

การศึกษาคูณสมบัติและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

แบบชนิดคอนไฟโตไดโอดชนิด PIN

STUDY ON CHARACTERIZATION AND FABRICATION OF SILICON PIN
PHOTODIODE X-RAY DETECTOR

จักรพันธ์ ศรียาภัย

JAKAPHAN SRIYAPHAI

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-040-081

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนี่เอ็กซ์
แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

STUDY ON CHARACTERIZATION AND FABRICATION OF SILICON PIN
PHOTODIODE X-RAY DETECTOR



จักรพันธ์ ศรียาภัย

JAKAPHAN SRIYAPHAI

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....105081
วัน,เดือน,ปี..... 16 พ.ย. 2552

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

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2552

KMITL-2009-EN-M-040-081

**STUDY ON CHARACTERIZATION AND FABRICATION OF SILICON PIN
PHOTODIODE X-RAY DETECTOR**

JAKAPHAN SRIYAPHAI

**A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSITUTUE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

2009

KMITL-2009-EN-M-040-081

COPYRIGHT 2009

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

Thesis Title Study on Characterization and Fabrication of Silicon PIN Photodiode X-ray Detector

นักศึกษา นายจักรพันธ์ ศรียากัย

รหัสประจำตัว 50060411

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2009-EN-M-040-081

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.สมศักดิ์ ชุมช่วย		
รศ.ดร.สมศักดิ์ เชียรศิริกุล		
ดร.อัมพร โพธิ์ไย		
รศ.ดร.มนัส สัจวงศศิลป์		
รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช		

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันอังคารที่ 26 พฤษภาคม พ.ศ. 2552 เวลา 13.00-15.00 น.

สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 3 ห้องประชุม 2

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร.กอบชัย เดชหาญ)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาคุณสมบัติและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN
นักศึกษา	นายจักรพันธ์ ศรีราษฎร์
รหัสประจำตัว	50060411
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2552
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอผลการออกแบบ กระบวนการสร้าง และทดลองตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน โครงสร้างแนวตั้ง และโครงสร้างอเรีย ในการวัดผลตอบสนองต่อแสง ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่มีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสงนั้น โครงสร้างแนวนอนมีค่าประสิทธิภาพควอนตัม 71% และกระแสมืด 2.0 μA กรณีโครงสร้างแนวตั้งมีค่าประสิทธิภาพควอนตัม 67.46% และกระแสมืด 0.55 μA ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสงถึง 21-32% การเพิ่มขึ้น p^+ guard ring สามารถลดทางเดินของกระแสรั่วในเนื้อสารได้ที่ระยะต่างๆกัน โดยโครงสร้างแนวตั้งพบว่าการครีดยังสามารถลดกระแสรั่วได้ 33.33 % ที่ระยะห่างจากพื้นที่รับแสง 50 μm . กรณีโครงสร้าง PIN แนวนอนสามารถลดกระแสรั่วได้ 22.72% ที่ระยะห่างจากพื้นที่รับแสง 125 μm . และโครงสร้าง NIP แนวนอนสามารถลดกระแสรั่วได้สูงสุดถึง 55.36% ที่ระยะห่างจากพื้นที่รับแสง 25 μm . นอกจากนี้การครีดยังสามารถช่วยลดกระแสแพร่ด้านข้างของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างอเรียได้ 95.85% เมื่อวัดผลตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ที่พลังงาน 60 kV พบว่า กรณีการตรวจจับสนธิเอ็กซ์วิธีตรง แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวนอน 25.19 % และกรณีวิธีการตรวจจับสนธิเอ็กซ์วิธีอ้อม แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวตั้ง 22.95 % ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงสามารถจ่ายแรงดันเอาต์พุตได้มากกว่าตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง 70 % ด้วยการตรวจจับสนธิเอ็กซ์วิธีตรง และ 65% ด้วยการตรวจจับสนธิเอ็กซ์วิธีอ้อม นอกจากนี้ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากกว่าโครงสร้าง NIP 20.53% ด้วยการตรวจจับสนธิเอ็กซ์วิธีอ้อม และ 43.4% ด้วยการตรวจจับสนธิเอ็กซ์วิธีตรง ทั้งยังมีคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์อย่างเป็นเชิงเส้นอีกด้วย จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพ และความเป็นไปได้สูงที่จะนำพอร์ซิลิคอนไปประยุกต์ใช้งานกับตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ในอุปกรณ์เครื่องถ่ายภาพเอ็กซ์เรย์ระบบคอมพิวเตอร์ (CT Scanner) ได้เป็นอย่างดี

