้น คือ เกิดการชน หรือกระทบกันระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าอย่างแรง อิเล็กตรอนดังกล่าว จะไปชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจร ของอะตอมของเป้านั้น ให้หลุดกระเด็นออกนอกวงโคจร และจะมีอิเล็กตรอนจากวงโคจรอื่นๆ ที่อยู่ถัดไป วิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจาก พลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจร จะไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปของรังสีเอกซ์ และความร้อน (ส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนมากกว่า) กล่าวคือ จากพลังงานของอิเล็กตรอนทั้งหมด ที่วิ่งไปสู่เป้านั้น 99.8% จะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2 % เป็นรังสีเอกซ์

5.3.2 การทดลอง

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ใช้กันทั่วไป เช่น ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN มีวิธีการตรวจจับ 2 วิธี [3] คือ 1) วิธีการทางตรง (Direct method) ซึ่งตัวไดโอดจะดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอ็กซ์โดยตรง และทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น 2) วิธีการทางอ้อม (Indirect method) เป็นการฉายรังสีเอ็กซ์ให้ไดโอดโดยผ่านชั้นสารเรืองแสง [31] (phosphor/scintillator layer) ชั้นสารเรืองแสงจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์แล้วมีการเรืองแสง ปล่อยคลื่นแสงย่านสายตามองเห็นออกมา แสงนี้ตกกระทบลงไปยังพื้นที่รับแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอด ไดโอดจะดูดกลืนคลื่นแสง และทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 5.43 การฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมผ่านชั้นสารเรืองแสง จะทำให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูงกว่ากรณีการฉายรังสีแบบโดยตรง เนื่องจากซิลิคอนสามารถดูดกลืนคลื่นที่มีความถี่ในช่วงแสงได้ดีกว่าคลื่นความถี่ในช่วงของรังสีเอ็กซ์นั่นเอง

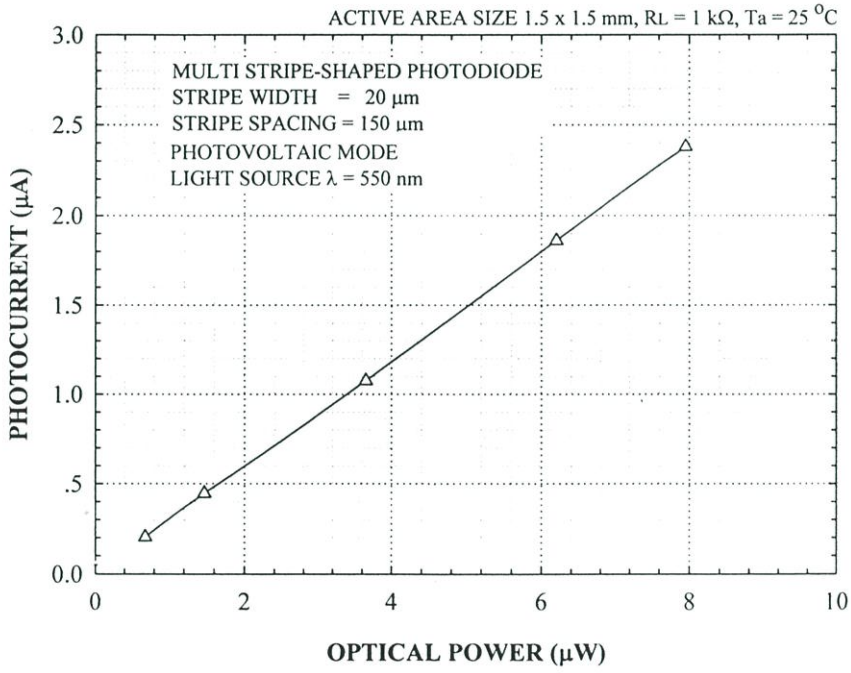


(ก) (ข)

รูปที่ 5.43 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจจับรังสีแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง (ก) วิธีการทางตรง (ข) วิธีการทางอ้อม

5.3.2.1 ความเป็นเชิงเส้นของกระแสแสงในโหมดโฟโตโวลตาอิก

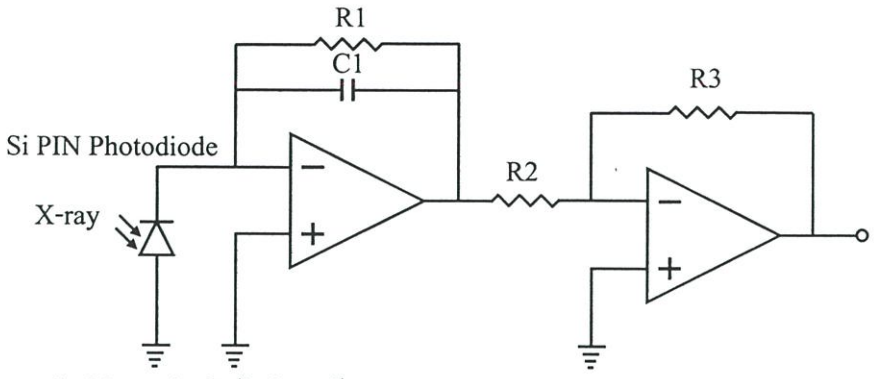
รูปที่ 5.44 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสแสง ในโหมดโฟโตโวลตาอิก ขณะได้รับแสงที่ความยาวคลื่น 550 nm ความเข้มแสงค่าต่างๆ เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ จะเห็นว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นความเข้มแสง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจจับแสง



รูปที่ 5.44 การเปลี่ยนแปลงของกระแสแสง ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่างๆ

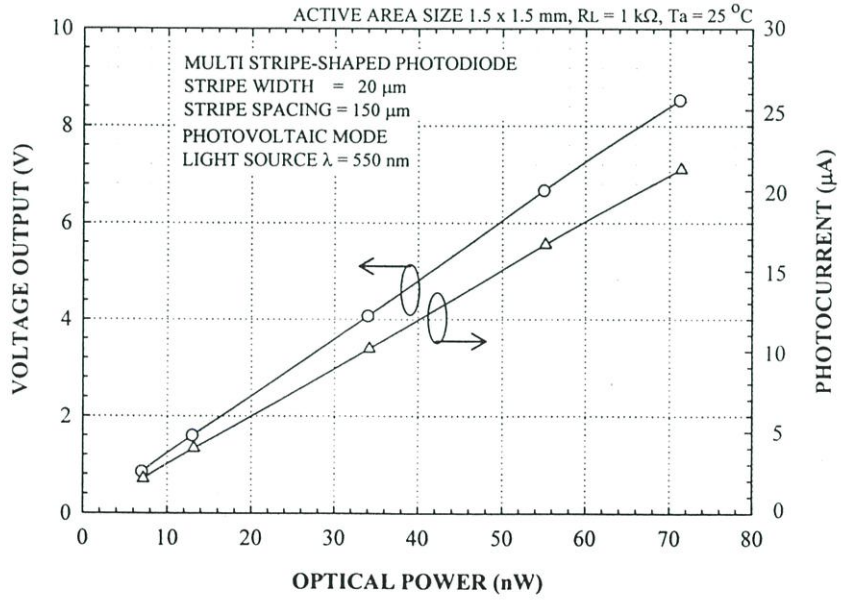
4.3.2.2 วงจรวัด

ในการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอด ไดโอดจะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ ในลักษณะโหมดโฟโตโวลตาอิก [32] ดังแสดงในรูปที่ 5.45



รูปที่ 5.45 การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

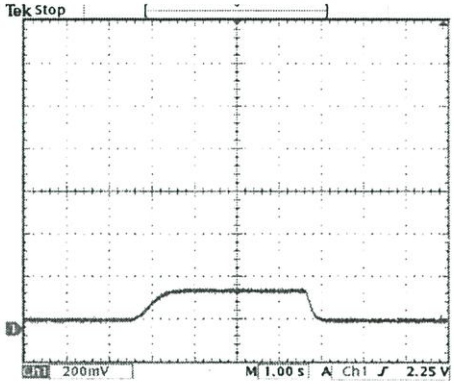
วงจรขยายภาคแรกทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสที่ได้จากโฟโตไดโอดเป็นแรงดันไฟฟ้า (Trans-impedance amplifier) โดยมีอัตราขยาย 40 mV/nA ซึ่ง R1 = 40 MΩ และC1 = 330 pF วงจรขยายภาคที่สองเป็นจงวรขยายแรงดัน (Voltage amplifier) โดยมีอัตราขยาย 10 เท่า โดยที่ R2 = 10 kΩ และ R3 = 100 kΩ ตามลำดับ วงจรขยายใช้ออปแอมป์เบอร์ LF442 ซึ่งมีกระแสอินพุท แรงดันออปเซต และใช้พลังงานต่ำมาก ขนาดสัญญาณเอาต์พุตและกระแสแสง ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่างๆ แสดงในรูปที่ 5.46



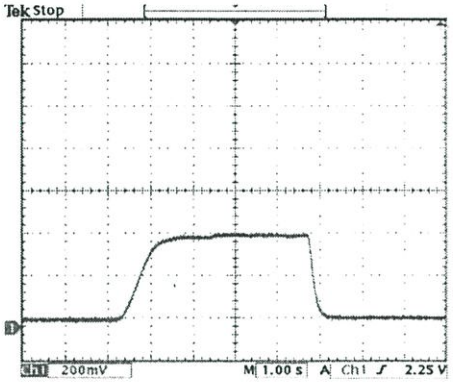
รูปที่ 5.46 ขนาดสัญญาณเอาต์พุตและกระแสแสง ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่างๆ

4.3.3 ลักษณะรูปคลื่นและขนาดสัญญาณเอาต์พุต

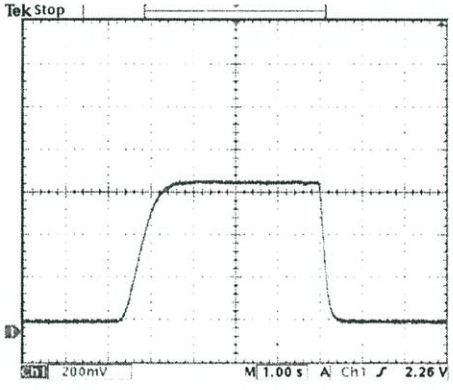
แรงดันเอาท์พุทของวงจรขยาย จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งตัวไดโอดสามารถรับได้ รังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการทดลอง ได้จากเครื่อง CT scanner ยี่ห้อ Toshiba รุ่น TF-6TL-6 ความเข้มของรังสีเอ็กซ์สามารถควบคุม และเปลี่ยนแปลงได้โดยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอดรังสีเอ็กซ์ ในการทดลองนี้ใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง 40 - 100 kVp. และได้ทดลองโดยการฉายรังสีให้แก่โฟโตไดโอดทั้งแบบวิธีการทางตรง และวิธีการทางอ้อม ซึ่งใช้ชั้นสารเรืองแสง เป็นสาร Gadolinium Oxysulfide activated with Terbium (Gd_2O_2S:Tb) [31] ชั้นสารเรืองแสงเมื่อดูดกลืนรังสีเอ็กซ์จะเกิดการเรืองแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่นสูงสุด 545 nm ออกมา



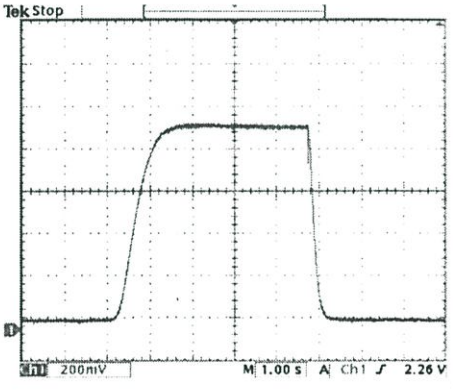
(ก) แรงดันไฟฟ้า 40 kVp



(ข) แรงดันไฟฟ้า 60 kVp

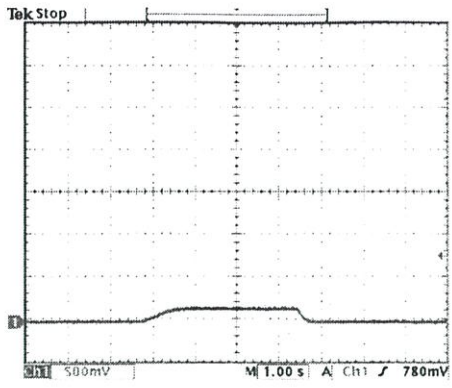


(ก) แรงดันไฟฟ้า 80 kVp

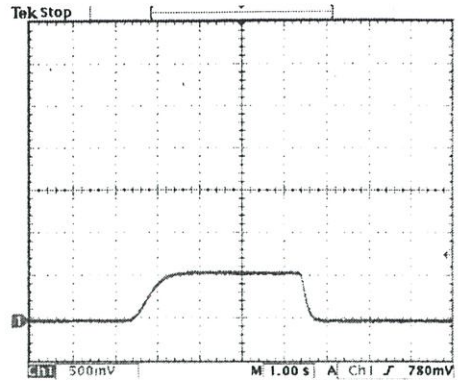


(ข) แรงดันไฟฟ้า 100 kVp

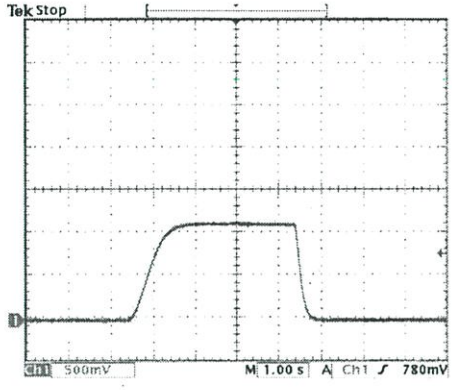
รูปที่ 5.47 ลักษณะของสัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทของวงจรขยายซึ่งวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป ขณะโฟโตไดโอดถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ที่ค่าแรงดันต่างกัน กระแส 25 mA



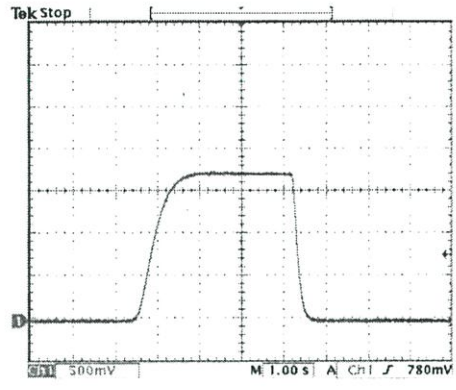
(ก) แรงดันไฟฟ้า 40 kVp



(ข) แรงดันไฟฟ้า 60 kVp



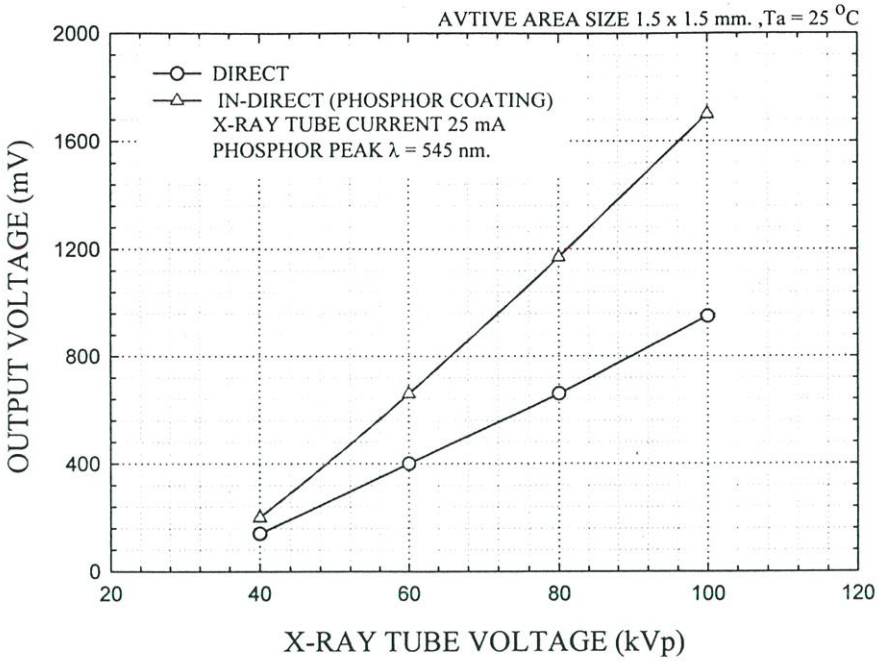
(ก) แรงดันไฟฟ้า 80 kVp



(ข) แรงดันไฟฟ้า 100 kVp

รูปที่ 5.48 ลักษณะของสัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทของวงจรขยายซึ่งวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป ขณะโฟโตไดโอดถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ขณะซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ผ่านการเคลือบด้วยสารเรืองแสง ที่ค่าแรงดันต่างกัน กระแส 25 mA

ขณะที่ฉายรังสีเอ็กซ์ให้กับโฟโตโอด และมีการดูดกลืนพลังงานของโฟโตไดโอด จะทำให้มีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่เอาท์พุทของวงจรขยาย ดังแสดงในรูปที่ 5.47 และ5.48 จะเห็นว่าในขณะที่ไม่มีการฉายรังสีเอ็กซ์ แรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทของวงจรขยายจะมีค่าเป็นศูนย์ และเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์ตกกระทบโฟโตไดโอดจะทำให้มีแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นที่เอาท์พุทของวงจรขยาย และจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มของรังสีเอ็กซ์อย่างเชิงเส้น ดังในรูปที่ 5.49

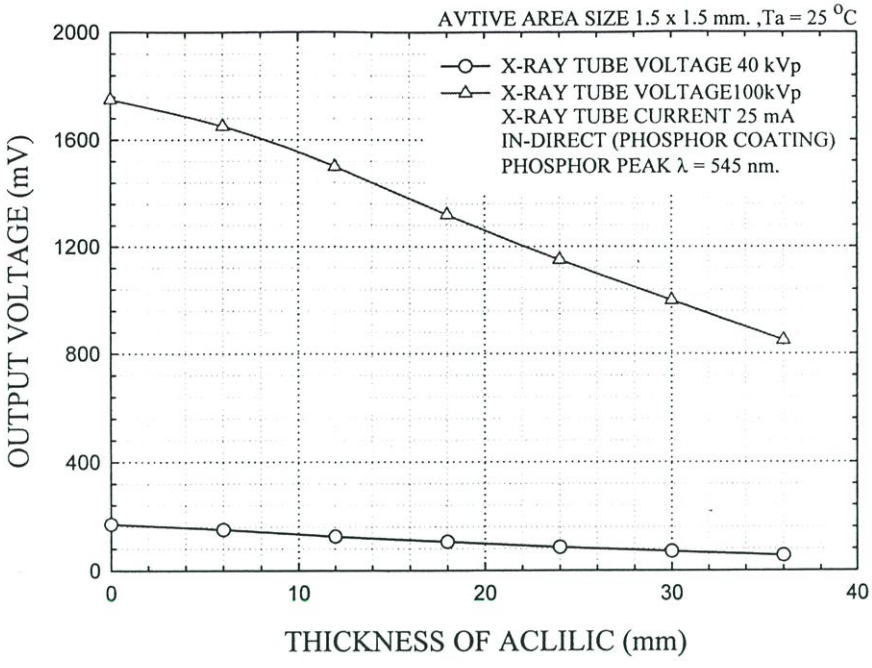


รูปที่ 5.49 ขนาดของแรงดันเอาท์พุทของวงจรขยายกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ที่โฟโตไดโอดได้รับ ทั้งแบบวิธีการทางตรง และวิธีการทางอ้อม

กรณีการฉายรังสีเอ็กซ์ โดยผ่านชั้นสารเรืองแสงหรือการรับรังสีวิธีการทางอ้อมนั้น ชั้นสารเรืองแสงจะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์และเกิดการเรืองแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 545 nm ซึ่ง ก็คือการปล่อยคลื่นคลื่นแสงย่านสายตามองเห็นออกมาให้แก่โฟโตไดโอดนั่นเอง และเนื่องจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมีคุณสมบัติสามารถตอบสนองต่อคลื่นในย่านความถี่แสงโดยเฉพาะแสงสีเขียวได้ดีกว่าคลื่นความถี่ในย่านรังสีเอ็กซ์ กลไกดังกล่าวจึงทำให้ได้แรงดันที่เอาท์พุทมีค่าสูงกว่ากรณีการได้รับรังสีเอ็กซ์โดยตรง ดังผลการทดลองในรูปที่ 5.49