Thesis	Study on Characterization and Fabrication of Silicon PIN Photodiode X-ray detector
Student	Mr.Jakaphan Sriyaphai
Student ID.	50060411
Degree	Master of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2009
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Somkiat Supadech

ABSTRACT

This thesis presents the design, the fabrication and the experiment of vertical structure, horizontal structure, and array structure Silicon PIN photodiode X-ray detector. For the horizontal structure, detectors with SiO₂ on the top of window layer hold the quantum efficiency of 71% and leakage current of 2.0 μA. In case of vertical structure X-ray detectors, the quantum efficiency of 67.46% and leakage current of 0.55 μA were measured. X-ray detectors with porous silicon on the top of window layer could offer higher photocurrent than the one with SiO₂ on the top of window layer 21-32%. Adding P⁺ guard ring could decrease the amount of leakage current in bulk. In case of vertical structure, guard ring with window to guard ring spacing of 50 μm could reduce 33.33% leakage current. For the horizontal structure PIN with window to guard ring spacing of 125 μm, the amount of 22.72% leakage current could be reduced. Similarly, for the horizontal structure NIP with window to guard ring spacing of 25 μm, the amount of 55.36% leakage current could be reduced. In addition, for the array structure guard ring could reduce lateral diffusion current of up to 98.85%. For the X-ray responsivity at 60 kV, 10 mA; output voltage of a vertical structure detector is higher than that of a horizontal structure 25.19% when direct method is applied. In contrast, output voltage of a horizontal structure X-ray detector is higher than that of a vertical structure 22.95% when indirect method is applied. Compared to the structure with SiO₂ on top, a detector with porous silicon on top could offer 70% and 65% output voltage when direct method and indirect method were applied respectively. It is also found that, a horizontal structure PIN X-ray detector could offer higher output voltage than a horizontal structure NIP ; 20.53% by indirect method and 43.4% by direct method X-ray application. The fabricated devices show good linearity of output responsivity at all designed structure. With this observation, the application of porous silicon X-ray detector in computerized tomography system is high possibility.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มโดยสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำ และคำปรึกษาจาก รองศาสตราจารย์ ดร. สมเกียรติ สุกเดช ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ข้าพเจ้ารู้สึกทราบบ้างในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ สัจวงศศิลป์ และ รองศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดลอง และเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

ขอขอบพระคุณ ทันตแพทย์สถานพร จันทร หัวหน้ากลุ่มงานทันตสาธารณสุข สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดฉะเชิงเทรา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทันตกรรม และเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์

ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาให้กับข้าพเจ้า

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติ พี่ น้องของข้าพเจ้า ที่ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจทางด้านการเรียนมาโดยตลอด ทำให้ข้าพเจ้าสามารถทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมาจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบมอบแด่ผู้มีพระคุณทุกท่าน

จักรพันธ์ ศรียาภัย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	XI
สารบัญรูป.....	XII
รายการคำย่อ.....	XXIII
รายการสัญลักษณ์.....	XXIV
รายการศัพท์เทคนิค.....	XXV
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....	2
1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....	2
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย.....	4
1.5 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
บทที่ 2 ด้ตรวจจ้บรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโต ได โอคชนิด PIN.....	8
2.1 รังสีเอ็กซ์.....	9
2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์.....	10
2.1.2 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์.....	11
2.1.3 การกำเนิดรังสีเอ็กซ์.....	11
2.2 การนำรังสีเอ็กซ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ.....	12
2.2.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์.....	12
2.2.2 การประยุกต์ใช้งานด้านความปลอดภัย.....	14
2.2.3 การประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตร.....	15
2.2.4 การประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์ด้านอื่นๆ.....	15