4.3.4 ผลการลดทอนรังสีเอกซ์ของวัสดุตัวอย่าง

เพื่อศึกษาผลการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ ได้ทำการทดลองโดยใช้วัสดุตัวอย่างเป็นแผ่นอะคลีลิคทึบแสง และมีความหนาค่าต่างๆ ปิดบังตัวซิลิคอนโฟโตไดโอดไว้ และฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มคงที่โดยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอดรังสีเอ็กซ์ มีค่า 40 kVp และ 100 kVp ที่กระแส 25 mA ขนาดของแรงดันเอาท์พุท และความหนาของชั้นอะคลีลิคที่ใช้กั้นรังสีเอ็กซ์ นำมาเขียนกราฟ ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 5.50



รูปที่ 5.50 ค่าแรงดันเอาท์พุทของวงจรขยายกับค่าความหนาของแผ่นอะคลีลิค ที่ใช้บังรังสีเอ็กซ์ให้แก่โฟโตไดโอด

ผลการทดลองพบว่าขณะโฟโตไดโอดถูกบังด้วยแผ่นอะคลีลิคทึบที่มีความหนาเพิ่มขึ้น แรงดันเอาท์พุทจะมีค่าลดลง และลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นอีกด้วย ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อรังสีเอ็กซ์ถูกลดทอนความเข้มลง การดูดกลืนรังสีของไดโอดก็ลดลงด้วยนั่นเอง ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของโฟโตไดโอดที่มีลักษณะ เป็นเชิงเส้น (linearity) ที่ดี จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำโฟโตไดโอดนี้ไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ และประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ และสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง ซึ่งเป็นการใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างเป็นซิลิคอน ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายๆ อย่าง ลักษณะเด่นของโฟโตไดโอดชนิด PIN คือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารอย ต่อมีค่าน้อย จึงทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูง เนื่อง จากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้าง ในปัจจุบันมีการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงกันอย่างแพร่หลาย เช่น ในระบบการสื่อสารด้วยแสง อุปกรณ์รีโมตคอนโทรล อุปกรณ์ดิสก์ (แผ่น CD และ DVD) ด้านการแพทย์ และระบบการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ ที่มีชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ ผลการทดลองนำเสนอผลการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดทั้งในขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง ผลของระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี (p^+ stripe-shaped) ผลของความกว้างแถบชนิดพี การวัดสภาพตอบสนองทางแสงเชิงสเปกตรัม ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า และการวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของโฟโตไดโอด ผลการศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง เพื่อศึกษาผลของการ์ดริง (guard ring) ที่ล้อมรอบโฟโตไดโอดว่ามีผลอย่างไรต่อลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด ผลของระยะห่างระหว่างการ์ดริงกับโฟโตไดโอด และอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอด ในส่วนท้ายเป็นผลการศึกษาการศึกษาการประยุกต์ใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเป็นตรวจวัดรังสีเอกซ์ โดยการวัดผลการตอบ สนองรังสีเอกซ์ของโฟโตไดโอด การต่อโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยาย แสดงลักษณะรูปคลื่น และขนาดสัญญาณเอาต์พุต สุดท้ายเป็นผลการศึกษาการลดทอนรังสีเอกซ์ของวัสดุตัวอย่าง ผลการทดลองทั้งหมดที่กล่าวมานั้น เป็นการศึกษาลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่สำคัญ และจำเป็นในการทำความเข้าใจหลักการทำงาน ลักษณะสมบัติพื้นฐาน ข้อควรคำนึง รวมถึงการนำซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ไปประยุกต์ใช้ต่อไปได้

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ (stripe-shaped) มีคุณสมบัติเร็คติไฟร์ (rectifier) มีกระแสมืดต่ำ กระแสแสงเพิ่มตามพลังงานแสงที่ได้รับ ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V มีค่ากระแสมืดต่ำเพียง 3.7 nA/mm^2 ซิลิคอนโฟโตไดโอดมีสภาพตอบสนองทางแสง 0.45 A/W (λ=633 nm) โดยที่อัตราส่วนของกระแส แสงต่อกระแสมืด เท่ากับ 7.59 x 104 เท่า

ขณะได้รับแสงจากหลอด UVC ที่มีความยาวคลื่น 254 nm ที่ความเข้มค่าหนึ่ง ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ สามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าแบบแนวตั้งธรรมดาเกือบเท่าตัว

โฟโตไดโอดจะจ่ายกระแสแสงมากที่สุดเมื่อ แถบ $p+$ มีความกว้าง (W) 20 μm ระยะห่างระหว่างแถบ (S) เท่ากับ 150 μm เงื่อนไขระยะห่างระหว่างแถบชนิดพี ที่เหมาะสมควรมีค่าประมาณสองเท่าของความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ($2W_D$) แถบชนิดพีควรเล็กที่สุด

สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม และประสิทธิควอนตัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ซึ่งแถบ p+ มีค่าสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในความคลื่นช่วง 400- 700 nm ประสิทธิควอนตัมสูงกว่า 80 %

ความถี่คัทออฟของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ที่เงื่อนไขต่างๆ ไม่ต่างกันมากอยู่ในช่วง 47 ถึง 58 kHz ทั้งนี้เนื่องจากผลตอบสนองเชิงความถี่ซิลิคอนโฟโตไดโอดขึ้นอยู่กับหลายตัวแปร ทั้งแรงดันไบอัส ผลคูณของค่าความต้านทานกับค่าความจุไฟฟ้า (RC Time Constant) นอกจากนี้ผลของเวลาเคลื่อนที่ของพาหะข้ามชั้น i ด้วย

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ เป็นตัวตรวจจับแสงที่ดี มีสภาพตอบสนองทางแสงสูง ทำงานในช่วงสเปกตรัมกว้าง และกระแสมืดต่ำ สามารถทำงานได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ย่าน UV ถึง NIR

การสร้าง p^+ เป็นการ์ดริงล้อมรอบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ช่วยลดกระแสมืดได้ เมื่อมีระยะห่างมากกว่า 40 μm และกระแสมืดมีค่าน้อยที่สุดที่ระยะห่างเท่ากับ 75 μm เมื่อการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับโฟโตไดโอดสามารถลดกระแสมืดได้ประมาณครึ่งหนึ่ง เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีปล่อยลอยการ์ดริง โดยมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดสูงกว่ากรณีปล่อยลอยการ์ดริง และไม่มีการ์ดริง และเมื่ออุณหภูมิมีค่าสูงขึ้นจาก 25°C เป็น 120°C กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง จะมีค่าสูงขึ้นจาก 27 nA เป็น 1004 nA หรือกระแสมืดจะเพิ่มขึ้น 1.5 เท่าทุกๆ 10 °C

การวัดคุณสมบัติผลตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของโฟโตไดโอด ได้ทำการทดลองทั้งแบบวิธีการทางตรง และวิธีการทางอ้อม ผลการทดลองพบว่า ไดโอดที่สร้างขึ้นสามารถตรวจ จับรังสีเอ็กซ์เรย์ได้ดี และแรงดันเอาพุทของวงจรขยายยังแปรกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ อย่างเป็นเชิงเส้นอีกด้วย และการฉายรังสีทางอ้อมสามารถให้ค่าแรงดันเอาท์พุทสูงกว่าการวัดทางตรงมากกว่า 60% นอกจากนี้ เมื่อรังสีเอ็กซ์ถูกลดทอนความเข้มโดยผ่านชั้นอะคลีลิคที่ความหนาค่าต่างๆ ค่าแรงดันเอาท์พุทจะลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้งสามารถนำไปใช้ตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ เช่น เครื่อง CT scanner โดยพัฒนาซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ PIN ให้เป็นแบบแถว (array) และต้องมีขนาดเล็กเพื่อให้ได้มีความละเอียดสูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Sebastian M. et al, "CMOS-Compatible High-Speed Planar Silicon Photodiodes Fabricated on SOI Substrates," **IEEE J.Quantum Electron.**, Vol.38, 2002, pp.193-196.

[2] R.Orito et al, "Performance of a Large Area Si PIN Photodiode Array," **IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record**, 2005, pp.2993-2997.

[3] J.A.Rowlands, " Current Advances and Future Trends in X-Ray Digital Detectors for Medical Applications." **IEEE Trans.Instr.Meas.**, Vol.47, No.6, December1998, pp.1415-1418.

[4] Sung-Woo Kwak et al, " Development of X-Ray Scanner Using 450-kVp X-Ray." **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, Vol.50, 2003, pp.2414-2419.

[5] N. I. Cho et al, " Fabrication of silicon PIN diode as proton energy detector." **Current Applied Physics**, Vol.6, 2006, pp.239-242.

[6] Phillip B. Espinasse ,Steven L. Kosier " WHAT'S IN STORE FOR SILICON PHOTORECEIVERS?.", **IEEE CIRCUITS & DEVICE MAGAZINE**, 2004, pp.23-31.

[7] G. Masini et al., "Si based optoelectronics for communications." **Materials Science and Engineering**, B 89, 2002, pp. 2-9.

[8] STURM et al., " Optical Receiver IC for CD/DVD/Blue-Laser Application." **IEEE JOURNAL OF SOLID-STATE CIRCUITS**, VOL. 40, NO. 7, 2005, pp. 1406-1413.

[9] H. G. Nam et al. "Fabrication of a Silicon PIN Diode for Radiation Detection." **Journal of the Korean Physical Society**, Vol. 48, No. 6, 2006, pp. 1514_1519.

[10] John M. Senior. **Optical Fiber Communications**, Principles and Practice, Second edition. Hertfordshire, prentice Hall. 1992, pp. 419-441.

[11] จิรวัฒน์ ปราบเขต, สมเกียรติ ศุภเดช, " การพัฒนาโครงสร้างเพื่อเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ", **การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29**, Vol.2, 2549, หน้า 905-908.

[12] C.S. Yin, "The p-i-n junction-surface depletion layer photodiode," **IEEE Electron Device Lett.** Vol.12, 1991, pp.422-443.

[13] A. Pauchard et al., "A silicon bluer/UV selective stripe-shaped photodiode." **Sensors and Actuators**, Vol.76, 1999, pp. 172–177.

[14] S.M.Sze. **Semiconductor Devices Physics and Technology.** New York : John Wiley & Son Ltd,. 2002.

[15] สมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต สุรศักดิ์ เนียมเจริญ , "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n", **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28**, 2548, หน้า 1097-1100ใ

[16] Joseph, Ya-Min, Lee, "Reduction of Leakage Current of Large-Area High-Resistivity Silicon p-i-n Photodiodes for Detection at 1.06 μm, " **IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES**, VOL. ED-28, NO. 4, APRIL 1981.

[17] A. Ruzin, S. Marunko, "Current mechanisms in silicon PIN structures processed with various technologies." **Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res.** A 429, 2002, pp.411-422.

[18] VIJAY MISHRA et al. "Role of guard rings in improving the performance of silicon detectors." **Journal of physics, Indian Academy of Sciences**, Vol. 65, No. 2, 2005, pp. 259-272.

[19] Govind, P.Agrawal. **FIBER-OPTIC COMMUNICATION SYSTEM.** : Wiley Inter-Science, 2002

[20] S.M.Sze. **Physics of Semiconductor Devices.** New Jersey : John Wiley & Son Ltd,. 2007.

[21] Hamamastu Photonics, **" Photodiodes."** [Online]. Available: http://www.hamamastu.com

[22] Louis Desmaris. **Applied Electro-Optoes.** prentice Hall International (UK) Ltd., 1998.

[23] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์.** พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545.

[24] Jonh Gowar. **Optical Communication Systems.** : prentice Hall International (UK) Ltd.,. 1993.

[25] จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช, "คุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ," **วิศวสารลาดกระบัง**, ปีที 24, ฉบับที่ 2, 2549, หน้า 37-42.

[26] Michael D. Falcon. **"Electrical Characterization of Gold-doped Hg0.8Cd0.2Te Photodiodes** " Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1994.

[27] G. F. Dalla Batta et al, " Si-PIN X-ray detector technology." **Nucl. Instr. And Meth. In Phys.** Res. A 395, 1997, pp.344-348.

[28] W. W. Moses, I. Kipnis, and M. H. Ho, "A 16-CHANNEL CHARGE SENSITIVE AMPLIFIER IC FOR A PIN PHOTODIODE ARRAY BASED PET DETECTOR MODULE." **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, VOL. 41, NO. 4, 1994, pp. 1469–1472.

[29] Y. Saitoh et al., "New profiled Silicon PIN Photodiode for Scintillation Detector." **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, VOL. 42, NO. 4, 1995, pp. 345–350.

[30] Kieran Maher, " **Production of X-rays."** [Online]. Available: http://www.life.rmit.edu.au/mrs/subject/mr100/prodxray.html.2001.

[31] Martin Nikl, " REVIEW ARTICLE : Scintillation detectors for x-rays." **Meas.Sci.Technol.**, Vol.17, 2006, pp.R37-R54.

[32] F.J.Ramirez-Jimenez, S. Galindo,"An instrument for measuring the thickness of gamma irradiated xenografts.", **IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record,** 2003, pp.1485-1488.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] สมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร **จิรวัฒน์ ปราบเขต** และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟ ฟ้าครั้งที่ 28 (EECON 28), Vol.2, หน้า 1097-1100,. โรงแรม เพิร์ล วิจเล็จ, ภูเก็ต, 20-21 ตุลาคม, 2548.

[2] **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, " การพัฒนาโครงสร้างเพื่อเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ," การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 (EECON 29), Vol.2, หน้า 905-908, โรงแรม แอมบาสเดอร์ จอมเทียน, ชลบุรี, 9-10 พฤศจิกายน, 2549.

[3] คงศักดิ์ อิ่มอุไร **จิรวัฒน์ ปราบเขต** และ สมเกียรติ ศุภเดช, " ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง," การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 (EECON 29), Vol.2, หน้า 1181-1184, โรงแรม แอมบาสเดอร์ จอมเทียน, ชลบุรี, 9-10 พฤศจิกายน, 2549.

[4] **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, " คุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ," วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 2, หน้า 37-42, มิถุนายน, 2549.

[5] **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, " ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ," การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON 30), Vol.1, หน้า 600-603, โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี , 25-26 ตุลาคม, 2550.

[6] จักรพันธ์ ศรียาภัย **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, " การสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ,"การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON 30), Vol.1, หน้า 552-555, โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี, 25-26 ตุลาคม, 2550.


การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28
28th Electrical Engineering Conference
ECON XXVIII
Volume II
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิ DS)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
งานวิจัยที่เกี่ยวของกับวิศวก GN)
Electrical Engineering
NECTEC

กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n

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

ฉมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร. 0-2739-0643 โทรสาร 0-2739-2384 Email:kssomkia@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้เสนอการทดลองและผลการทดลอง ในการออกแบบและสร้างซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ซึ่งเป็นตัวตรวจจับแสงที่ถูกนำมาใช้ในงานด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดอินทรินซิก(i-type) ที่มีสภาพต้านทานสูง 2000 Ω-cm. ระนาบ(111) เป็นแผ่นผลึกฐานรองเริ่มต้น ชั้นเอ็น(n^+-region)ที่อยู่ด้านล่างและชั้นพี(p^+- region)ที่อยู่ด้านบนของไดโอดสร้างได้ด้วยเทคนิคการแพร่อะตอมของสารเจือฟอสฟอรัสและโบรอนเข้าไปในแผ่นซิลิคอนตามลำดับ โฟโต้ไดโอดที่สร้างได้มีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง(vertical structure)และสามารถแสดงคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังได้เสนอ ผลของความเข้มแสง ผลของขนาดพื้นที่รับแสง และผลของความลึก(depth)ของชั้นพีและชั้นเอ็นของไดโอดที่มีต่อคุณสมบัติของไดโอดและพารามิเตอร์ที่สำคัญเช่น กระแสมืด กระแสแสง และการตอบสนองสัญญาณแสงความถี่สูง(Photo response) อีกด้วย ข้อมูลที่ได้จากการทดลองนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง p-i-n แบบอื่น ๆ ต่อไป

คำสำคัญ : ตัวตรวจจับแสง, ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

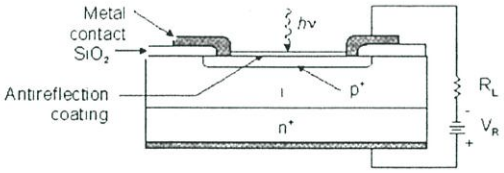
Abstract

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

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

1. บทนำ

ปัจจุบันตัวตรวจจับแสง(photo detector) ถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายในงานด้านต่างๆ เช่น เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงในเครื่องเล่นซีดี(CD player) ทั่วๆไป กระทั่งเป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสงความเร็วสูง(high speed photo detector)ในระบบการสื่อสารทางแสง(optical communication system)ยุคใหม่ และนับวันยิ่งมีบทบาทมากขึ้นเรื่อยๆ ซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิดรอยต่อ(junction photo diode)เป็นตัวตรวจจับแสงที่นิยมนำมาใช้งานกันมากชนิดหนึ่งเพราะมีราคาถูกเนื่องจากใช้เทคโนโลยีซิลิคอน(silicon technology)ซึ่งเป็นเทคโนโลยีพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและยังมีสมรรถนะสูงอีกด้วย โดยเฉพาะซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ซึ่งมีโครงสร้างดังแสดงในรูปที่ 1 กล่าวคือมีชั้นซิลิคอนชนิดพี(p-type)และชั้นซิลิคอนชนิดเอ็น(n-type) ประกบอยู่ที่ด้านทั้งสองของชั้นซิลิคอนชนิดอินทรินซิก(intrinsic-type) โครงสร้างเช่นนี้ทำให้มีคุณสมบัติที่เป็นจุดเด่นหลายประการเช่นมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง(absorption efficiency)สูง มีความไวต่อแสงที่มีความยาวกลื่นในช่วงกว้างตั้งแต่ 200 nm(UV) ถึง 1150 nm (near IR) และมีความอัตราเร็วในการตอบสนอง(response speed) สูงกว่าซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิดอื่นๆ [1]



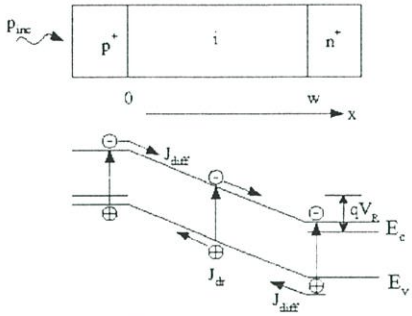
รูปที่ 1 โครงสร้างพื้นฐานของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n

นอกจากนี้โฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับรังสี(radiation)ต่างๆ เช่นรังสีเอกซ์ รังสีแกมม่า และอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า(อนุภาคอัลฟา อนุภาคเบต้า)ได้อีกด้วย[1-3]

ในรายงานนี้ได้เสนอการออกแบบ สร้างและศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาอุปกรณ์แสงอื่น ๆ ต่อไป

2. การทำงานของโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n

ชั้นสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดอินทรินซิค(i – region)ที่มีค่าสภาพต้านทานสูงและถูกประกบด้วยชั้นพีและชั้นเอ็น จะเป็นชั้นที่มีการดูดกลืนโฟตอนมากที่สุด และทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น ในขณะที่ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับแม้เพียงเล็กน้อยแรงดันไบอัสเกือบทั้งหมดนี้จะปรากฏตกคร่อมบริเวณชั้นอินทรินซิคและมีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้นอินทรินซิค ดังนั้นคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดจากการดูดกลืนโฟตอนจะถูกสนามไฟฟ้าพัดพาให้เคลื่อนที่เข้าไปยังด้านพีและด้านเอ็นตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 2 และเป็นกระแสแสงที่ขั้วโลหะทั้งสองของไดโอด



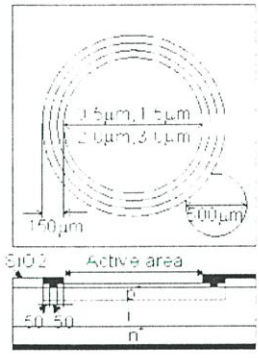
รูปที่ 2 การดูดกลืนโฟตอนและการเกิดคู่พาหะ อิเล็กตรอน-โฮล ในโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เนื่องจากชั้น i มีขนาดกว้างกว่าบริเวณลอดพาหะ(depletion region)ของไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นธรรมดา ดังนั้นไดโอดชนิด p-i-n จึงมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงสูง หรือมีความไวต่อแสง (responsitivity)สูงกว่าโฟโต้ไดโอดแบบรอยต่อธรรมดา นอกจากนี้แล้วเนื่องจากโครงสร้างของไดโอดชนิด p-i-n ซึ่งมีรอยต่อสองรอยต่ออนุกรมกันอยู่ ทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมของไดโอดชนิดนี้จะมีค่าต่ำ ดังนั้นจึงมีความเร็วในการทำงานสูง(high response speed) หรือตอบสนองต่อสัญญาณแสง(photo response)ความถี่สูงได้ดี[5]

ยิ่งไปกว่านั้น เนื่องจากความกว้างของชั้น i สามารถเปลี่ยนแปลงและควบคุมได้ ซึ่งจะมีประโยชน์มากเพราะทำให้ เราสามารถกำหนดคุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณแสง หรือ bandwidth ของโฟโต้ไดโอดชนิดนี้ได้ตามความต้องการ[6]

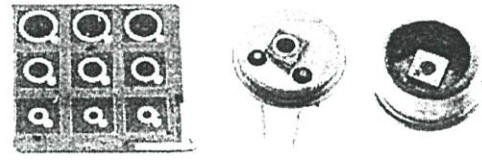
3. การออกแบบและขั้นตอนการสร้าง

การออกแบบลวดลายส่วนต่างๆของโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง สำหรับการทดลองในครั้งนี้กำหนดให้ส่วนพี (p-region)เป็นส่วนที่รับแสง โดยมีลักษณะเป็นรูปวงกลมและมีโครงสร้างดังในรูปที่ 3 และมีพื้นที่รับแสงหรือ Active area ขนาดต่างๆกันคือ 0.196 mm^2, 1.767 mm^2, 3.142 mm^2, และ 7.068 mm^2 ตามลำดับ เพื่อศึกษาผลของขนาดพื้นที่รับแสง ที่มีต่อคุณสมบัติต่างๆของโฟโต้ไดโอดชนิดนี้ โฟโต้มาส์ก หรือกระจกลวดลายต้นแบบที่ใช้ในการสร้างไดโอดมีจำนวน 3 มาส์กคือ p-region mask, contact window mask และ metal mask ตามลำดับ



รูปที่ 3 ลักษณะรูปร่างลวดลายของโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ที่

ลำดับขั้นตอนของการสร้างโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n เริ่มจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิค(intrinsic type) มีสภาพต้านทาน 2000 Ω.cm. ระนาบ(111) ชั้นเอ็น(n-region) เกิดจากการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเข้าทางด้านล่าง(ด้านหลัง)ของแผ่นผลึกทั่วทั้งผิวหน้า ส่วนชั้นพี(p-region) เกิดจากการแพร่ อะตอมโบรอนเข้าทางด้านบน (ด้านหน้า)ของแผ่นผลึก ซึ่งชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ถูกเปิดออกเป็นช่องวงกลม อุณหภูมิที่ใช้ในการแพร่สารคือ 1100 °C เพื่อการศึกษาผลของความกว้างของชั้น i เวลาที่ใช้ในการแพร่ส่วนเอ็นทำที่เวลาต่างๆกันคือ 3 ชั่วโมง 5 ชั่วโมง และ 7 ชั่วโมง ตามลำดับ และเพื่อศึกษาผลของความหนาของชั้นพี ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับแสง เวลาที่ใช้ในการแพร่ส่วนพีทำที่เวลาต่างๆกันคือ 30 นาที 50 นาทีและ70 นาที ตามลำดับ ชั้นของอะลูมิเนียมถูกใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของไดโอด โฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ที่สร้างได้ถูกนำไปติดตั้งลงบนตัวถังแบบ can case ดังในรูปที่ 4 เพื่อวัดและทดสอบคุณสมบัติต่อไป

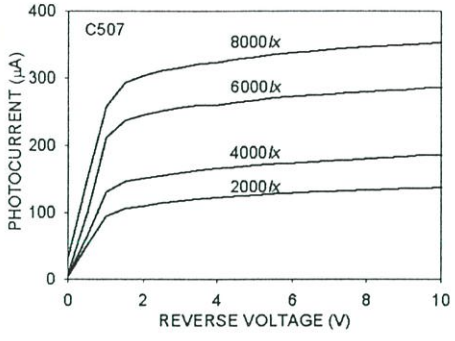


(ก) (ข)

รูปที่ 4 (ก)โฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ที่สร้างเสร็จ อยู่บนแผ่นผลึกซิลิคอนและ (ข) โฟโต้ไดโอดที่ถูกแยกและติดตั้งลงในตัวถัง

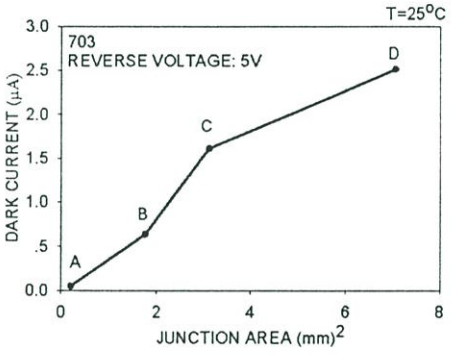
3.การทดลองและผลการทดลอง

โฟโต้ไดโอดที่สร้างได้ ถูกนำไปวัดและทดสอบคุณสมบัติต่างๆ ทั้งทางไฟฟ้าและทางแสงโดยแสงที่ใช้ได้จากหลอดฮาโลเจน ลักษณะสมบัติระหว่าง กระแสและแรงดันไบอัสย้อนกลับ(reverse biased) ขณะที่ได้รับแสงความเข้มค่าต่างๆ แสดงได้ดังในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติระหว่างกระแส และแรงดันไบอัสย้อนกลับ ขณะที่ได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ

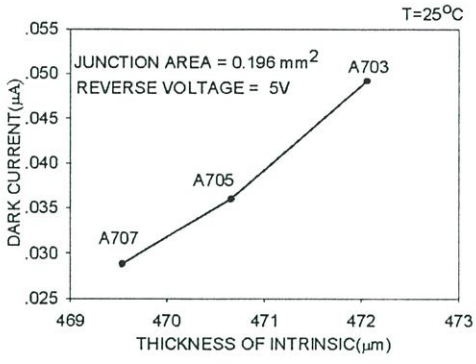
กระแสมืด(dark current) หรือกระแสรั่ว(leakage current)ของไดโอดมีค่าไม่เท่ากัน โดยไดโอดที่มีขนาดใหญ่กว่าจะมีค่ากระแสมืดสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 6 และไดโอดที่มีขนาดความกว้าง ของชั้น i ที่ต่างกันจะมีค่ากระแสมืดต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 7



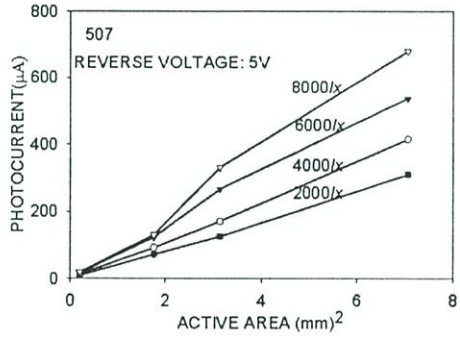
รูปที่ 6 กระแสมืดของโฟโต้ไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อค่าต่างๆ

ในขณะที่โฟโต้ไดโอดได้รับแสง เมื่อมีการดูดกลืนโฟตอนจะทำให้มีกระแสแสงเกิดขึ้น จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสง และขนาดของพื้นที่รับแสงดังแสดงในรูปที่ 8

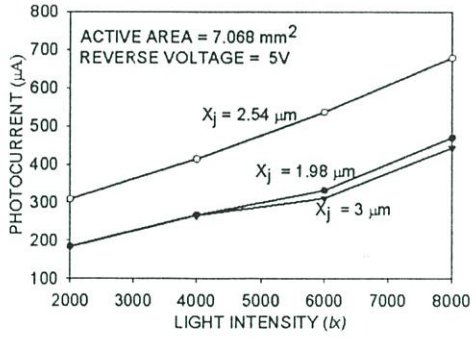
นอกจากนี้ยังพบว่า ความหนาของชั้นหน้าต่างรับแสงหรือชั้น $P(x_j)$จะมีผลต่อกระแสแสงเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นว่าความหนาของชั้นรับแสงที่เหมาะสมจะสามารถให้กระแสแสงได้มากที่สุด ในการทดลองนี้ความหนาของชั้นพีซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับแสงที่หนาประมาณ 2.5 μm. จะให้กระแสแสงได้สูงที่สุด



รูปที่ 7 กระแสมืดของโฟโต้ไดโอดที่ความกว้างของชั้น i ค่าต่างๆ



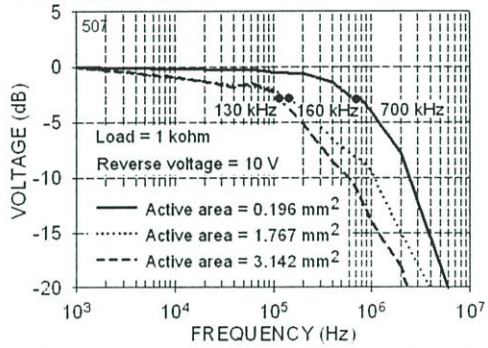
รูปที่ 8 กระแสแสงที่พื้นที่รับแสงต่างๆกันของโฟโต้ไดโอดในขณะได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



รูปที่ 9 กระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ของโฟโต้ไดโอด ที่มีขนาดความหนาของชั้นรับแสงแสงค่าต่างๆ

EL007

คุณลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่ความถี่ค่าต่างๆ สามารถวัดได้โดยใช้สัญญาณคลื่นรูปไซน์ขนาด 500 mVp-p ที่ความถี่ค่าต่างๆมอดูเลท(modulation)กับคลื่นแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm. ซึ่งเป็นคลื่นพาหะ แล้วส่งออกไปยังวงจรภาครับ ที่มีไฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n เป็นตัวตรวจจับสัญญาณแสง ทำให้มีกระแสแสงไหลในวงจรภาครับ และมีแรงดันเอาท์พุทตกคร่อมตัวต้านทานซึ่งเป็นโหลดในวงจรภาครับ เมื่อสัญญาณรูปไซน์มีค่าความถี่สูงขึ้น ขนาดของกระแสแสงจะลดลง ทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าลดลงด้วย ขนาดของแรงดันเอาท์พุทที่ความถี่ค่าต่างๆ ถูกนำไปเปรียบเทียบกับขนาดของแรงดันเอาท์พุทสูงสุด และแสดงออกมาในรูปของค่าแรงดันมีหน่วยเป็นเดซิเบล (dB) ดังแสดงในรูปที่ 10 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่า โฟโต้ไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อค่าน้อย จะให้ผลการตอบสนองต่อสัญญาณความถี่สูงได้ดีกว่า ซึ่งจากการทดลองโฟโต้ไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อ 0.196 ตร.มม.สามารถตอบสนองสัญญาณแสงที่มีความถี่สูงถึง 700 kHz.



รูปที่ 10 คุณลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่ต่างๆ ที่มีพื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นค่าต่างๆ กัน ที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์

นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโต้ไดโอดที่มีความกว้างของชั้น i ค่าน้อยจะให้ผลตอบสนองทางสัญญาณแสงได้ดีกว่า

5. สรุปและวิจารณ์

ซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้งถูกออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีพื้นฐานของสิ่งประดิษฐ์ซิลิคอน ขนาดของกระแสมืดของไดโอด จะเพิ่มขึ้นกับขนาดของพื้นที่รอยต่อพี-เอ็น และความกว้างของชั้น i

กระแสแสงของโฟโต้ไดโอดจะเพิ่มขึ้นกับความเข้มแสงและความหนาของชั้นรับแสง โดยชั้นรับแสงที่มีความหนาที่เหมาะสมจะให้กระแสแสงได้สูงสุด ในการทดลองนี้ความหนาของชั้นรับแสงที่ดีที่สุดประมาณ 2.5 μm. สำหรับความกว้างของชั้น i ในกรณีนี้จะมีผลต่อกระแสแสงน้อย ซึ่งต่างจากโครงสร้างแบบพลานาร์ คุณลักษณะการตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่ต่างๆ ซึ่งเกี่ยวข้องโดยตรงกับความเร็วในการทำงานของโฟโต้ไดโอด พบว่าขนาดพื้นที่ของรอยต่อของไดโอดจะเป็นตัวกำหนดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ไดโอดที่มีขนาดเล็กจะมีความเร็วในการทำงานสูง และตอบสนองต่อสัญญาณแสงความถี่สูงได้ดี ในการทดลองนี้ไดโอดที่มีขนาดพื้นที่รอยต่อ 0.196 ตร.มม. มี bandwidth กว้าง 700 kHz. แต่จะให้กระแสแสงต่ำ ดังนั้นในการออกแบบโฟโต้ไดโอด จำเป็นต้องกำหนดเป้าหมายการใช้งานให้ชัดเจน เพื่อให้ได้ไดโอดตามต้องการ เช่นหากใช้เป็นตัวตรวจจับแสง ควรมีความไวต่อแสงสูงหรือ responsivity ที่สูง กรณีนี้ควรมีพื้นที่รับแสงที่มีขนาดใหญ่ และชั้น i ควรมีขนาดกว้างเพื่อให้ได้กระแสแสงค่าสูง แต่ในกรณีที่ใช้เป็นตัวจับสัญญาณแสงในระบบการสื่อสารทางแสง ไดโอดควรมีขนาดเล็กและชั้น i ควรมีค่าน้อยๆ เพื่อลดค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ และค่า transit timeของพาหะจะทำให้ได้ไดโอดที่มีความเร็วสูง ซึ่งไดโอดที่มีโครงสร้างแบบพลานาร์จะสามารถควบคุมขนาดของชั้น i ได้ โดยง่ายและสะดวกกว่าโครงสร้างแบบแนวตั้ง

เอกสารอ้างอิง

[1]P.Bhattacharya,"Semiconductor Optoelctronic Devices",2th.,Prentice –Hall ,1997

[2] W. Slysz, L. Ryc, and M. Wegrzecki, "High-resistivity silicon p-i-n diodes for detection of ionising radiation", IEEE, pp. 461-462(2000)

[3] Appendix-f, "PIN Diode Radiation Detectors" ,Microsemi Corp.-Watertown.

[4] Carroll-Ramsey Associates Berkeley, "Silicon PIN Diode Radiation Detectors", CA Copyright 1999.

[5] รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช," เซมิคอนดัคเตอร์ดีไวซ์" คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.,2545

[6] N. Peyghambarian, S. W. Loch, and A. Mysyrowicz, "Introduction To Semiconductor Optics", Prentice –Hall, 1993, pp448-453



สมเกียรติ ศุภเดช ปัจจุบัน รองศาสตราจารย์ระดับ9 ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



คงศักดิ์ อิ่มอุไร ปัจจุบัน กำลังศึกษาปริญญาโท สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



จิรวัฒน์ ปราบเขต ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล.



สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ปัจจุบัน ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.


The EECON 29 Conference Joins the Sixtieth Anniversary Celebration of His Majesty's Accession to the Throne
EECON XXIX
29th Electrical Engineering Conference
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ ๒๙
Volume II
- ไฟฟ้ากำลัง (EM)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
- ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
๙-๑๐ พฤศจิกายน ๒๕๔๙
ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ ซิตี้ จอมเทียน พัทยา จังหวัดชลบุรี
Western Digital
NECTEC
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การพัฒนาโครงสร้างเพื่อเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

Structural Development to Improve the Performance of Vertical Silicon PIN Photodiodes

จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอผลการพัฒนาโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง เพื่อเพิ่มสมรรถนะของโฟโตไดโอดให้มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) และมีกระแสมืดต่ำ (low dark current) โดยออกแบบให้เป็นโครงสร้างที่มีชั้นอินทรินซิค (intrinsic layer) และชั้นปลอดพาหะอยู่ที่บริเวณผิว (surface depletion layer) เพื่อเพิ่มกระแสแสง นอกจากนี้ยังมีชั้นการ์ดริง (Guard ring) ล้อมรอบเพื่อลดกระแสรั่วที่ผิวสัมผัสระหว่างชั้น SiO_2/Si ซึ่งโครงสร้างนี้แตกต่างจากโครงสร้างของโฟโตไดโอดทั่วๆไป จากผลการทดลองพบว่า ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบใหม่นี้ จะมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง มีกระแสมืดต่ำและยังสามารถทำงานในช่วงสเปกตรัมแสงที่กว้างขึ้นได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN, ชั้นปลอดพาหะบริเวณผิว, กระแสมืด, การ์ดริง

Abstact

This paper presents the structural development of a vertical silicon PIN photodiodes to improve the performance such as responsivity and dark current. In the new structure, the depletion layer are at the surface of silicon PIN photodiode (surface depletion layer) and surrounded with guardring layer, it is different from that of the conventional photodetectors. From the experimental results it was found that this new structured silicon PIN photodiode shows the higher performance namely, high responsivity, low dark current and wide spectrum characteristics.