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3 ชนิดของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์.....	15
2.3.1 ฟิล์มรังสีเอ็กซ์.....	15
2.3.2 น้ำยาไวแสง.....	15
2.3.3 แชนแนลอิเล็กทรอนิกส์.....	16
2.3.4 ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์.....	16
2.3.5 ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์.....	16
2.3.5.1 โฟโตไดโอดชนิด PN.....	17
2.3.5.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN.....	18
2.3.5.3 โฟโตไดโอดชนิดอะวาแลนซ์.....	18
2.3.5.4 โฟโตไดโอดชนิด MSM.....	19
2.4 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	21
2.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	21
2.4.2 หลักการทำงานของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	23
2.4.3 วงจรสมมูลของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	23
2.4.4 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ แบบโฟโตไดโอด.....	24
2.5 โครงสร้าง และหลักการทำงานของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด ชนิด PIN.....	25
2.5.1 หลักการทำงานของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN.....	26
2.5.2 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ.....	29
2.5.3 ความจุไฟฟ้าย่อยต่อ.....	29
2.6 ลักษณะสมบัติต่างๆของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด PIN... 29	
2.6.1 ประสิทธิภาพควอนตัม.....	29
2.6.2 สภาพการตอบสนองทางแสง.....	30
2.6.3 ความเร็วในการตอบสนอง.....	31
2.6.4 เวลาตอบสนอง และแบนด์วิดท์.....	33
2.6.5 การเกิดสัญญาณรบกวน.....	34

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.6.6 อิทธิพลของอุณหภูมิ.....	36
2.6.7 พฤติกรรมการเกิดกระแสมืด.....	37
2.6.7.1 กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย.....	38
2.6.7.2 กระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่.....	39
2.6.7.3 กระแสรั่วบริเวณสัมผัส.....	40
2.7 การ์ดริง.....	40
2.8 โหมดการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	41
2.8.1 โหมดโฟโตคอนดักทีฟ.....	42
2.8.2 โหมดโฟโตโวลตาอิก.....	43
2.9 วิธีการตรวจจับรังสีเอ็กซ์.....	44
2.10 พอร์สซิลิคอน.....	45
2.10.1 ประเภทของพอร์สซิลิคอน.....	46
2.10.2 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน.....	48
2.10.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน.....	49
2.10.3.1 วิธีการกัดข้อมสี่.....	49
2.10.4 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน.....	51
2.10.5 ศักยภาพของพอร์สซิลิคอน.....	51
2.10.5.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนกับซิลิคอนโฟโตไดโอด.....	53
2.10.5.2 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์.....	53
บทที่ 3 เทคโนโลยีการสร้าง กระบวนการสร้าง และการทดลอง.....	54
3.1 เทคโนโลยีการสร้าง.....	54
3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน.....	54
3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	57
3.1.3 กระบวนการแพร่สารเจือ.....	57
3.1.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน.....	60
3.1.5 กระบวนการซินเตอร์ริง.....	62

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

3.2 การออกแบบลวดลายโฟโตมาส์ค.....	62
3.2.1 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN แนวนอนและแนวตั้ง.....	63
3.2.2 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN ที่มีชั้นพอร์สบนพื้นที่รับแสง.....	64
3.2.3 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN และ NIP.....	65
3.2.4 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN ที่มีชั้นอินทรีนซิคค่าต่างๆ.....	66
3.2.5 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN ที่มีชั้น P ⁺ guard ring.....	67
3.2.6 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN ที่มีพื้นที่รับแสง และความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ.....	68
3.2.7 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างออร์ย์.....	69
3.2.8 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แนวนอน.....	71
3.2.9 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แนวตั้ง.....	73
3.2.10 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างออร์ย์.....	75
3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง.....	75
3.3.1 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN แนวตั้งที่มีซิลิคอนไดออกไซด์ บนชั้นรับรังสี.....	75
3.3.2 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN แนวตั้งที่มีชั้นพอร์สบนชั้นรับรังสี.....	87
3.3.3 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN แนวนอนที่มีซิลิคอนไดออกไซด์ บนชั้นรับรังสี.....	93
3.3.4 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN แนวนอนที่มีชั้นพอร์สบนชั้นรับรังสี.....	103
3.4 การทดลอง.....	110
3.4.1 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง.....	110
3.4.1.1 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า.....	110
3.4.1.2 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า.....	111
3.4.1.3 การหาความเร็วในการตอบสนอง.....	112
3.4.1.4 การวัดสภาพการตอบสนองทางแสง.....	113
3.4.2 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์.....	114