Keywords: Silicon PIN photodiode, Surface depletion layer, Dark current, Guard ring

1. บทนำ

โครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดโดยทั่วไปมักเป็นแบบรอยต่อ PN ซึ่งโครงสร้างแบบนี้ ที่บริเวณผิวจะมีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือสูงมาก เนื่องจากถูกสร้างขึ้นโดยวิธีการแพร่อะตอมสารเจือด้วยความร้อน (Thermal diffusion technology) ผลดังกล่าวทำให้บริเวณผิวของโฟโตไดโอดนี้ มีคุณสมบัติในการดูดกลืนโฟตอนได้ไม่ดี อัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสงจึงต่ำ (low photogenerated carrier) ส่งผลให้ได้กระแสแสงต่ำ (low photocurrent) หรือก็คือมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงต่ำ (low responsivity) นั่นเอง ดังนั้นในการปรับปรุงคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง (responsivity) ของโฟโตไดโอดให้สูงขึ้น สามารถทำได้ด้วยการสร้างให้บริเวณผิวของซิลิคอนโฟโตไดโอดมีความเข้มข้นของอะตอมสารเจือต่ำ [1] เช่นโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีชั้นอินทรินซิค (intrinsic layer) และชั้นปลอดพาหะอยู่ที่บริเวณผิว [2-4] หรือโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อตื้น (Shallow junction) [5] เป็นต้น โครงสร้างดังกล่าวจะช่วยทำให้โฟโตไดโอดมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูงขึ้น

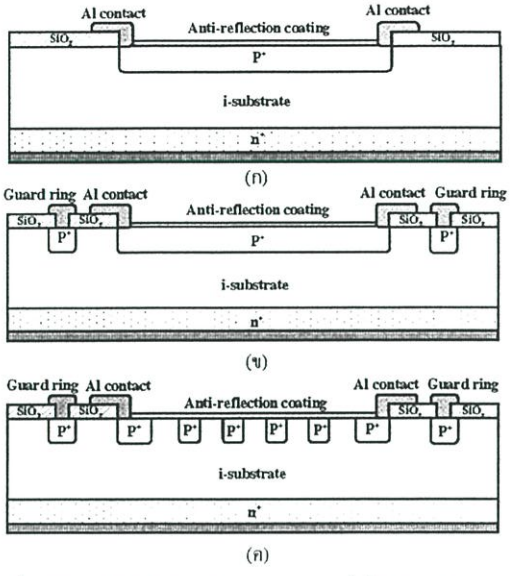
นอกจากคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง จะเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญของโฟโตไดโอดแล้ว กระแสมืด (Dark current) หรือกระแสรั่ว (leakage current) ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่จะต้องนำมาพิจารณาด้วย กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เกิดขึ้นได้ทั้งในบริเวณเนื้อสารและที่บริเวณผิวหน้าของตัวไดโอด [6] โดยเป็นผลรวมของกระแสต่างๆ เช่นกระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย กระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 โดยที่กระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะและกระแสรั่วระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 จะมีค่าสูง ดังนั้น การลดกระแสดังกล่าวจึงเป็นการลดกระแสมืดได้เป็นอย่างดี การควบคุมอุณหภูมิของโฟโตไดโอดขณะใช้งานให้มีค่าต่ำจะช่วยลดกระแสมืดลงได้ และการสร้างชั้นการ์ดริง (Guard ring) จะช่วยลดกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 ได้เช่นกัน [7]

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบและการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) และมีกระแสมืดต่ำ (low dark current) โดยใช้โครงสร้างที่มีชั้นปลอดพาหะอยู่ที่บริเวณผิว และมีชั้นการ์ดริงอยู่ล้อมรอบ และในการทดลองนี้ได้เปลี่ยนแปลงความลึกของชั้นรับแสงและเงื่อนไขการสร้างที่ต่างกันเพื่อศึกษาผลที่เกิดขึ้น

PH07

2. กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในการทดลองนี้ได้สร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีโครงสร้างซึ่งแตกต่างกัน 3 โครงสร้าง คือ 1) แบบที่มีชั้น p^+ เป็นชั้นรับแสงและไม่มีการ์ดริง 2) แบบที่มีชั้น p^+ เป็นชั้นรับแสงและมีการ์ดริงล้อมรอบ และ 3) แบบที่มีชั้น p^+ เป็นชั้นรับแสงและมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ (multi-stripe) และมีการ์ดริงล้อมรอบ ดังแสดงในรูปที่ 1(ก), (ข) และ (ค) ตามลำดับ ซึ่งโฟโตไดโอดทั้งหมดถูกสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกฐานรองเดียวกันและมีพื้นที่รับแสงขนาด 2.2 x 2.2 mm^2



รูปที่ 1 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งซึ่งมีโครงสร้างแบบต่างๆ 3 แบบ

ขั้นตอนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเริ่มต้นจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิค (i-type) ที่มีสภาพต้านทาน 2000 Ωcm ระนาบ (111) ส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+-layer) และชั้นพีที่เข้มข้น (p^+-layer) ของไดโอดสร้างได้ โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัสและโบรอน ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 1000°C ขั้วโลหะที่ใช้เป็นอะลูมิเนียม ซึ่งสร้างได้จากกระบวนการระเหยในสุญญากาศ (Al vapor evaporation) ลวดลายของชั้นพีซึ่งเป็นชั้นรับแสงและลวดลายของแถบตัวนำอะลูมิเนียมสร้างได้ด้วยเทคนิคของ Photolithography ซึ่งเป็นเทคนิคมาตรฐานของกระบวนการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทั่วไป

ในการทดลองนี้โฟโตไดโอดแบบที่ 3 ซึ่งชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ (multi-stripe) ถูกออกแบบให้มีความกว้างของแถบ p^+ ค่าต่างๆกัน คือ 50 μm และ 100 μm และระยะห่างระหว่างแถบ p^+ มีค่า 50, 100 และ 150 μm ตามลำดับและแสดงได้ดังในตารางที่ 1

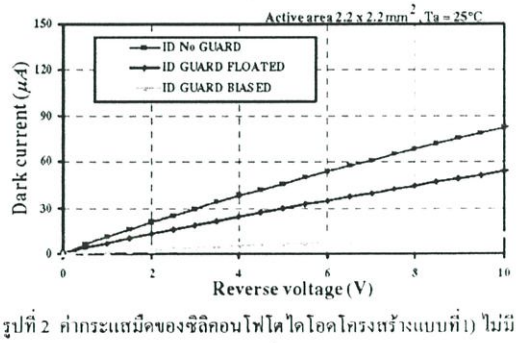
ตารางที่ 1 ขนาดความกว้างของแถบ p^+ และระยะห่างระหว่างแถบ p^+ ค่าต่างๆ ของโฟโตไดโอดแบบที่ 3 ซึ่งชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ (multi-stripe)

Set of samples	P^+ stripe width (μm)	i region spacing (μm)
SP0	No stripe	No stripe
SP1	50	50
SP2		100
SP3		150
SP4	100	50
SP5		100
SP6		150

โฟโตไดโอดทั้ง 3 โครงสร้างที่สร้างได้ถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V) ในขณะที่ไม่ได้รับแสง และขณะที่ได้รับแสงที่มีความเข้มค่าต่างๆ โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของ HP รุ่น 4061A แหล่งกำเนิดแสง ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มี 2 ชนิด คือ แสงจากหลอดฮาโลเจนมีความยาวคลื่นในย่านสายตามองเห็น (Visible) ถึงใกล้อินฟราเรด (Near infrared) และแสงจากหลอด UV ให้กำเนิดแสงย่าน UV C ความยาวคลื่น 254 nm นอกจากนี้ยังถูกนำไปวัดลักษณะสมบัติ C-V โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของ HP รุ่น 4284A PRECISION LRC METER อีกด้วย

3. ผลการทดลอง

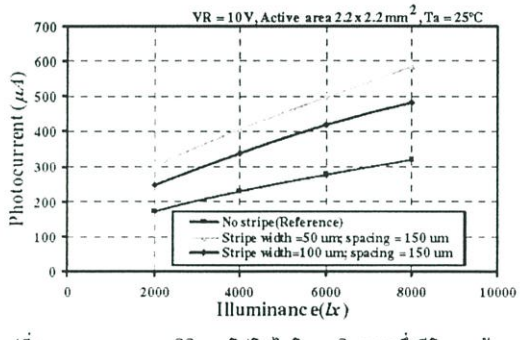
เพื่อการศึกษาผลของการ์ดริง โฟโตไดโอดแบบที่ 1) และแบบที่ 2) ถูกนำมาวัดและเปรียบเทียบค่ากระแสมืดในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 0 - 10 V นอกจากนี้ยังเปรียบเทียบกับกรณีที่การ์ดริงได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V อีกด้วย ผลที่ได้แสดงดังในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ค่ากระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่ 1) ไม่มีการ์ดริงและโครงสร้างแบบที่ 2) มีการ์ดริง

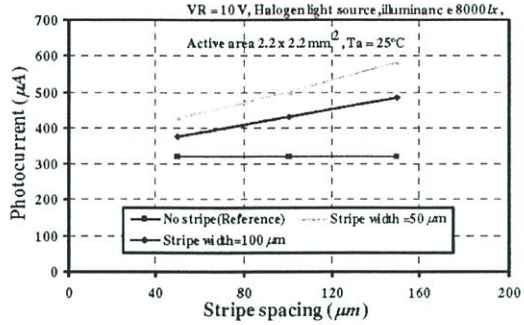
จะเห็นได้ว่าค่ากระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบที่ 2) ซึ่งมีการ์ดริงล้อมรอบจะให้กระแสมืดที่น้อยกว่าแบบที่ 1) ซึ่งไม่มีการ์ดริง และในกรณีที่การ์ดริงได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะยิ่งทำให้กระแสมืดมีค่าน้อยลงไปอีกอย่างชัดเจน ผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าชั้นของการ์ดริง สามารถลดกระแสรั่วที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้น Si/SiO_2 ได้เป็นอย่างดี โดยเฉพาะการให้ไบอัสย้อนกลับแก่ชั้นการ์ดริง บริเวณปลอดพาหะรอบๆ การ์ดริงจะขยายกว้างออกไปทำให้กระแสรั่วที่บริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้น Si/SiO_2 ยิ่งมีค่าลดลงไปอีก

เพื่อศึกษาคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง (responsivity) โฟโตไดโอดแบบที่ 2) และแบบที่ 3) ถูกนำมาวัดและเปรียบเทียบขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V และถูกฉายด้วยแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ คือ 2,000 – 8,000 *lx*. ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 3 จะเห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบที่ 3) ซึ่งชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงที่สูง เพราะสามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่าโฟโตไดโอดแบบที่ 2) ซึ่งเป็นแบบปกติทั่วไป โดยที่ความเข้มแสง 8,000 *lx* โฟโตไดโอดแบบที่ 3) ซึ่งชั้นรับแสงแถบ p^+ กว้าง 100 μm และมีระยะระหว่างแถบ 150 μm ให้กระแสแสงประมาณ 584 μA ซึ่งมากกว่าไดโอดแบบที่ 2) ถึง 82 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ กระแสแสงของโฟโตไดโอดยังเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความเข้มแสงอีกด้วย



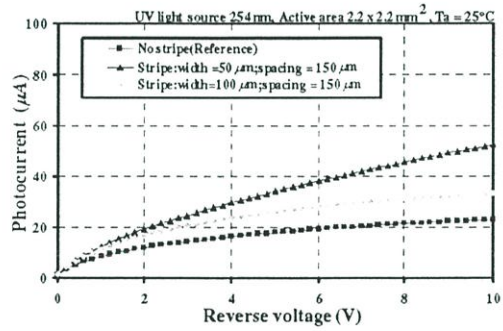
รูปที่ 3 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ซึ่งมีโครงสร้างแบบต่างๆ ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์

กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบที่ 3) ซึ่งชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ ที่กว้าง 50 และ 100 μm และมีระยะห่างของแถบ p^+ เป็น 50, 100 และ 150 μm ตามลำดับ ขณะได้รับแสงฮาโลเจนความเข้ม 8,000 *lx*. ถูกวัดและนำมาเปรียบเทียบได้ดังในรูปที่ 4 ซึ่งโฟโตไดโอดที่มีขนาดแถบ p^+ ที่กว้าง 50 μm ให้กระแสแสงได้สูงกว่าไดโอดที่มีแถบ p^+ ที่กว้าง 100 μm จากการคำนวณพบว่าโฟโตไดโอดแบบที่ 3) ซึ่งชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ ที่กว้าง 50 μm มีพื้นที่รับแสงของชั้นสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (i-layer) มากกว่าในกรณีของโฟโตไดโอดที่มีแถบ p^+ กว้าง 100 μm และเนื่องจากชั้นอินทรินซิกในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นบริเวณพื้นที่ไวแสง (Active area) และมีการดูดกลืนโฟตอนจากแสงโดยตรง ดังนั้นจึงทำให้ไดโอดที่มีแถบ p^+ กว้าง 50 μm สามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงกว่าไดโอดที่มีแถบ p^+ กว้าง 100 μm



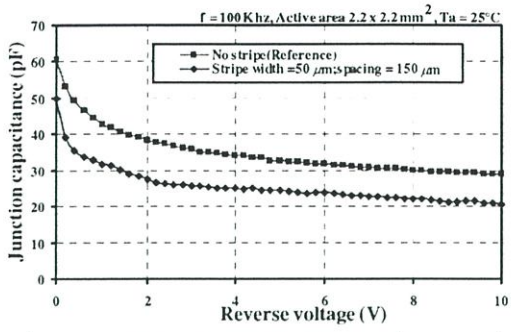
รูปที่ 4 กระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบที่ 3) ซึ่งมีแถบ p^+ ที่กว้าง 50 μm และ 100 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบค่าต่างๆ

นอกจากนี้แล้ว เมื่อเปลี่ยนมาเป็นแสง UV ที่มีความยาวคลื่น 254 nm ซึ่งอยู่ในย่าน UV C พบว่า โฟโตไดโอดแบบที่ 3) ซึ่งชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบ ที่กว้าง 50 μm สามารถให้กระแสแสงได้สูงสุดเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 5 และยังให้กระแสแสงได้สูงกว่าไดโอดแบบที่ 2) อย่างชัดเจนมากกว่ากรณีแสงฮาโลเจนซึ่งสอดคล้องกับค่าระยะการดูดกลืนของซิลิคอน (silicon absorption length) เนื่องจากคลื่นแสงในย่าน UV มีความยาวคลื่นที่สั้น (short wavelength) ระยะการดูดกลืนของซิลิคอนจึงมีค่าต่ำมาก ดังนั้นโฟตอนจะถูกดูดกลืนในย่านบริเวณผิวเท่านั้น ซึ่งซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบที่ 3) เป็นโครงสร้างที่สามารถดูดกลืนโฟตอนได้ดีเนื่องจากมีชั้นปลอดพาหะอยู่บริเวณผิว และจากการวัดเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบที่ 2) และแบบที่ 3) พบว่าไดโอดแบบที่ 3) มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำกว่า ดังในรูปที่ 6 ทั้งนี้เนื่องจากโครงสร้างของไดโอดแบบที่ 3) มีพื้นที่



รูปที่ 5 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอด เมื่อถูกฉายด้วยแสง UV ความยาวคลื่น 254 nm.

ของรอยต่อ (junction) น้อยกว่านั่นเองและผลดังกล่าวจะทำให้ไดโอดแบบที่ 3) มีความเร็วในการทำงานสูงกว่า



รูปที่ 6 ค่าความจุไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบที่ 1) และแบบที่ 3)

4. สรุป

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอแนวทางในการลดกระแสมืดและการเพิ่มผลตอบสนองทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โดยชั้นการ์ดริง p$^+$ ที่สร้างล้อมรอบชั้นรับแสงของโฟโตไดโอดสามารถลดกระแสมืดหรือกระแสรั่วได้ประมาณ 85 เปอร์เซ็นต์ และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่ชั้นรับแสง p$^+$ มีลักษณะเป็นแถบๆ หรือก็คือโครงสร้างที่มีชั้นปลอดพาหะอยู่ที่บริเวณผิว เป็นโครงสร้างให้ทำให้โฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงกว่าโครงสร้างปกติราว 82 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีของแสงฮาโลเจน และ 127 เปอร์เซ็นต์ ในกรณีของแสง UV ลักษณะของแถบรับแสง p$^+$ ที่ดี ควรมีขนาดแคบ และมีระยะห่างทำให้พื้นที่ของชั้นไวแสงมีค่ามากที่สุด ผลการทดลองนี้ช่วยให้เข้าใจถึงพารามิเตอร์ที่สำคัญต่างๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ให้มีสมรรถนะสูงขึ้นต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ และขอขอบคุณศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการวัดลักษณะสมบัติ C-V ของโฟโตไดโอด

เอกสารอ้างอิง

[1] C.S. Yin, "The p-i-n junction-surface depletion-layer photodiode", IEEE Electron Device Lett. Vol.12, p.422-443, 1991

[2] R. P. Reitz, "High speed semiconductor photodiode," Rev. Sci. Int., Vol. 33, p. 994, 1962

[3] J. Ya-Min Lee, "Reduction of leakage current of large-area high-resistivity silicon p-i-n photodiodes for detection at 1.06 um," IEEE Trans. Electron Devices, Vol. ED-28, p. 412, 1981

[4] สมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n"การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, Vol.2, หน้า 1097-1100, 2548

[5] C. S. Yin and D. H. Hu, "High quantum efficiency p$^+$-π-n-n$^+$silicon photodiode,"Proc.Inst.Elec. Eng., Vol. 137, Pt. J, No. 3, p.171-173, June 1990

[6] S. M. Sze, "Physics of Semiconductor Devices", 2nd ed. New York: Wiley, p. 763, 1981

[7] P. Rehak et al., "Spiral silicon drift detectors", IEEE Trans. Nucl. Sci. Vol.36, p.203, 1989



จิรวัฒน์ ปราบเขต, ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



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

PH07

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

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

คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต และสมเกียรติ ศุภเดช
ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520
โทร. 0-2739-0643 Email:aimurai@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอน ซึ่งสร้างด้วยวิธีการกัดย้อมสี (stain etching) เป็นชั้นหน้าต่าง (window layer) และทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง (anti-reflection layer) ของโฟโตไดโอด เนื่องจากชั้นของพอรัสซิลิคอนมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ต่ำ และยังสามารถดูดกลืนโฟตอนได้ดี ทำให้โฟโตไดโอดที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) ซึ่งผลการทดลองพบว่า ชั้นพอรัสซิลิคอนสามารถเพิ่มกระแสแสงได้ประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ในกรณีแหล่งกำเนิดแสงที่เป็นหลอดฮาโลเจน และสามารถเพิ่มได้มากยิ่งขึ้น ในกรณีของยูวี (UVC: 220-290 nm) คือมากกว่า 100 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของชั้นการ์ดริง (p^+-guard ring) ที่อยู่ล้อมรอบชั้นรับแสง p^+ และตำแหน่งที่เหมาะสมของชั้นการ์ดริง จากผลการทดลองพบว่า ชั้นการ์ดริงสามารถลดกระแสมืด ซึ่งเป็นกระแสรั่วที่ผิวสัมผัสระหว่าง Si/SiO_2 ของโฟโตไดโอดได้เป็นอย่างดี

คำสำคัญ : พินโฟโตไดโอด, พอรัสซิลิคอน, การกัดย้อมสี

Abstract

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

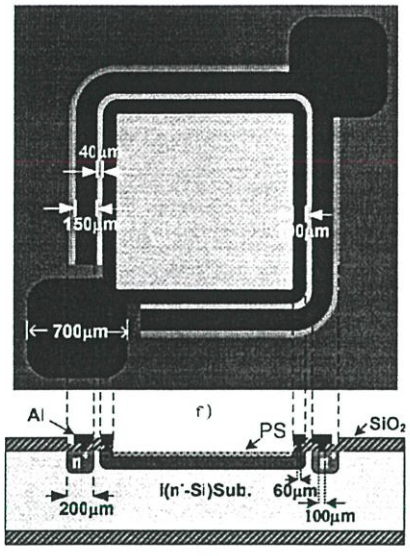
Keyword: p-i-n photodiode, Porous silicon, Stain-etching

1. บทนำ

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดp-i-n เป็นตัวตรวจจับแสงที่มีสมรรถนะสูง ทั้งคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) ความเร็วในการทำงานสูง (high speed) กระแสรั่วต่ำ (Low dark current) และทนต่อแรงดันไบอัสสูง (high breakdown voltage) [1] ดังนั้นจึงเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ดี การพัฒนาเพื่อให้มีสมรรถนะสูงยิ่งขึ้นก็ยังคงเป็นสิ่งจำเป็น ชั้นพอรัสซิลิคอน (porous silicon) ซึ่งเป็นเนื้อซิลิคอนที่มีรูพรุนจำนวนมาก สามารถสร้างได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายที่สุดและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่ำสุดได้แก่วิธีการกัดย้อมสี (stain-etched) ผลึกซิลิคอนในสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริคและกรดไนตริค [2-3] จะทำให้ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นรูพรุนลึกประมาณ 40- 100 nm. และชั้นนี้ถูกเรียกว่า พอรัสซิลิคอน จากการศึกษาพบว่าชั้นพอรัสซิลิคอนมีคุณสมบัติในการสะท้อนแสงต่ำ (≈20%) และยังมีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนหรือการดักจับแสง (Light trapping) [4-5] ได้ดี ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำไปประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสง และชั้นลดการสะท้อนแสงในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงทั่วๆไป

ในการวิจัยนี้ได้ทดลองออกแบบและสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ ลักษณะเป็นรูปวงแหวน โดยมีชั้น p^+ เป็นชั้นไวแสง (active region) มีชั้น i และชั้น n^+ ล้อมรอบเป็นวงแหวน ดังแสดงในรูปที่ 1 ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ได้โฟโตไดโอดที่มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง และยังได้นำเอาชั้นของพอรัสซิลิคอนที่สร้างได้จากการกัดย้อมสี มาประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงและทำหน้าที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอีกด้วย นอกจากนี้ยังได้ศึกษาผลของชั้นการ์ดริง p^+ (p^+-guardring) ที่สร้างขึ้นล้อมรอบชั้นไวแสง p^+ และศึกษาตำแหน่งที่เหมาะสมของชั้นการ์ดริงที่จะทำให้กระแสรั่วมีค่าต่ำสุด

GN13



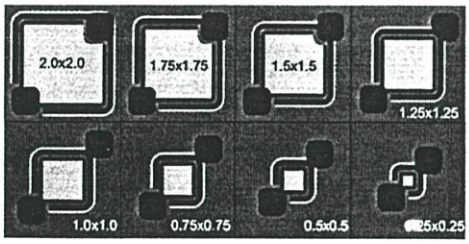
ก)

ข)

รูปที่ 1 โฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ลักษณะรูปวงแหวน ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ก) รูปด้านบน ข) รูปตัดขวาง

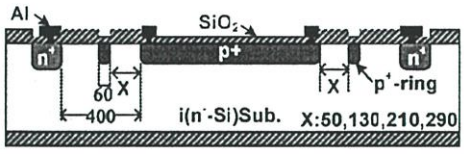
2. การออกแบบและการสร้าง

ในการทดลองนี้ได้ออกแบบลวดลายของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ มีลักษณะเป็นรูปวงแหวน ซึ่งมีขนาดของพื้นที่รับแสงชั้น p^+ ค่าต่างๆ กัน ดังในรูปที่ 2 โดยมีชั้น n^- ล้อมรอบและอยู่ห่างเป็นระยะคงที่ 40 μm หรือก็คือ มีชั้น i กว้าง 40 μm นั่นเอง และชั้นของพอรัสซิลิคอนถูกสร้างขึ้นบนพื้นที่รับแสงของชั้น p^+ เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และในการศึกษาผลของชั้นการ์ดริง p^+ ได้ออกแบบให้ชั้นของการ์ดริงมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบและห่างจากชั้นรับแสง p^+ ที่ระยะต่างกันคือ 50, 130, 210 และ 290 μm ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 3

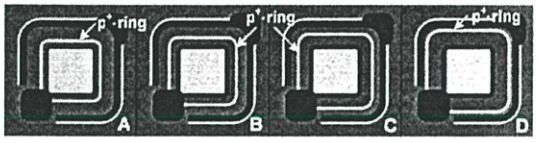


รูปที่ 2 โฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นมีขนาดพื้นที่รับแสงต่างกัน

ขั้นตอนของกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบ พลานาร์ เริ่มต้นจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (n or i-type) ที่มี สภาพต้านทานสูง 2,000Ω cm. ระนาบ (111) ชั้นพี (p^+-region) และชั้นเอ็น (n^+- region) ของโฟโตไดโอดสร้างได้โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนและฟอสฟอรัสเข้าไปในแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิคโดยใช้เทคนิคการแพร่ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 1,000 °C ทำให้ได้ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือในชั้นพี $7.13\times10^{18}cm^{-3}$ และในชั้นเอ็น $1\times10^{19}cm^{-3}$ ตามลำดับ



ก) รูปตัดขวาง

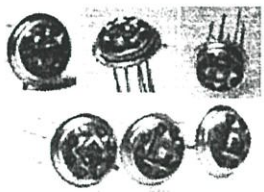


ข) ลักษณะลวดลายด้านบน

รูปที่ 3 โฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีชั้นการ์ดริง p^+ ล้อมรอบและห่างจากชั้นรับแสง p^+ ที่ระยะต่างๆกัน

ชั้นของโลหะอลูมิเนียมถูกสร้างขึ้นด้วยเทคนิคการระเหยสารที่ความดัน 2×10^{-6}Torr. และทำการซินเตอร์ริง (Sintering) ที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลา 12 นาที เพื่อให้ได้รอยสัมผัสโอห์มิคระหว่าง Al-Si ที่ดี และชั้นอะลูมิเนียม ถูกสลักทำเป็นลวดลายขั้วไฟฟ้าของไดโอดด้วยเทคนิคโฟโตลิโธกราฟี ขั้นตอนสุดท้าย ชั้นของพอรัสซิลิคอนถูกสร้างขึ้นเฉพาะบนส่วนผิวของชั้นรับแสง p^+ ด้วยเทคนิคการเลือกกัดย้อมสีผลึกซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ (selective stain-etching) [6] โดยใช้น้ำยาไวแสง เบอร์ AZ P1818 เป็นชั้นหน้ากากป้องกันผิวหน้า (masking layer) สารสกัดย้อมสี (stain etching solution) ที่ใช้ประกอบด้วย กรด HF (47 wt.%) กรด HNO_3 (60 wt.%) และน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3:5 ใช้เวลาในการกัดประมาณ 45 วินาที

ลักษณะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ที่สร้างเสร็จ และถูกนำไปติดตั้งลงบนตัวถังแบบกระป๋องเพื่อการวัดและทดสอบคุณสมบัติแสดงดังในรูปที่ 4

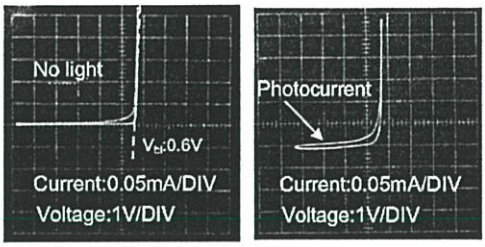


รูปที่ 4 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ที่สร้างเสร็จและถูกนำไปติดตั้งลงบนตัวถังแบบกระป๋อง

GN13

3.การทดลองและผลการทดลอง

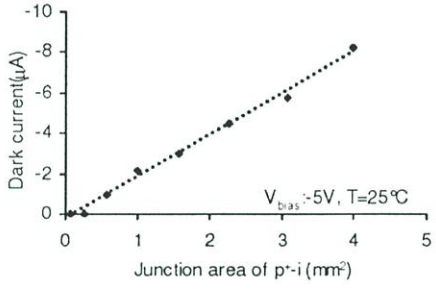
ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่สร้างได้ ถูกนำไปวัดและทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงด้วยเครื่อง Transistor-Curve tracer ที่สามารถวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันได้ ทั้งขณะไม่ได้รับแสงและขณะได้รับความเข้มแสง ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งมีลักษณะสมบัติเป็นโฟโตไดโอดที่ดี มีกระแสมืดต่ำและแรงดันพังทลายสูงกว่า 100 โวลต์



(ก). (ข).

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

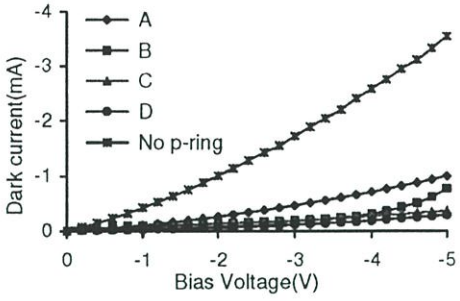
จากการทดลองในกรณีที่ไดโอดไม่ได้รับการฉายแสง กระแสมืดของโฟโตไดโอด จะเพิ่มขึ้นตามขนาดพื้นที่ของรอยต่อ ดังผลการทดลองในรูปที่ 6



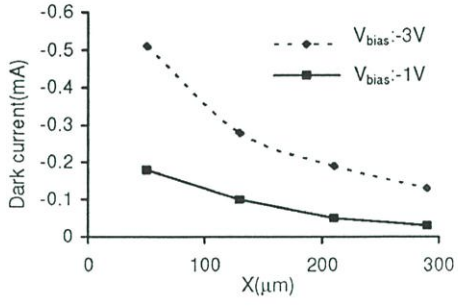
รูปที่ 6 กระแสมืดของโฟโตไดโอดแบบพลานาร์ที่มีขนาดพื้นที่ของรอยต่อ p^+-i ค่าต่างๆ

และเพื่อการศึกษาผลของชั้นการ์ดริง p^+ ที่อยู่ล้อมรอบชั้นรับแสง p^+ ของโฟโตไดโอด กระแสมืดของโฟโตไดโอดที่มีชั้นการ์ดริงซึ่งอยู่ห่างจากชั้นรับแสง p^+ เป็นระยะต่างๆ คือ 50, 130, 210 และ 290μm ตามลำดับ และไดโอดที่ไม่มีชั้นการ์ดริงถูกวัดที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ และนำมาเปรียบเทียบ ซึ่งได้ผลดังแสดงในรูปที่ 7

ผลการทดลองในรูปที่ 7 แสดงให้เห็นว่าชั้นการ์ดริง p^+ สามารถลดกระแสมืด ซึ่งเป็นกระแสรั่วที่เกิดบริเวณผิวสัมผัสระหว่างชั้นซิลิคอนกับชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (Si/SiO_2interface leakage) [7] ของโฟโตไดโอดแบบพลานาร์ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสมืดมีแนวโน้มที่ลดลงเมื่อชั้นของการ์ดริง p^+ อยู่ห่างจากชั้นรับแสง p^+ หรือเมื่อมีระยะเข้าใกล้ชั้น n^+ ดังแสดงในรูปที่ 8



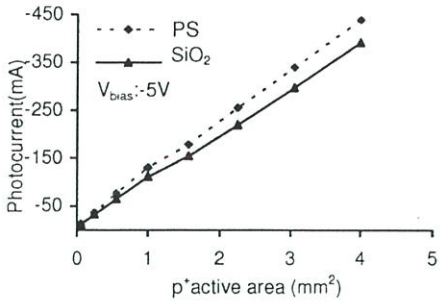
รูปที่ 7 กระแสมืดที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆของโฟโตไดโอดที่มีชั้นการ์ดริง อยู่ห่างจากชั้นรับแสง p^+ เป็นระยะต่างๆและไดโอดที่ไม่มีชั้นการ์ดริง



รูปที่ 8 กระแสมืดของโฟโตไดโอดที่มีชั้นการ์ดริง p^+ ล้อมรอบและอยู่ห่างจากชั้นรับแสงเป็นระยะต่างๆ

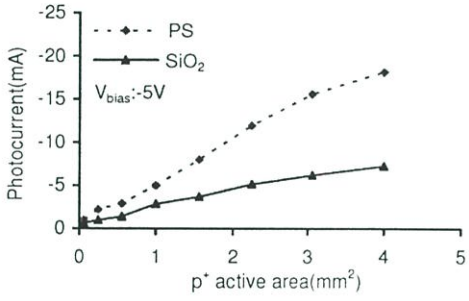
ในกรณีที่โฟโตไดโอดได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง 9000 lux กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตาม พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด และโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นหน้าต่าง และชั้นลดการสะท้อนแสง จะสามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง กล่าวคือโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสง p^+ ตั้งแต่ 0.5 mm^2 ถึง 4.0 mm^2 มีกระแสเพิ่มประมาณ 10% ถึงและ 40% ดังผลการทดลองในรูปที่ 9

GN13



รูปที่ 9 กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอรัสซิลิคอน และชั้น SiO_2 หนา 700 Å เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และมีพื้นที่รับแสง p^+ ขนาดต่างๆ

ในกรณีที่โฟโตไดโอดได้รับแสงยูวี (UVC) กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง จะมีค่าสูงกว่า โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่พื้นที่รับแสง p^+ 2.0 mm^2 มีกระแสเพิ่มประมาณ 130% และเมื่อพื้นที่รับแสง p^+ เพิ่มขึ้นเป็น 4.0 mm^2 มีกระแสเพิ่มขึ้นประมาณ 150.89% ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอรัสซิลิคอน และชั้น SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง และมีพื้นที่รับแสง p^+ ขนาดต่างๆ ขณะได้รับแสงยูวี (UVC)

ผลการทดลองในรูปที่ 9 และ 10 จะเห็นว่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีค่าสูงกว่าของโฟโตไดโอดแบบทั่วไปที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยสูงกว่าประมาณ 10% ขึ้นไป ในกรณีของแสงจากหลอดฮาโลเจน และสูงกว่าประมาณ 100% ขณะได้รับแสงยูวี (UVC) ทั้งนี้เนื่องจากชั้นพอรัสซิลิคอนมีเปอร์เซ็นต์การสะท้อนที่ต่ำและใกล้เคียงกับของซิลิคอนไดออกไซด์ อีกทั้งยังเป็นชั้นที่สามารถดักจับแสงได้ดีอีกด้วย โดยเฉพาะแสงอัลตร้าไวโอเลต (UV)

4.สรุปผลการทดลอง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน จากการทดลองพบว่า เมื่อโฟโตไดโอดไม่ได้รับแสง กระแสมืดหรือกระแสรั่วของโฟโตไดโอดจะเพิ่มขึ้นกับขนาดของไดโอด และชั้นการ์ดริง p^+ ที่เป็นวงแหวนล้อมรอบชั้นรับแสง p^+ สามารถลดกระแสรั่วที่ชั้นผิวสัมผัส Si/SiO_2 ได้เป็นอย่างดี และตำแหน่งของชั้นการ์ดริงที่อยู่ห่างออกไปจากชั้นรับแสง p^+ จะทำให้กระแสมืดยิ่งมีค่าต่ำ ในกรณีที่โฟโตไดโอดได้รับแสง กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นกับขนาดพื้นที่รับแสง และโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง จะสามารถให้กระแสแสงได้สูงกว่า โฟโตไดโอดแบบทั่วไปที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง นอกจากนี้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ยังสามารถตอบสนองกับสเปคตรัมช่วงกว้าง (wide spectrum) ได้ดี เช่นตอบสนองกับแสงยูวีได้ดีกว่า ผลการทดลองนี้เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาและเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอด หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงอื่นๆ โดยใช้ชั้นพอรัสซิลิคอนที่ได้จากการกัดย้อมสี

เอกสารอ้างอิง

[1] สมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิดp-i-n," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, หน้า1097-1100..2548

[2] A. Gee. J. Electrochem. Soc. (USA). vol.107. 1960. pp.787

[3] R.J. Archer. J. Phys. Chem. Solids (UK). vol.35. 1956. pp.333

[4] A. Uhlir, "Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid," Tech. J., vol.35, pp. 333,1956

[5] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb, "Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics," Photovoltaics Specialists Conference., pp.287-293, 10-14 May 1993

[6] สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ ศุภเดช และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, " การเลือกสร้างชั้นพอรัสซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดย้อมสี," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 , Vol.2, page1109-1112, 2548

[7] Wang, Hongbo, "Silicon X-ray smart sensor micromodule and microsystem," University of Oulu, Finland Oulu, Finland 2002



คงศักดิ์ อิ่มอุไร ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



จิรวัฒน์ ปราบเขต, ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



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

GN13

ISSN 0125-1724

วิศวสาร ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

LADKRABANG ENGINEERING JOURNAL

ปีที่ 24 ฉบับที่ 2 มิถุนายน 2550

1. การผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานความร้อนจากระบบเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์ของแข็งโดยใช้ก๊าซธรรมชาติ และ ก๊าซสังเคราะห์ที่ได้จากชีวมวลเป็นแหล่งพลังงาน 1
วาฑิต วทัญญูไพศาล รพีพงศ์ สุวรรณวรางกูร นริศรา ทองบุญชู

2. การปรับปรุงตัวเร่งปฏิกิริยานิกเกิลบนตัวรองรับอะลูมินาเพื่อใช้ผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยารีฟอร์มมิ่งเอทานอลด้วยไอน้ำ 7
ดวงกมล ณ ระนอง วิศรุต ใหญ่ยอด พัฒนา เอี่ยมวิลาวัณย์ อาภาภรณ์ จันทร์ปิรักษ์ กันยรัตน์ บัวเกตุ ณัฐณิชา ณัฐนรากร พรสวรรค์ กาญจนวณิชย์กุล

3. การเร่งปฏิกิริยาขจัดไฮโดรเจนของเอทานอลเพื่อได้อะซีตัลดีไฮด์บนตังเร่งปฏิกิริยานิกเกิล 13
อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ วิภาดา อัตไพบูลย์ สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์

4. การสังเคราะห์เอทิลีนจากเอทานอลบนตัวเร่งปฏิกิริยาโลหะฟอสเฟต 19
อาทิตย์ เนรมิตตกพงศ์ วัชรากรณ์ ปราณี สุธาสินี เนรมิตตกพงศ์

5. การปรับปรุงสมบัติป้องกันโอโซนของยางธรรมชาติโดยใช้ไมโครคริสตัลไลน์แว็กซ์ 25
เศรษฐการ พรมศิริ กาเหว่า เทพนอก สุรัตน์ อารีรัตน์

6. แผงเซลล์แสงอาทิตย์ทันเดมอะมอร์ฟัสซิลิคอนประสิทธิภาพสูงที่สร้างโดยกระบวนการเชิงปริมาณ 31
ศรัณย์ สาตารมณ์ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง เกรียงศักดิ์ สุวรรณโพธิ์ศรี นิรุธ ปิ่นเกตุ

7. ลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง 37
จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช

8. การสังเคราะห์อนุภาคขนาดนาโนของเหล็กด้วยวิธี CVD จากละอองเฟอร์โรเซน-เอธานอล 43
ธนูทอง คำยา สุธิชัย ชัยสิทธิ์ศักดิ์

9. เครื่องผลิตก๊าซโอโซนแบบใช้แหล่งจ่ายเฟสชิฟท์พีดับบลิวเอ็มฟูลบริดจ์คอนเวอร์เตอร์ 49
อนุรักษ์ มั่นสุข วิจิตร กิณเรศ

10. การรู้จำใบหน้าโดยใช้อัลกอริทึม WPS-CSLDA 55
วีรรัตน์ ลีลาธรรม ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี

11. การจัดแบ่งภาระงานของเวปคลัสเตอร์ด้วยลำดับเสมือน 61
กริช กองศรีมา มยุรี เลิศเวชกุล

12. ปรากฏการณ์การเคลื่อนที่วนของวัสดุเมล็ดเล็กภายใต้การสั่นแนวดิ่ง 67
สกนธ์ คล่องบุญจิต

13. Equations for Determining Characteristics of Resonance-Type Silencers 73
M. Lokitsangtong A. Sindhuphak T. Komori

14. Design Techniques for Energy Efficient Multiplier 77
W. Suntiamorntut C. Vongchumyen

ลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

Characteristics of silicon PIN photodiodes with stain-etched porous silicon as antireflection coating

จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ชั้นพอรัสซิลิคอนสามารถสร้างขึ้นบนผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนทั่วไปได้โดยง่ายและประหยัดที่สุดด้วยเทคนิคของการกัดย้อมสี ชั้นพอรัสซิลิคอนมีคุณสมบัติพิเศษสามารถดูดกลืนแสงและลดการสะท้อนแสงได้เป็นอย่างดี จึงเหมาะที่จะนำไปใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในซิลิคอนโฟโตไดโอด ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการสร้างชั้นพอรัสซิลิคอนโดยวิธีการกัดย้อมสีบนผิวหน้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN และได้ศึกษาผลของชั้นพอรัสซิลิคอนที่มีต่อลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN นอกจากนี้ยังได้เปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงอีกด้วย ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนอยู่ที่ผิวด้านบนของซิลิคอนโฟโตไดโอดมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงต่ำประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ในย่านความยาวคลื่น 500 – 800 nm. เมื่อนำชั้นพอรัสซิลิคอนไปใช้กับซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งมีพื้นที่รับแสง 2.2 x 2.2 $mm.^2$ ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสามารถให้กระแสแสงสูงขึ้นถึง 48 เปอร์เซ็นต์ ภายใต้การฉายแสงฮาโลเจน และกรณีฉายแสง UV สามารถเพิ่มกระแสแสงได้ถึง 120 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

คำสำคัญ: พอรัสซิลิคอน, การกัดย้อมสี, ชั้นลดการสะท้อนแสง, ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN

Abstract

Porous silicon can be formed on any silicon surface using a very simple and inexpensive stain etching technique. Because of the excellent light absorb and antireflection properties of porous silicon layer, it is widely used as an antireflection layer of silicon photodiode. In the present work it has been studied on the formation of porous silicon layers by stain etching on the surface of silicon PIN photodiode and the effect of porous silicon layer on the characteristics of silicon photodiode are also studied and compared with the conventional SiO_2 antireflected silicon photodiodes. In this experiment, silicon PIN photodiodes with porous silicon as antireflection coating have been shown able to reduce surface reflectance to under 10 % in the 500-800 nm. wavelength range. Since porous silicon antireflection coating were used in silicon PIN

photodiodes with active area 2.2 x 2.2 mm.^{2}. It shows that the photocurrent of photodiodes increase 48 % under halogen light source and 120 under UV light source, comparing with the conventional SiO_2 antireflected silicon PIN photodiodes