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

4.6	ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP	142
4.7	ผลของระยะชั้นอินทรีนซิค.....	145
4.8	ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง.....	148
4.8.1	ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริงของตัวตรวจจับ รังสีเอ็กซ์ชนิด PIN แบบแนวนอน.....	148
4.8.2	ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริงของตัวตรวจจับ รังสีเอ็กซ์ชนิด PIN แบบแนวตั้ง.....	151
4.8.3	การเปรียบเทียบซิลิคอนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด PIN โครงสร้างที่มีการ์ดริง แบบแนวนอนและแนวตั้ง.....	152
4.9	ผลของพื้นที่รับแสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง ที่มีต่อความหนาแน่นกระแส.....	153
4.10	การศึกษาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โครงสร้างอเรีย.....	157
4.10.1	ผลของระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างอเรียแบบที่ไม่มีการ์ดริง.....	157
4.10.2	ผลของระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างอเรียแบบที่มีการ์ดริง.....	161
4.10.3	ผลของการ์ดริงที่มีต่อตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย.....	163
บทที่ 5	ผลการทดลองทางรังสีเอ็กซ์และการอภิปราย.....	166
5.1	การกำหนดระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์.....	167
5.2	ผลของการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม.....	168
5.2.1	ผลของการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน.....	169
5.2.2	ผลของการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง.....	170

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.2.3 การเปรียบเทียบการตรวจจับรังสีเอกซ์วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม ของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้ง.....	171
5.3 ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ชนิด PIN ที่มีพอร์สซาลิกอนบนชั้นรับรังสี.....	173
5.3.1 ผลของพอร์สซาลิกอนที่อยู่บนชั้นรับรังสีของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน.....	174
5.3.2 ผลของพอร์สซาลิกอนที่อยู่บนชั้นรับรังสีของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ ชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง.....	176
5.4 ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP	179
5.5 ผลของระยะชั้นอินทรีนซิค.....	181
5.6 ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง.....	183
5.7 ผลการลดทอนของรังสีเอกซ์ต่อวัสดุตัวอย่าง.....	183
บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ.....	186
เอกสารอ้างอิง.....	190
ภาคผนวก.....	193
ภาคผนวก ก. ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	194
ประวัติผู้เขียน.....	205

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้าที่
2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารเรืองแสงประเภทต่างๆ.....	45
3.1 ขนาดพื้นที่รับแสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง.....	69
4.1 ขนาดพื้นที่รับแสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงรูปแบบต่างๆ.....	154

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) แบบแนวตั้ง (ข) แบบแนวนอน.....	6
1.2 โครงสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างออร์ย์.....	6
1.3 ภาพรวมขั้นตอนการทดลองบทที่ 4 และบทที่ 5.....	7
2.1 แผนภูมิสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า.....	8
2.2 วิลเฮม คอนราด เรินท์เกน ผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก.....	10
2.3 ภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์ภาพแรก ซึ่งเป็นภาพถ่ายมือซ้ายของภรรยาเรินท์เกน.....	10
2.4 การประยุกต์ใช้รังสีเอ็กซ์ (ก) CT scanner (ข) ภาพที่สร้างจาก CT scanner.....	13
2.5 ภาพ 3 มิติที่สร้างจากเครื่อง CT scanner แสดงให้เห็นถึงวัตถุอันตรายในการเป่าเดินทาง คือมีดและระเบิดซีโฟร์.....	14
2.6 แสดงภาพโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน.....	17
2.7 โฟโตไดโอดชนิด PN (ก) โครงสร้างภาคตัดขวางขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ.....	17
2.8 โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด PIN.....	18
2.9 โฟโตไดโอดชนิด APD (ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง (ข) แถบพลังงานแสดง การเคลื่อนที่ของพาหะ.....	19
2.10 โฟโตไดโอดชนิด MSM.....	19
2.11 วงจรสำหรับต่อร่วมกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด.....	20
2.12 กระบวนการคูคกิ้นแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	21
2.13 แสงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การคูคกิ้นแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ.....	22
2.14 โครงสร้างภาคตัดขวางโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น.....	23
2.15 วงจรสมมูลของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	24
2.16 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดัน ไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด.....	25
2.17 โครงสร้างภาคตัดขวางตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN.....	26
2.18 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แสดงแถบพลังงาน ขณะไม่ได้รับการไบอัส และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	27
2.19 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น.....	27
2.20 การลดลงของพลังงานแสงที่ตกกระทบผิวสารกึ่งตัวนำตามระยะความลึก.....	30