Keywords: Porous silicon, Stain etching, Antireflection coating, Silicon PIN photodiodes

1. บทนำ

พอรัสซิลิคอน (PS) ซึ่งถูกค้นพบในปี ค.ศ.1956[1] นอกจากจะมีคุณสมบัติการเรืองแสง (Photoluminescence) และการเปล่งแสง (Electroluminescence) ที่อุณหภูมิห้องแล้ว [2] ยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนโฟตอนได้ดี และมีการสะท้อนแสงที่ต่ำอีกด้วย ชั้นพอรัสซิลิคอนจึงเป็นวัสดุใหม่ที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวางโดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง [3] การสร้างชั้นพอรัสที่ง่ายและประหยัดที่สุด คือ วิธีการกัดย้อมสี (Stain Etching) ด้วยสารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริค (HF) และกรดไนตริค (HNO_3) เนื้อซิลิคอนบางส่วนจะถูกละลายออกไปด้วยปฏิกิริยาเคมี และมีรูพรุนขนาดเล็กๆ เกิดขึ้นกลายเป็นชั้นพอรัสซิลิคอน

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีรายงานการประยุกต์ใช้ชั้นพอรัสซิลิคอนซึ่งได้จากวิธีการกัดย้อมสีมาเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ [4] ซึ่งสามารถเพิ่มกระแสลัดวงจรของเซลล์ได้ และทำให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานของเซลล์เพิ่มสูงขึ้น จากศักยภาพดังกล่าวจึงมีแนวคิดที่จะนำชั้นพอรัสซิลิคอนใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN เป็นโฟโตไดโอดที่มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ เช่น มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง(absorption efficiency) สูง มีความไวต่อแสงที่มีความยาวคลื่นในช่วงกว้างตั้งแต่ 200 nm ถึง 1150 nm (UV-NIR) และมีความอัตราเร็วในการตอบสนอง (response speed) สูง ดังนั้นเมื่อนำชั้นพอรัสซิลิคอนใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ทำให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถให้กระแสแสงสูงขึ้น

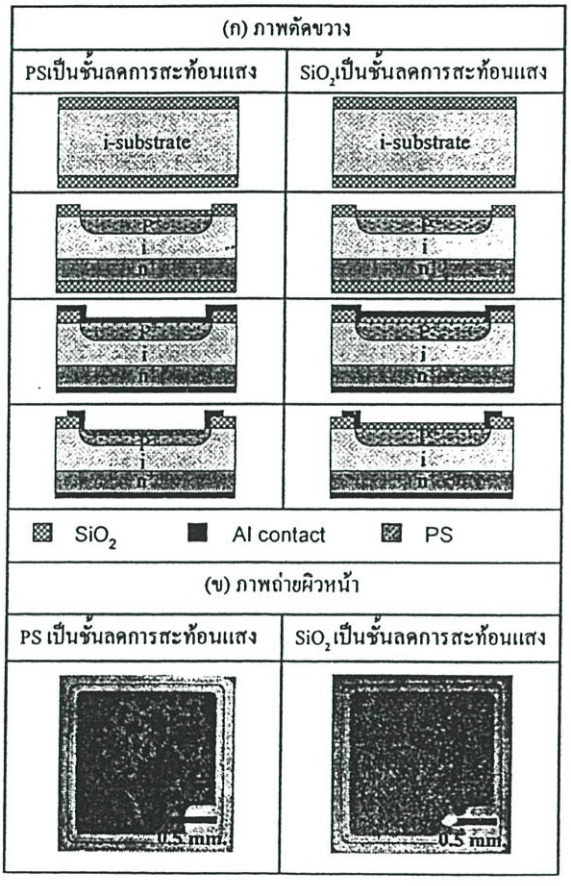
ในรายงานฉบับนี้มุ่งเน้นการประยุกต์ใช้ชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงโดยวิธีการกัดย้อมสีบนผิวหน้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งจะไม่ทำความเสียหายให้แก่รอยต่อของโฟโตไดโอดที่อยู่ด้านล่างแต่อย่างใด ชั้นพอรัสซิลิคอนที่สร้างได้จะถูกนำไปวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 400 – 900 nm. รวมถึงศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงและเปรียบเทียบกับคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงด้วย

2. กระบวนการสร้างและการทดลอง

กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง เริ่มจากการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้าง PIN เพื่อใช้ฐานรองสำหรับการสร้างชั้นพอรัสซิลิคอน ลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งเริ่มต้นจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิค (i-type) ที่มีสภาพต้านทาน 2000 Ω.cm ระนาบ (111) ส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+ -layer) และชั้นพีที่เข้มข้น (p^+ -layer) ของไดโอดสร้างได้โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัส และโบรอน ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 1000°C จากนั้นสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมขึ้นที่ผิวด้านหลังและด้านหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอน ตามลำดับด้วยกระบวนการระเหยในสุญญากาศ (vapor evaporation) และเพื่อให้ได้รอยสัมผัสโอห์มมิคที่ดีจึงทำการซินเตอร์ริ่ง (Sintering) ให้เกิด Al/Si Alloy นำโฟโตไดโอดที่ได้มาทำกระบวนการโฟโต้ลิโธกราฟี (Photolithography) เพื่อสร้างลวดลายอลูมิเนียม และสร้างชั้นพอรัสซิลิคอนโดยเทคนิคการเลือกสร้างชั้นพอรัสซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ [5] โดยมีน้ำยาไวแสงเป็นชั้นป้องกันผิวหน้า ใช้สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริค

กรดไนตริค และน้ำ กัดทะลุชั้นอลูมิเนียมลงไปถึงผิวซิลิคอน และกัดชั้นซิลิคอนเกิดเป็น ชั้นพอรัสซิลิคอนขึ้น โดยใช้เวลาการกัด 30 วินาที สำหรับการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง [6] โดยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1000 อังสตรอม เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ภาพตัดขวางและภาพถ่ายผิวหน้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอน และ SiO_2เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง
(ก) ภาพตัดขวาง (ข) ภาพถ่ายผิวหน้า

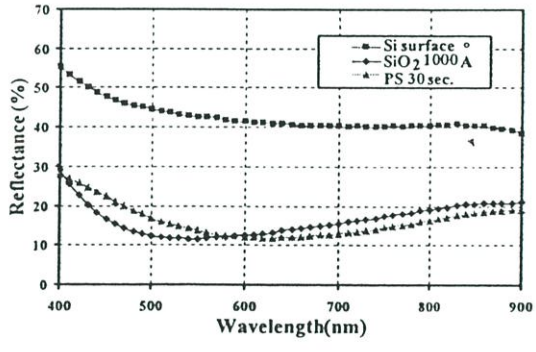


เมื่อทำการสร้างชั้นพอซิลิคอนได้ตามเงื่อนไขที่ต้องการจากนั้นนำไปวัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงของชั้นพอรัสซิลิคอน ที่ความยาวคลื่นในช่วง 400–900 nm. ใช้เครื่อง UV/VIS spectrometer ของ Perkin-Elmer instruments รุ่น Lambda 35 สำหรับการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยการวัดลักษณะสมบัติ I-V ในขณะไม่ได้รับแสง และเมื่อได้รับแสงที่ความเข้มต่างๆ ใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำของ HP รุ่น 4061A ในการทดลองครั้งนี้ใช้แหล่งกำเนิดแสง 2 ชนิด คือ แสงจากหลอดฮาโลเจน และแสงจากหลอด UV

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 คุณสมบัติของพอซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

เมื่อนำชั้นพอรัสซิลิคอนที่สร้างบนซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN วัดคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ความยาวคลื่นในช่วง 400-900 nm. ของชั้นพอรัสซิลิคอนที่ความหนาประมาณ 1000 อังสตรอม โดยเปรียบเทียบกับผิวหน้าของซิลิคอนและชั้น SiO_2 ที่ความหนาประมาณ 1,000 อังสตรอม ซึ่งนิยมใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนของซิลิคอนโฟโตไดโอดทั่วไปที่ใช้งานในย่าน VIS-NIR พบว่าผิวหน้าของซิลิคอนมีการสะท้อนแสงโดยเฉลี่ยมากกว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ส่วนชั้นพอรัสซิลิคอนมีการสะท้อนแสงที่ต่ำและใกล้เคียงกับชั้น SiO_2 โดยมีค่าต่ำสุดเพียง 10 เปอร์เซ็นต์ในความยาวคลื่นช่วง 500-800 nm. ดังในรูปที่ 1

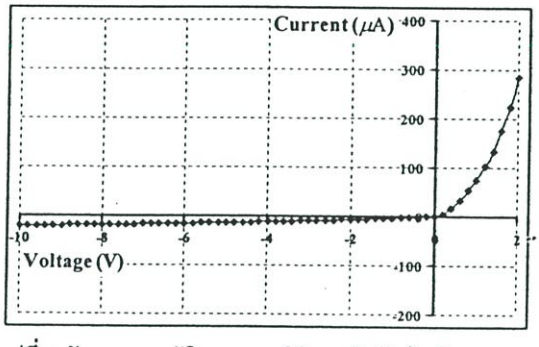


รูปที่ 1 การสะท้อนแสงของผิวผลึกซิลิคอน ชั้นพอรัสซิลิคอนและชั้น SiO2 ที่ความยาวคลื่นต่างๆ

ถึงแม้ว่าชั้นพอรัสซิลิคอนมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับชั้น SiO_2 แต่พอรัสซิลิคอนยังมีคุณสมบัติพิเศษทางแสงอื่นๆ อีก เช่น สามารถดูดกลืนแสงได้สูง

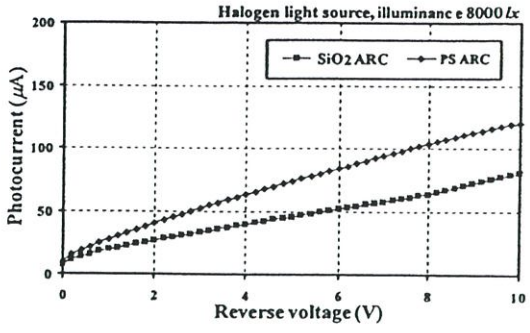
ดัชนีการหักเหต่ำ และมีการเรืองแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนส์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง UV ฯลฯ ดังนั้นทำให้ชั้นพอรัสซิลิคอนมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีกว่าชั้น SiO_2 นอกจากนี้แล้วการสร้างชั้น SiO_2 ด้วยวิธีการแบบความร้อน (Thermal oxidation) และวิธีการทางเคมี หรือ Chemical Vapor Deposition ต่างก็ยุ่งยากและสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายสูงกว่าการสร้างชั้นพอรัสซิลิคอนจากวิธีการกัดย้อมสีมาก ด้วยเหตุผลนี้ชั้นพอรัสซิลิคอนจึงมีศักยภาพสูงและเหมาะที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงแทนชั้น SiO_2 ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงเช่น โฟโตไดโอด และเซลล์แสงอาทิตย์ได้เป็นอย่างดี

3.2 ลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN



รูปที่ 2 ลักษณะสมบัติ I-V ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ขณะไม่ได้รับแสง

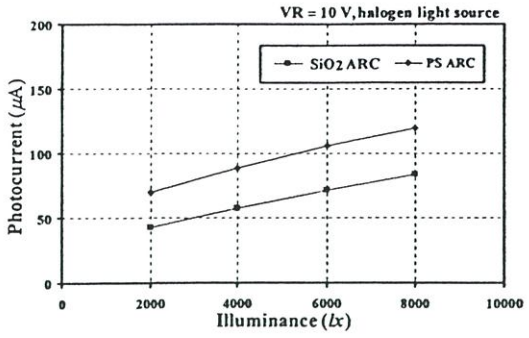
เมื่อทำการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดเสร็จแล้ว อุปกรณ์เหล่านี้จะนำไปวัดลักษณะสมบัติ I-V ในขณะไม่ได้รับแสงดังรูปที่ 2 เห็นได้ว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแสดงคุณสมบัติเร็กติไฟ โดยกระแสมืดขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มหรืออาจกล่าวได้ว่ากระแสมืดแปรผันตรงกับแรงดันไบอัสย้อนกลับนั่นเอง กระแสมืดมีค่าประมาณ 12 μA ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ ส่วนแรงดันพังทลาย (break-down voltage) ของอุปกรณ์มีค่ามากกว่า 80 โวลต์ ลักษณะสมบัติ I-V ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอน และ SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ขณะได้รับ



รูปที่ 3 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอน และ SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

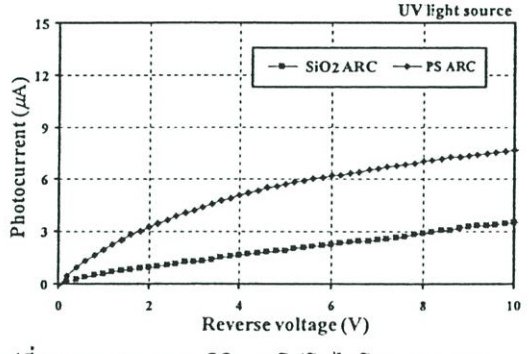
แสงจากหลอดฮาโลเจนความเข้มแสง 8000 ลักซ์ แสดงดังรูปที่ 3 จากรูปเห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงให้กระแสแสงได้สูงกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มี SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง โดยเมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสง 8000 ลักซ์ และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ โฟโตไดโอดที่มีพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้กระแสแสงสูงกว่าโฟโตไดโอดที่มี SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงประมาณ 38.625 μA หรือ สูงกว่า 48 เปอร์เซ็นต์ ดังที่กล่าวแล้วว่าชั้นพอรัสซิลิคอนมีคุณสมบัติการสะท้อนแสงที่ใกล้เคียงกับชั้น SiO_2 แต่พอรัสซิลิคอนยังมีคุณสมบัติทางแสงอื่นๆที่ดีกว่าชั้น SiO_2 ด้วยเหตุผลนี้ทำให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสามารถให้กระแสแสงได้มากกว่า

พิจารณาจากรูปที่ 4 เมื่อซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนและ SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ความเข้มแสงต่างกันจะเห็นว่าเมื่อความเข้มแสงของฮาโลเจนเพิ่มขึ้น โฟโตไดโอดจะให้กระแสแสงเพิ่มขึ้นด้วย โดยที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงให้กระแสแสงสูงกว่า และกระแสแสงเพิ่มอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มแสง ซึ่งคุณสมบัติความเป็นเชิงเส้น (linearity) ของกระแสแสงกับความเข้มแสงของโฟโตไดโอดนี้ เป็นคุณสมบัติที่สำคัญที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสงได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 4 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนและ SiO_2เป็น ชั้นลดการสะท้อนแสง ที่ความเข้มแสงต่างกัน

ขณะได้รับแสงจากหลอด UV ที่ความเข้มแสงคงที่ค่าหนึ่งแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปเห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงให้กระแสแสงสูงกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มี SiO_2 เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง



รูปที่ 5 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN เมื่อฉายแสงจากแหล่งกำเนิดแสง UV

เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ โฟโตไดโอดที่มีพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงจะให้กระแสแสงสูงกว่าประมาณ 4.145 μA หรือสูงกว่า 120 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่ากระแสแสงเพิ่มขึ้นสูงมากทั้งนี้เนื่องมาจากชั้นพอรัสซิลิคอนมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีกว่าชั้น SiO_2 โดยคุณสมบัติที่สำคัญคือการเรืองแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนส์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง UV [7] ทำให้สามารถเปลี่ยนแสง UV/Blue ให้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น (UV/blue to red transformer) ซึ่งความยาวคลื่นช่วงนี้เป็นความยาวคลื่นเหมาะสมกับการตรวจจับของซิลิคอนโฟโตไดโอด ด้วยเหตุผลนี้ทำให้กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดสูงขึ้น

4. สรุปผลการทดลอง

ชั้นพอรัสซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดย้อมสีด้วยสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริค และกรดไนตริค สามารถสร้างได้ง่ายและประหยัดที่สุด ชั้นพอรัสนี้มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งชั้นดูดกลืนแสง ชั้นลดการสะท้อนแสง และเรืองแสงแบบโฟโตลูมิเนสเซนส์เมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสง UV เมื่อนำมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ทำให้โฟโตไดโอดสามารถให้กระแสแสงสูงขึ้น ผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพและความเป็นไปได้สูงที่จะนำชั้นของพอรัสซิลิคอนมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแทนชั้น SiO_2 เพื่อให้ได้ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ดีโดยมีผลตอบสนองทางแสง (responsivity) สูง และเป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำงานในช่วงสเปกตรัมแสงกว้างได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และสถาบันพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานแสงอาทิตย์ (ISET) สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่ให้อนุเคราะห์วัดคุณสมบัติการสะท้อนแสง

6. เอกสารอ้างอิง

[1] A. Uhlir, "Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF Acid," Tech. J., vol.35, 1956, pp. 333.

[2] L. T. Canham, "Silicon quantum wire array fabrication fabrication by electrochemical and chemical dissolution of wafers," Appl. Phys. Lett. (USA)., vol.57, 1990, pp.1046-1048.

[3] Y.S. Tsuo, Y.Xiao, M.J. Heben, X. Wu, F.J. Pern, and S.K. Deb, "Potential Application of Porous Silicon in Photovoltaics," Proceedings of the 23rd IEEE

Photovoltaic Specialists Conference, 10-14 May 1993, pp.287-293.

[4] สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ ศุภเดช และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "เซลล์แสงอาทิตย์ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, Vol.2, 2548, หน้า 1113-1116.

[5] สรวิศ มุ่งการนา สมเกียรติ ศุภเดช สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "การเลือกสร้างชั้นพอรัสซิลิคอนเฉพาะที่โดยวิธีการกัดย้อมสี," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, Vol.2, 2548 หน้า 1109-1112.

[6] สมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร จิรวัฒน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28, Vol.2, 2548, หน้า 1097-1100.

[7] R.J.Martín-Palma, P.Herrero, R.Guerrero-Lemus, J.D.Moreno, J.M.Martínez-Duart, "Cross-section TEM and Optical Characterization of Porous. Silicon Multilayer Stacks," J. Mater. Sci. Lett., Vol.17, 1998, pp. 845–847.



30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทคัดย่อของบทความที่นำเสนอในการประชุม

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบความคุมและการวัดคุม (CT)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)



โดย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเฟลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี

25 - 26 ตุลาคม 2550



ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

Electrical and Optical Characteristics of a Vertical Multi Stripe-Shaped Silicon PIN Photodiodes

จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2739-0643 E-mail : jirawat227@yahoo.com

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้นำเสนอลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ (vertical multi stripe-shaped) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงโฟโตไดโอดที่ใช้งานในย่าน UV ถึง near IR (NIR) ทำได้โดยใช้ตัวตรวจจับโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ การออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทำเพื่อลดการเกิดการรวมตัวใหม่ของพาหะส่วนน้อยในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ เพราะสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอน และโฮลในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงมีค่าต่ำ จึงทำให้การแพร่ของพาหะช้าลง โฟโตไดโอดโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบสามารถเพิ่มสภาพตอบสนองทางแสงเป็น 0.25 A/W (400 nm), 0.40 A/W (550 nm), 0.45 A/W (650 nm), 0.48 A/W (750 nm) และ 0.51 A/W (850 nm) กระแสมืดมีค่า 3.1 nA และ 8.3 nA ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 3 V และ 10 V ตามลำดับ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบเป็นตัวตรวจจับแสงที่ดี มีสภาพตอบสนองทางแสงสูง ทำงานในช่วงสเปกตรัมกว้าง และกระแสมืดต่ำ

คำสำคัญ: ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดPIN, แนวตั้งหลายแถบ, ผลตอบสนองทางแสง, สเปกตรัมกว้าง

Abstract

Results of an electrical and optical characteristics of a silicon PIN photodiodes with structured vertical multi stripe-shaped are presented. As an improvement to photodiodes, a structured detector for the UV to near IR range with multi stripe-shaped is shown. A silicon PIN photodiodes design was realized to reduce the recombination loss of minority carriers in p^+ window layer, because of slow carrier diffusion due to the low electron and hole mobilities in the highly doped p^+ window layer. The multi stripe-shaped structure of the photodiode increase the responsivity of 0.25 A/W (400 nm), 0.40 A/W (550 nm), 0.45 A/W (650 nm), 0.48 A/W (750 nm) and 0.51 A/W (850 nm) could be reached. The dark current was 3.1 nA and 8.3 nA at 3 V and 10 V reverse bias voltage, respectively. Experimental results for the photodiode show that the structure of the vertical multi stripe-shaped is very advantageous to the photodetector in becoming a high responsivity, wide spectrum and low dark current device.

Keywords: Silicon PIN photodiode, vertical multi stripe-shaped, responsivity, wide spectrum

1. บทนำ

ในปัจจุบันสามารถพบเห็นรายงานวิจัยที่เกี่ยวกับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN อย่างต่อเนื่อง โดยมีเป้าหมายหลักๆ อยู่ 2 ประการ คือ เพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ให้ใช้งานทางด้านความเร็วสูง และมีประสิทธิภาพควอนตัมที่ดี อย่างไรก็ตามมีผู้วิจัยจำนวนมากกล้วนแต่มุ่งพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เพื่อนำไปประยุกต์ใช้งานกับระบบการสื่อสารความเร็วสูง [1] ในขณะที่การประยุกต์ใช้งานด้านอื่นๆ โฟโตไดโอดชนิด PIN สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้เช่นเดียวกัน ดังเช่น อุปกรณ์รีโมตคอลโทรลด้วยแสง หรือใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ (X-ray detector) [2] ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้ไม่ต้องการความเร็วในการทำงานสูงมากนัก แต่ต้องมีประสิทธิภาพควอนตัมที่ดี ดังนั้นในรายงานนี้จะแสดงถึงลักษณะสมบัติที่สำคัญประการอื่นๆ ของโฟโตไดโอดชนิด PIN แทนที่จะเป็นคุณสมบัติทางความเร็วเหมือนงานวิจัยทั่วไป

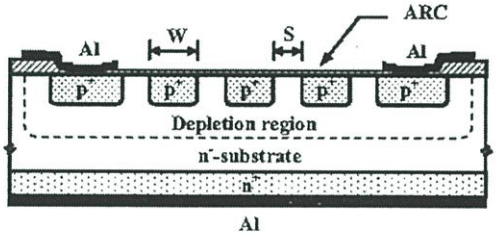
การออกแบบโฟโตไดโอดชนิด PIN ให้มีสภาพตอบสนองทางแสงสูง (high responsivity) ต้องพิจารณาถึงระยะการดูดกลืนแสงของซิลิคอนที่ขึ้นอยู่กับความยาวคลื่น และพลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนเป็นไปตามกฎของ Lambert-Beer

$$P - (1-R)Poe^{-\alpha x} \qquad (1)$$

เมื่อ P คือ พลังงานแสงที่ถูกดูดกลืนที่ขึ้นกับระยะความลึกในโฟโตไดโอด R คือ สภาพการสะท้อนแสง Po คือ พลังงานแสงที่ตกกระทบ และ α คือ ค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง เมื่อพิจารณาถึงโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างปกติที่ไม่มีชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ แบบแนวตั้ง

หลายแถบ (vertical multi stripe-shaped) โฟตอนจากแสงที่ตกกระทบจะถูกดูดกลืนในบริเวณกึ่งนิวทรัล (quasi neutral region) ของชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในคลื่นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น (short-wavelength) แสงจะถูกดูดกลืนในบริเวณใกล้ผิวหน้าของโฟโตไดโอดก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ [3] ซึ่งปกติแล้วการสร้างรอยต่อพีเอ็นด้วยกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือด้วยความร้อนระยะความลึกของรอยต่อมากกว่า 0.3 μm พาหะส่วนน้อยที่เกิดจากแสงอาจเกิดการรวมตัวใหม่ในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ก่อนถึงบริเวณปลอดพาหะ เพราะสภาพคล่องตัวของอิเล็กตรอน และโฮลในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ที่มีความเข้มข้นอะตอมสารเจือสูงมีค่าต่ำจึงทำให้การแพร่ของพาหะช้า จากสาเหตุดังกล่าวจึงทำให้สภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง และมีลักษณะพิเศษโดยชั้นพี (p^+) ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับแสง มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ เพื่อเพิ่มสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอด

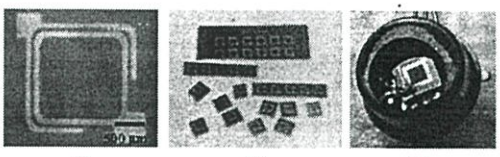
2. โครงสร้างและการสร้าง



รูปที่ 1 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

การสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ให้มีสภาพตอบสนองทางแสง และประสิทธิภาพควอนตัมสูงในช่วงสเปกตรัมกว้าง จะต้องลดการเกิดการรวมตัวใหม่ และการแพร่ของพาหะที่ช้าในชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ โดยใช้โครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งมีบริเวณปลอดพาหะ (space-charge region) อยู่ที่ผิว แสดงดังรูปที่ 1 ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ของ โฟโตไดโอดมีลักษณะเป็นแถบเล็ก ๆ หลายแถบ ที่เกิดจากรอยต่อสารกึ่งตัวนำชนิดพี-เอ็น บนผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานสูง (เสมือนสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิค) แถบ p^+ เชื่อมต่อกับขั้วโลหะโดยรอบนอกบริเวณไวแสง (photo-sensitive region) ประจุพาหะที่เกิดจากแสงจะถูกพัดพาโดยสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังชั้น n^+ และโฮลเคลื่อนที่ไปยังแถบ p^+ ไฟ

โฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 และชั้นรับแสงมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบนั้นมีขนาดความกว้าง (W) 20 μm และระยะห่างระหว่างแถบ (S) 50, 100, 150 และ 200 μm ตามลำดับ มีชั้นการ์ดริง (Guard ring) ชนิดพี (p^+) ล้อมรอบเพื่อลดกระแสรั่ว[4] ส่วนชั้นลดการสะท้อนแสง (Anti-Reflection Coating : ARC) สร้างจาก SiO_2 มีความหนาประมาณ 1000 Å แผ่นผลึกซิลิคอนจะถูกนำไปตัดแยกเป็นไดโอดแต่ละตัว และนำไปติดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋องโลหะ ดังแสดงในรูปที่ 2 ก่อนที่จะถูกนำไปทดสอบวัดคุณสมบัติต่างๆ ต่อไป

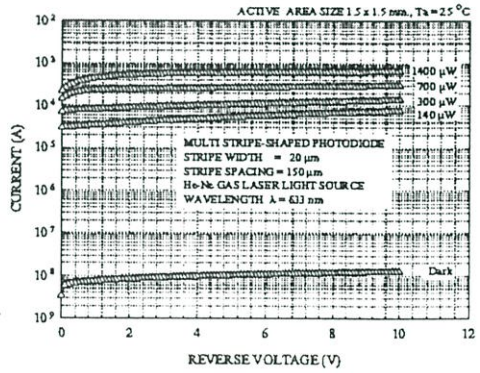


(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 2 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบที่สร้างเสร็จ (ก) ภาพถ่ายผิวหน้าโฟโตไดโอดที่อัตราขยาย 50 เท่า
(ข) โฟโตไดโอดที่ตัดแยกเป็นไดโอดแต่ละตัว
(ค) นำไปติดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋อง

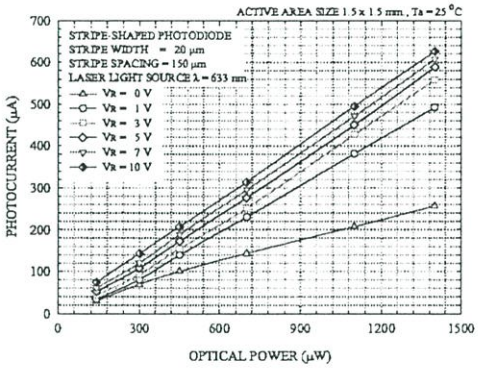
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

การทดสอบคุณสมบัติของของโฟโตไดโอด เพื่อหาผลตอบสนองทางแสง โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำ HP รุ่น 4061A ใช้ He-Ne เลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ และเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงค่าต่างๆ ด้วย ND ฟิลเตอร์ ที่วางไว้ระหว่าง He-Ne เลเซอร์กับตัวอุปกรณ์ สำหรับลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่ความเข้มค่าต่างๆ แสดงดังในรูปที่ 4



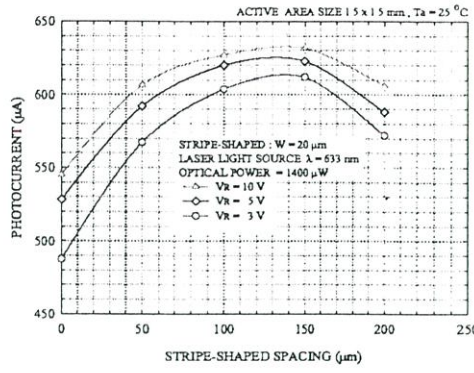
รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง และขณะได้รับแสงจากหลอดเลเซอร์ที่ความเข้มค่าต่างๆ

กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าที่แสดงในรูปที่ 4 ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 150 μm พบว่ากระแสมืดมีค่าต่ำเพียง 3.1 nA และ 8.3 nA ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 3 V และ 10 V ตามลำดับ เมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น 4 ระดับ ในช่วง 140 - 1400 μW จะได้รับกระแสแสงมากขึ้น เมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสง 1400 μW แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้ประมาณ 630 μA โดยที่อัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดเท่ากับ 7.59×10^4 เท่า ซึ่งถือว่าเป็นโฟโตไดโอดที่ดี เพราะว่ามีอัตราส่วน signal to noise สูงมาก รูปที่ 5 แสดงการเปลี่ยนแปลงของกระแสแสง ขณะที่ความเข้มแสงมีค่าต่างๆ จะเห็นว่ากระแสแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นความเข้มแสง ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจจับแสง



รูปที่ 5 กระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้ม และแรงดันไบอัสต่างๆ

เพื่อศึกษาการเพิ่มผลคอบสนองทางแสง และหาเงื่อนไขเหมาะสมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ โดยได้เปรียบเทียบกระแสแสงระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งปกติ (ชั้นหน้าต่างรับแสง p^+ ไม่เป็นแถบ) กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง (W) 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ (S) 50, 100, 150 และ 200 μm ตามลำดับ โฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 เท่ากัน ใช้ He-Ne เลเซอร์ เป็นแหล่งกำเนิดแสง และมีความเข้มแสง 1400 μW โดยพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ3, 5 และ 10 V ตามลำดับ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับระยะห่างระหว่างแถบ p^+ ค่าต่างๆ เปรียบ เทียบโครงสร้างปกติ (ระยะห่างระหว่างแถบมีค่าเป็นศูนย์) แสดงในรูปที่ 6 กระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้ม 1400 μW มีระยะห่างระหว่างแถบค่าต่างๆ กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ จะเพิ่มขึ้นกับระยะห่างระหว่างแถบ p^+ จาก 0 (p^+ ไม่เป็นแถบ), 50, 100 และ 150 μm ตามลำดับ และโฟโตไดโอดสามารถ



รูปที่ 6 กระแสแสงของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงที่ความเข้ม1400 μW มีระยะห่างระหว่างแถบค่าต่างๆ

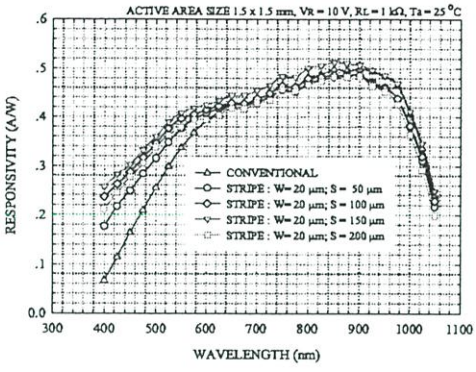
กระแสแสงมากที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 150 μm จากนั้นกระแสแสงจะลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 200 μm จากการวิเคราะห์พบว่าเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 150 μm บริเวณปลอดพาหะระหว่างแถบ p^+ จะขยายจนเต็ม ด้วยเหตุนี้โฟโตไดโอดที่มีระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 150 μm จึงสามารถจ่ายกระแสแสงมากที่สุด เพราะมีบริเวณปลอดพาหะมากที่สุด และเมื่อระยะห่างระหว่างแถบเท่ากับ 200 μm บริเวณปลอดพาหะระหว่างแถบ p^+ จะขยายไม่เต็ม และมีบริเวณนิวทรัลทำให้บริเวณปลอดพาหะลดลงกระแสแสงจึงลดลงด้วย เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างปกติ โฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้น้อยกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบทุกเงื่อนไข โดยสามารถสรุปข้อมูลผลการทดลองได้ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เงื่อนไขต่าง ๆ แถบ p^+ มีความกว้าง (W) 20 μm ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V และความเข้มแสง 1400 μW

Device Type	Stripe spacing (μm)	Number of stripe	Active area (%)	Dark current (nA)	Responsivity λ = 633 nm (A/W)
PIN	-	-	100	10	0.38
ST_50	50	18	28	11	0.43
ST_100	100	10	15	9.5	0.44
ST_150	150	7	11	8.3	0.45
ST_200	200	5	8	5.9	0.43

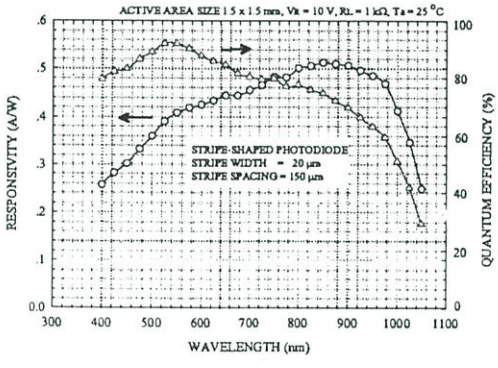
ในการศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอด ไดโอดจะถูกนำไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 1 kΩ และจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสแสงของโฟโตไดโอดหาได้จากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จากนั้นนำไปหาค่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม และประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอดต่อไป แหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ใช้หลอดทังสเตนส่งแสงผ่าน momochromator ของ Nikon

รุ่น G250 เพื่อเปลี่ยนแปลงความยาวคลื่นแสง โดยความยาวคลื่นแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 400 -1050 nm สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโครงสร้างแบบปกติ และแบบแนวตั้งหลายแถบ แสดงดังในรูปที่ 7 โฟโตไดโอดโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบมีสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงกว่าโครงสร้างแบบปกติในทุกความยาวคลื่น โดยที่โฟโตไดโอดซึ่งแถบ p^+ มีความกว้าง 20 μm และมีระยะห่างระหว่างแถบ 150 μm มีสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมสูงสุด



รูปที่ 7 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบปกติ และแบบแนวตั้งหลายแถบ

รูปที่ 8 แสดงสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม และประสิทธิควอนตัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ จะเห็นว่ามีประสิทธิควอนตัมสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในความยาวคลื่นช่วง 400- 700 nm สูงกว่า 80 % โดยที่สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เงื่อนไขการสร้าง และความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ แสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 8 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม และประสิทธิภาพควอนตัมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ

ตารางที่ 2 ลักษณะสมบัติทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่เงื่อนไขการสร้าง และความยาวคลื่นค่าต่าง ๆ ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

Device Type	Spectral response λ (nm)	λp (nm)	Responsivity (A/W) Wavelength (nm)				
			400	550	650	750	850
PIN	400 to 1050	850	0.06	0.31	0.39	0.43	0.46
ST_50			0.17	0.37	0.42	0.45	0.48
ST_100			0.23	0.39	0.42	0.46	0.48
ST_150			0.25	0.40	0.45	0.48	0.51
ST_200			0.21	0.37	0.41	0.45	0.48

4. สรุปผลการทดลอง

รายงานฉบับนี้นำเสนอลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบที่มีชั้นรับแสง p^+ มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ การวัดคุณสมบัติผลตอบสนองต่อแสงของโฟโตไดโอดปรากฏว่าเป็นโฟโตไดโอดที่ดี เนื่องจากมีอัตรา ส่วน signal to noise สูง การเปลี่ยนแปลงกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นอย่างเชิงเส้นกับความเข้มแสง สามารถทำงานได้ในช่วงกว้างตั้งแต่ย่าน UV ถึง NIR มีประสิทธิภาพควอนตัมสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในความยาวคลื่นช่วง 400 - 700 nm สูงกว่า 80 % ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งหลายแถบ เป็นตัวตรวจจับแสงที่ดี มีประสิทธิภาพควอนตัมสูง ทำงานได้ในช่วงสเปกตรัมกว้าง และกระแสมืดต่ำ จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะนำซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบไปประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เช่น ตรวจจับรังสีเอ็กซ์โดยวิธีการทางอ้อม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือทดลอง และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Sebastian M. et al, "CMOS-Compatible High-Speed Planar Silicon Photodiodes Fabricated on SOI Substrates," IEEE J.Quantum Electron., Vol.38 , pp.193-196, 2002.

[2] R.Orito et al, "Performance of a Large Area Si PIN Photodiode Array," IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, pp.2993-2997, 2005.

[3] C.S. Yin, "The p-i-n junction-surface depletion-layer photodiode," IEEE Electron Device Lett. Vol.12, pp.422-443, 1991.

[4] จิรวัฒน์ ปราบเขต, สมเกียรติ ศุภเดช, " การพัฒนาโครงสร้างเพื่อเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ", การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29, Vol.2, หน้า 905-908, 2549.

การสร้างตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

Fabrication of Silicon PIN photodiode X-ray detector

จักรพันธ์ ศรียาภัย จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทร 0-2739-2384 E-mail: jakaphan@hotmail.com

บทคัดย่อ

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำในปัจจุบันมีหลายชนิดแต่ที่มีบทบาทสำคัญและนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายได้แก่ ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN รายงานฉบับนี้ ได้นำเสนอการทดลอง ผลการทดลองออกแบบ และสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง โดยชั้นพีซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ และมีชั้น guard ring (p^+) ล้อมรอบ ในการสร้างใช้แผ่นผลึกเริ่มต้นเป็นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานสูง 2,000 Ω.cm (หรือชั้นI) มีระนาบ (111) ส่วนของชั้นเอ็น และชั้นพีที่เข้มข้น (n^+, p^+-region) ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการแพร่ด้วยความร้อนของอะตอมฟอสฟอรัส และโบรอนตามลำดับ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่สร้างได้ ถูกนำไปวัดคุณสมบัติทั้งด้านไฟฟ้า ด้านแสง และการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ โดยใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ ที่มีแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40kV.– 100 kV. เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโตไดโอดนี้สามารถตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ดีทั้งการตรวจจับแบบโดยตรง และโดยทางอ้อมโดยผ่านชั้นสารเรืองแสง ทั้งยังมีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เป็นแบบเชิงเส้นอีกด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในอุปกรณ์เครื่องถ่ายเอ็กซ์เรย์ระบบคอมพิวเตอร์ หรือ CT สแกนเนอร์

คำสำคัญ : ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN, ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

Abstract

There are many types of semiconductor X- Ray detector but the most important and widely used one is Silicon-based PIN-type photodiode. This paper reports the experiments and results of the design and fabrication of a vertical structured silicon PIN photodiode x-ray detector, with multi-strip shape of p^+- region window layer in p^+guard ring . In fabrication, the starting material is a high resistivity of 2,000 ohm-cm. (I-type) crystalline silicon wafer with (111) orientation. The n^+-region and p^+-region were formed by thermal diffusion technique of phosphorus and boron atoms respectively. The electrical and optical characteristics of the detector were measured. In x-ray detection measurement, the x-ray tube with voltage supply of 40 - 100 kV was used as x-ray source. From experimental results, it is evident that the detector can detect the x-ray by directly and indirectly exposure. Moreover, It also shows the good output-response linearity; this means it could find a wide application in x-ray detection such as the one in computerized tomography or CT scanner.