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.21 แสดงสภาพการตอบสนองทางแสงของซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด PIN.....	31
2.22 การตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ.....	33
2.23 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสเปกตรัมเอาต์พุตของซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด PIN.....	36
2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN.....	37
2.25 แหล่งกำเนิดกระแสมืดชนิดต่างๆของโฟโตไดโอด.....	38
2.26 การเกิดกระแสมืดแบ่งตามบริเวณของไดโอด.....	38
2.27 กลไกการลดกระแสมืดของซิลิกอนโฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างที่ไม่มีกั้วครีง (ข) โครงสร้างที่มีกั้วครีง.....	41
2.28 การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ.....	42
2.29 วงจรตัวอย่างการใช้งานโหมดโฟโตคอนดักทีฟ ที่มีการตอบสนองความเร็วสูง หรือใช้กับแสงพลังงานสูง.....	43
2.30 การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลตาอิก.....	43
2.31 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิกอนโฟโตไดโอด ชนิด PIN แบบแนวตั้ง (ก) วิธีการตรวจจับโดยตรง (ข) วิธีการตรวจจับโดยอ้อม.....	44
2.32 ภาพถ่ายพอร์สซิลิกอน (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง.....	45
2.33 ประเภทของพอร์สซิลิกอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (ก) ลักษณะหลุมตัน(ข) ลักษณะถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (ง) ลักษณะโพรงปิด (จ) ลักษณะทะเล.....	46
2.34 ประเภทของพอร์สซิลิกอนแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงขวดหมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (ค) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด.....	47
2.35 ประเภทของพอร์สซิลิกอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน.....	47
2.36 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิกอนที่จำนวนอะตอมต่าง ๆ.....	48
2.37 การสร้างชั้นพอร์สซิลิกอนด้วยวิธีการกัดย้อนสี.....	50
3.1 ภาคตัดขวางของแผ่นซิลิกอนไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน.....	54
3.2 เตาสำหรับการสร้างชั้นซิลิกอนไดออกไซด์.....	55
3.3 ความสัมพันธ์ของความหนาซิลิกอนไดออกไซด์กับเวลาการออกซิเดชัน ในการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบแห้ง.....	56

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.4 ความสัมพันธ์ของความหนาซิลิคอน ไดออกไซด์กับเวลาการออกซิเดชัน ในการสร้างซิลิคอน ไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบขึ้น.....	56
3.5 กราฟที่ใช้ในการคำนวณปริมาณสารเจือ (ก) solid solubility ของ ธาตุต่างๆในซิลิคอน (ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ.....	58
3.6 ความหนาชั้น SiO ₂ ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส.....	59
3.7 โครงสร้างเครื่อง filament evaporation.....	61
3.8 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด ชนิด PIN ที่มีซิลิคอน ไดออกไซด์บนชั้นรับแสง (ก) โครงสร้างแนวนอน (ข) โครงสร้างแนวนอน.....	63
3.9 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด ชนิด PIN ที่มีฟอสซิลิคอนบนชั้นรับแสง (ก) โครงสร้างแนวนอน (ข) โครงสร้างแนวนอน.....	64
3.10 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอน (ก) ชนิด PIN (ข) ชนิด NIP.....	65
3.11 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนที่มีระยะชั้นอินทรินซิกค่าต่างๆ.....	66
3.12 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN (ข) โครงสร้างแนวนอนชนิด NIP (ค) โครงสร้างแนวตั้งชนิด PIN.....	67
3.13 โครงสร้าง 3 มิติของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพื้นที่รับแสงและเส้นรอบรูปค่าต่างๆ.....	69
3.14 ภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย (ก) โครงสร้างอเรียที่ไม่มีการ์ดริง (ข) โครงสร้างอเรียที่มีการ์ดริง.....	70
3.15 ภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรียที่ประกอบด้วย ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ 16 ตัว	71
3.16 ลวดลายต้นแบบการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน (ก) แผ่นที่ 1 P ⁺ mask (ข) แผ่นที่ 2 N ⁺ mask (ค) แผ่นที่ 3 Contact mask (ง) แผ่นที่ 4 Metal mask (จ) แผ่นที่ 5 Porous mask.....	72