Keywords: Silicon PIN photodiode, X-ray detector

1. บทนำ

รังสีเอ็กซ์เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01–10 nm ถูกค้นพบโดยนาย วิลเฮล์ม คอนราด เรินต์เกน ในปี ค.ศ. 1895 [1] รังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นได้หลายวิธี เช่น การเร่งลำอิเล็กตรอนให้เคลื่อนที่ในสนามไฟฟ้าแรงสูง เพื่อให้อิเล็กตรอนมีพลังงานจลน์สูงแล้วพุ่งเข้าชนกับเป้าโลหะ เช่น ทังสเตนหรือโมลิบดินัม ทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างทันทีทันใด ในกรณีนี้จะทำให้มีความร้อน และรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้น รังสีเอ็กซ์โดยวิธีนี้ สามารถผลิตได้จากหลอดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมักพบได้ในเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ของโรงพยาบาล และโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป

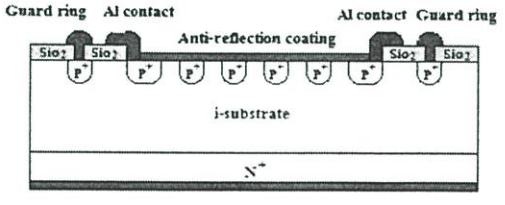
รังสีเอ็กซ์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่างๆอย่างกว้างขวาง แม้ว่าในระยะแรกๆหลังการค้นพบมักจะใช้ในวงการแพทย์เท่านั้น แต่ในปัจจุบันมีการนำรังสีเอ็กซ์ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆอย่างกว้างขวาง เช่น ในด้านการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ ในด้านความมั่นคง ด้านความปลอดภัย และด้านการทหาร นอกจากนี้ แม้ในกิจการแพทย์การใช้รังสีเอ็กซ์เพื่อการตรวจการวินิจฉัย และการบำบัดรักษาโรคก็ได้รับการพัฒนาให้ก้าวหน้ายิ่งขึ้น เช่น ในอุปกรณ์เครื่องถ่ายรังสีเอ็กซ์ระบบคอมพิวเตอร์ หรือ Computerized Tomography เป็นต้น

ในการประยุกต์ใช้รังสีเอ็กซ์ สิ่งที่จำเป็น และสำคัญยิ่งอย่างหนึ่งก็คือ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์หรือ x-ray detector ซึ่งในปัจจุบันนี้มีอยู่หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดPIN [2] ซึ่ง

เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ที่สร้างได้ง่ายโดยใช้เทคโนโลยีมาตรฐานของการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์จากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนทั่วไป สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก และเป็นวงจรรวมได้ โดยสร้างให้อยู่ร่วมกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่นๆบนแผ่นผลึกซิลิคอนชิ้นเดียวกัน

การฉายรังสีเอ็กซ์ให้แก่ตัวตรวจจับรังสี เช่น ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN สามารถทำได้ 2 วิธี [3] คือ 1) วิธีการฉายโดยตรง (Direct method) ซึ่งตัวไดโอดจะดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอ็กซ์โดยตรง และทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น 2) วิธีการฉายโดยอ้อม (Indirect method) เป็นการฉายรังสีเอ็กซ์ให้ไดโอดโดยผ่านชั้นสารเรืองแสง (Scintillator) แล้วมีการเรืองแสง หรือปล่อยคลื่นแสงออกมา แสงนี้จะตกกระทบลงไปยังพื้นที่รับแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอด ไดโอดจะดูดกลืนคลื่นแสง และทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น

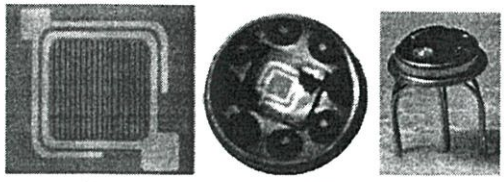
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษา ทดลองออกแบบ และสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง โดยมีชั้นพี (p+) ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ (Multi-Strip) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสี และมีชั้นการ์ดริง (Guard Ring) ชนิดพี (p+) ล้อมรอบ [4] ดังแสดงในรูปที่ 1. ซึ่งซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.5 x 1.5 mm^2 และชั้นรับรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบนั้นมีขนาดความกว้าง 20 μm และระยะห่าง 150 μm



รูปที่ 1. ภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งซึ่งมีโครงสร้างแบบแนวตั้ง

2. กระบวนการสร้าง

เริ่มจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิค (i-type) ที่มีสภาพความต้านทาน 2,000 Ω.cm ระนาบ (111) ส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n^+ layer) และชั้นพีที่เข้มข้น (p^+ layer) ของไดโอดสร้างได้โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัส และโบรอนที่อุณหภูมิ 1,000 °C เข้าไปในผลึกฐานรอง ทางด้านล่าง และด้านบนของแผ่นผลึกตามลำดับ ขั้วไฟฟ้าของไดโอดเป็นชั้นโลหะอะลูมิเนียม ซึ่งสร้างได้จากการระเหยอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Al vapor evaporation) ลวดลายของชั้นพีซึ่งมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ และลวดลายของแถบตัวนำอะลูมิเนียมที่อยู่ด้านรับแสง ถูกสร้างได้ด้วยเทคนิคของ photolithography ตัวไดโอดที่สร้างเสร็จสมบูรณ์บนแผ่นผลึกซิลิคอน จะถูกนำไปตัดแยกเป็นไดโอดแต่ละตัว และนำไปติดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋องโลหะ (can case TO-8) ดังแสดงในรูปที่ 2. ก่อนที่จะถูกนำไปทดสอบ และวัดคุณสมบัติต่างๆต่อไป

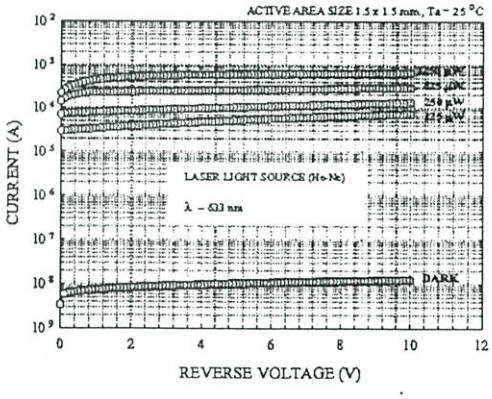


(ก) (ข)

รูปที่ 2. ภาพถ่ายตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (ก) ชิ้นซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่สร้างเสร็จสมบูรณ์ (ข) การติดตั้งอยู่บนตัวถังแบบกระป๋องโลหะ

3. การทดลองและผลการทดลอง

การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาลักษณะสมบัติ กระแส และแรงดัน (I-V characteristics) ของไดโอด ทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำ HP รุ่น 4061A ผลการทดลองพบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสมืดของไดโอด มีค่าต่ำเพียง 12.5 nA ดังในรูปที่ 3. เนื่องจากมีชั้นการ์ดริงชนิดพี (p+) ช่วยลดกระแสรั่ว

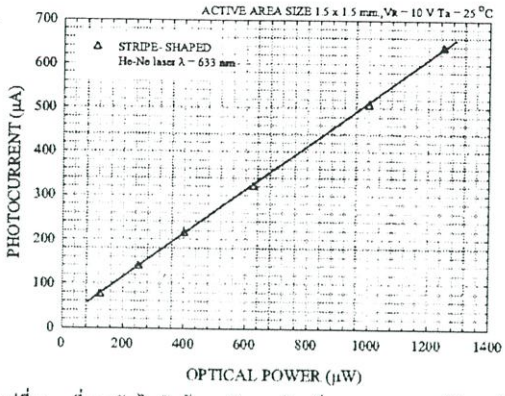


รูปที่ 3. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสง และขณะได้รับแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานค่าต่างๆ

เมื่อไดโอดถูกฉายด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm โดยมี sensitivity ประมาณ 0.508 A/W ที่พลังงาน 125 μw จะทำให้ได้กระแสแสงประมาณ 74 μA และเมื่อแสงเลเซอร์มีความเข้มหรือมีพลังงานเพิ่มขึ้น กระแสแสงจากโฟโตไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มของกระแสแสงกับพลังงานของแสงเลเซอร์จากรูปที่ 3. สามารถ

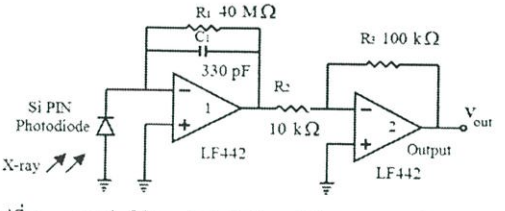
PH02

นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงได้ดังในรูปที่ 4. ซึ่งจะเห็นว่ามีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจจับแสง



รูปที่ 4. ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นกับ พลังงานของแสงเลเซอร์ อย่างเชิงเส้น

ในการทดสอบการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอด ตัวไดโอดจะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ ในลักษณะแบบ Photovoltaic mode ดังแสดงในรูปที่ 5.

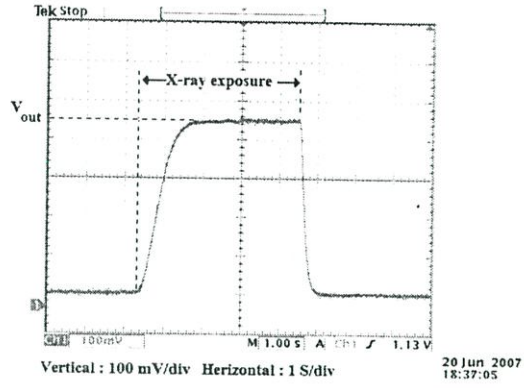


รูปที่ 5. การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

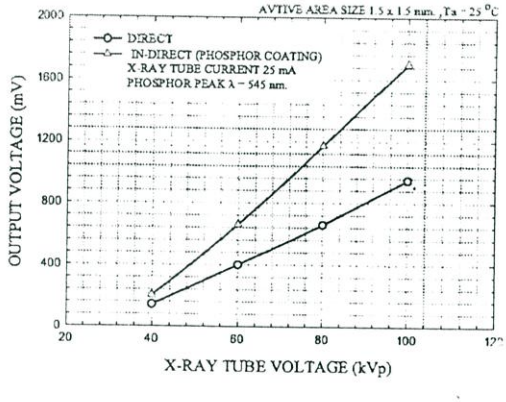
วงจรขยายภาคแรกจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสแสงที่ได้จากโฟโตไดโอด เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยมีอัตราการขยาย 40mV/nA วงจรขยายภาคที่สองเป็นวงจรขยายแรงดันเพื่อขับออกที่เอาท์พุทโดยมีอัตราการขยายเป็น 10 เท่า วงจรขยายที่ใช้เป็นไอซีออปแอมป์เบอร์ LF442 ซึ่งมีกระแสอินพุท แรงดันออฟเซต ที่ต่ำมาก

ผลการทดลองพบว่า แรงดันเอาท์พุทของวงจรขยาย จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของรังสีเอ็กซ์ซึ่งตัวซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถรับได้ รังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการทดลองได้จากเครื่อง CT scanner ยี่ห้อ Toshiba รุ่น TF-6TL-6 และความเข้มของรังสีเอ็กซ์สามารถควบคุมโดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอดรังสีเอ็กซ์ ในการทดลองนี้ใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง 40 – 100 kV และได้ทดลองให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดทำการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ทั้งแบบโดยตรง และแบบโดยอ้อมซึ่งรังสีเอ็กซ์จะถูกฉายผ่านชั้นสารเรืองแสง [5] Gadolinium Oxysulfide Activated with Terbium (Gd_2O_2S:Tb) ซึ่งมีคุณสมบัติเรืองแสงได้เมื่อถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์

จากการทดลองพบว่าในช่วงเวลาที่ไม่มีการฉายรังสีเอ็กซ์ให้กับโฟโตไดโอด แรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทของวงจรขยายจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในช่วงเวลาที่มีการฉายรังสีเอ็กซ์ และมีการดูดกลืนพลังงานของโฟโตไดโอด จะทำให้มีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่เอาท์พุทของวงจรขยายดังในรูปที่ 6. และขนาดของแรงดันเอาท์พุทจะเพิ่มขึ้นกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น ดังในรูปที่ 7.



รูปที่ 6. ลักษณะของสัญญาณแรงดันที่เอาท์พุทของวงจรขยายซึ่งวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป ขณะโฟโตไดโอดถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์

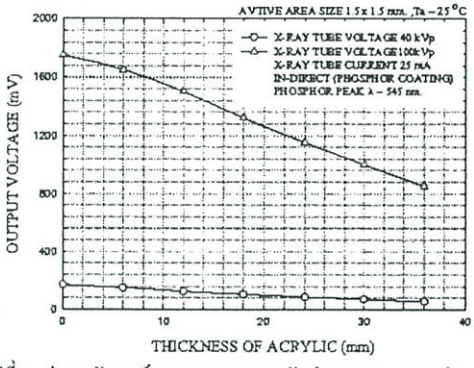


รูปที่ 7. ขนาดแรงดันเอาท์พุทของวงจรขยายกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่โฟโตไดโอดได้รับ ทั้งวิธีโดยตรง และวิธีการทางอ้อม

จากรูปที่ 7. จะเห็นว่า กรณีการฉายรังสีเอ็กซ์ ให้แก่โฟโตไดโอดโดยผ่านชั้นสารเรืองแสงหรือการรับรังสีโดยทางอ้อม จะทำให้ได้

แรงดันที่เอาท์พุทมีค่าสูงกว่ากรณีการได้รับรังสีเอ็กซ์โดยตรง ซึ่งผลดังกล่าว เกิดการเรืองแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 545 nm ซึ่งก็คือการปล่อยคลื่นในย่านความถี่แสงออกมาให้แก่ซิลิคอนโฟโตไดโอด และเนื่องจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมีคุณสมบัติสามารถตอบสนองต่อคลื่นในย่านความถี่แสงที่มองเห็นได้โดยเฉพาะแสงสีเขียวได้ดีกว่าคลื่นความถี่ในย่านรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นจึงทำให้ได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 7.

เพื่อศึกษาผลการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นอะคริลิคทึบแสง และมีความหนาค่าต่างๆ ปิดบังตัวซิลิคอนโฟโตไดโอดไว้ และฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ที่มีความเข้มคงที่ค่าหนึ่งๆ ขนาดของแรงดันเอาท์พุท และความหนาของชั้นอะคริลิคที่ใช้กั้นรังสีเอ็กซ์ ถูกนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 8.



รูปที่ 8. ค่าแรงดันเอาท์พุทของวงจรขยาย กับค่าความหนาของแผ่นอะคริลิคที่ใช้บังรังสีเอ็กซ์ให้แก่โฟโตไดโอด

ผลการทดลองพบว่าขณะที่โฟโตไดโอดถูกบังด้วยแผ่นอะคริลิคทึบแสงที่มีความหนาเพิ่มขึ้น แรงดันเอาท์พุทของวงจรขยายจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มของรังสีเอ็กซ์ถูกลดทอนลงโฟโตไดโอดจึงตรวจจับรังสีได้น้อยลงด้วย ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของโฟโตไดโอดที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (linearity) ที่ดี จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำโฟโตไดโอดนี้ไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ในอุปกรณ์ทางการแพทย์และประยุกต์ใช้ในงานต่างๆได้

4. สรุป

ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง ชั้นรับแสง (p$^+$) มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ และมีชั้นการ์ดริงล้อมรอบ ถูกออกแบบ และสร้างขึ้น ผลการทดลองพบว่าไดโอดที่สร้างขึ้นสามารถตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ดี ทั้งกรณีการตรวจจับรังสีแบบโดยตรง และแบบโดยทางอ้อม แต่ความไวในการตรวจจับรังสีแบบทางอ้อม จะสูงกว่าโดยให้แรงดันเอาท์พุทสูงกว่าราว 60 % นอกจากนี้ แรงดันเอาท์พุทของวงจรขยายจะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์อย่างเป็นเชิงเส้น ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าว ชี้ให้เห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PINที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้เป็นตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ หากมีการพัฒนา และสร้างให้อยู่ในลักษณะเป็นไดโอดที่มีขนาดเล็กๆ จำนวนหลายตัวเรียงอยู่เป็นแถวหรือ Array diode ก็สามารถที่จะไปใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในเครื่องถ่ายรังสีเอ็กซ์ระบบคอมพิวเตอร์หรือ CT scanner ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ รศ.ดร. มนัส สังวรศิลป์ และรศ.ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ห้อง CT LAB สำนักวิจัยและบริการคอมพิวเตอร์ สจล. ที่กรุณาให้ใช้ห้องทดลอง และเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

เอกสารอ้างอิง

[1] Arthur Beiser " Concepts of Modern Physics" McGraw-hill Book Company, 4th edition, pp. 61, 1987

[2] R. Orito et al, "Performance of a Large Area Si PIN Photodiode Array" Proceeding of IEEE Nuclear Science Symposium, pp.2993-2997, 2005

[3] J.A. Rowlands, " Current Advances and Future Trends in X- Ray Digital Detectors for Medical Applications" IEEE Trans. Instr. Meas., Vol.47,No.6, December. pp. 1415-1418, 1998

[4] จิรวัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ ศุภเดช "การพัฒนาโครงสร้างเพื่อเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29, vol.2, หน้า 905-908, 2549

[5] Martin Nikl , "REVIEW ARTICLE: Scintillation detectors for x-ray" Meas. Sci. Technol., Vol.17,pp.R37-R54, 2006



จักรพันธ์ ศรียาภัย, ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



จิรวัฒน์ ปราบเขต, ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโทสาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช รองศาสตราจารย์ระดับ 9 สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นาย จิรวัฒน์ ปราบเขต

วัน เดือน ปีเกิด วันที่ 27 กันยายน 2524 ที่จังหวัดตรัง

ประวัติการศึกษา พ.ศ.2545 ประกาศนียบัตรวิชาชีพชั้นสูง สาขาช่างอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีราชมงคล วิทยาเขตพระนครเหนือ

พ.ศ.2548 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ความชำนาญเฉพาะด้าน 1.) การออกแบบและกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

2.) การประยุกต์ใช้งานโฟโตไดโอด และเซลล์แสงอาทิตย์

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์

[1] สมเกียรติ ศุภเดช คงศักดิ์ อิ่มอุไร **จิรวัฒน์ ปราบเขต** และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "กระบวนการสร้างและคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด p-i-n," การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 28 (EECON 28),, Vol.2, หน้า 1097-1100,. โรงแรม เพิร์ล วิจเล็จ, ภูเก็ต, 20-21 ตุลาคม, 2548.

[2] **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, " การพัฒนาโครงสร้างเพื่อเพิ่มสมรรถนะของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ," การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29(EECON 29), Vol.2, หน้า 905-908, โรงแรม แอมบาสเดอร์ จอมเทียน, ชลบุรี, 9-10 พฤศจิกายน, 2549.

[3] คงศักดิ์ อิ่มอุไร **จิรวัฒน์ ปราบเขต** และ สมเกียรติ ศุภเดช, " ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลานาร์ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง," การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 29 (EECON 29), Vol.2, หน้า 1181-1184, โรงแรม แอมบาสเดอร์ จอมเทียน, ชลบุรี, 9-10 พฤศจิกายน, 2549.

[4] **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, "คุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีชั้นพอรัสซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ," วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 2, หน้า 37-42, มิถุนายน, 2549.

[5] **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, " ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายแถบ ," การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON 30), Vol.1, หน้า 600-603, โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว์รีสอร์ท กาญจนบุรี , 25-26 ตุลาคม, 2550.

[6] จักรพันธ์ ศรียาภัย **จิรวัฒน์ ปราบเขต** สมเกียรติ ศุภเดช, " การสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ," การประ ชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30(EECON 30), Vol.1, หน้า 552-555, โรงแรมเฟลิกซ์ริเวอร์แคว์รีสอร์ท กาญจนบุรี, 25-26 ตุลาคม, 2550.