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.17 กระจกต้นแบบการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน.....	73
3.18 ลวดลายต้นแบบการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง (ก) แผ่นที่ 1 P ⁺ mask (ข) Contact mask (ค) แผ่นที่ 3 Metal mask (ง) แผ่นที่ 4 Porous mask.....	74
3.19 กระจกต้นแบบการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง.....	74
3.20 ภาพถ่ายตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่สร้างเสร็จ (ก) โครงสร้างแนวนอนบนแผ่นผลึกซิลิคอน (ข) โครงสร้างแนวนอนบนแผ่น ผลึกซิลิคอน (ค) ภาพขยายโครงสร้างแนวนอน (ง) ภาพขยายโครงสร้างแนวตั้ง (จ) ภาพขยายโครงสร้างอเรีย.....	109
3.21 ภาพถ่ายตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่ถูกบรรจุบนตัวถัง แบบกระป๋องโลหะ	110
3.22 ไดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า.....	111
3.23 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด.....	111
3.24 ไดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า.....	112
3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้า.....	112
3.26 ไดอะแกรมการหาความเร็วในการตอบสนอง.....	113
3.27 การตอบสนองทางความถี่.....	113
3.28 ไดอะแกรมการหาสภาพการตอบสนอง.....	114
3.29 สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัม.....	114
3.30 ไดอะแกรมการฉาย และการวัดการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ (ก) การตรวจจับวิธีตรง (ข) การตรวจจับวิธีอ้อม.....	115
3.31 การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์.....	115
3.32 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท.....	116
4.1 แผนผังการทดลองตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN.....	117

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ.....	119
4.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสตรง.....	120
4.4 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดัน ไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนขณะที่ไม่ได้รับแสงเมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสตรง...	121
4.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ.....	122
4.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับ แรงดัน ไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ.....	122
4.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	123
4.8 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดัน ไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนขณะที่ไม่ได้รับแสงเมื่อ ได้รับแรงดัน ไบอัสตรง..	124
4.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ.....	124
4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบแนวนอนขณะที่ ได้รับแสง และไม่ได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	125
4.11 การเปลี่ยนแปลงกระแสแสงของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบแนวนอน ที่ความเข้มแสง ค่าต่างๆ.....	126
4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ได้รับแสง และไม่ได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	127
4.13 การเปลี่ยนแปลงกระแสแสงซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ.....	127
4.14 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและ โครงสร้างแนวตั้ง.....	128

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้าง แนวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง.....	129
4.16 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และโครงสร้างแนวตั้ง.....	130
4.17 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน (ก) พอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง (ข) ซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง.....	131
4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	132
4.19 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	133
4.20 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มี ชั้นรับแสงแบบต่างๆ (ก) พอร์สซิลิคอน (ข) ซิลิคอนไดออกไซด์.....	134
4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	134
4.22 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง.....	135
4.23 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและโครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง...	136
4.24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและ โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง.....	137
4.25 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และ โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง.....	138
4.26 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง	139

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27	กระแสนแสงของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิกอน และซิลิกอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง140
4.28	เปรียบเทียบกระแสนแสงของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิกอน และซิลิกอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง.....141
4.29	ตำแหน่งบริเวณปลดพาหะ (ก) โครงสร้างแนวนอน (ข) โครงสร้างแนวตั้ง.....142
4.30	โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน โครงสร้างต่างๆ (ก) PIN (ข) NIP.....143
4.31	กระแสนแสงที่ได้จากซิลิกอน โฟโตไดโอดแนวนอนที่มีพื้นที่รับแสงชนิด PIN และ NIP.....143
4.32	ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างต่างๆ (ก) PIN (ข) NIP.....144
4.33	โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน ที่มีระยะชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ.....145
4.34	กระแสนมืดของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนที่ความกว้างชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ.....146
4.35	กระแสนแสงของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนที่ความกว้างชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ.....147
4.36	ความสัมพันธ์ระหว่างระยะชั้นอินทรีนซิกและกระแสนมืดต่อกระแสนมืดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN.....147
4.37	โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิกอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแบบแนวนอน ที่มีกัอร์ดริง (ก) PIN พื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้น (ข) NIP พื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มข้น.....148
4.38	กระแสนมืดของซิลิกอน โฟโตไดโอดแบบที่มีกัอร์ดริง โครงสร้าง PIN และ NIP และซิลิกอน โฟโตไดโอดแบบที่ไม่มีกัอร์ดริง.....149
4.39	กลไกการลดกระแสนมืดของซิลิกอน โฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างที่ไม่มีกัอร์ดริง (ข) โครงสร้างที่มีกัอร์ดริง150
4.40	การเกิดกระแสนมืดที่ผิวสัมผัส Si/SiO ₂ ของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีกัอร์ดริง (ก) PIN พื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้น (ข) NIP พื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มข้น.....151
4.41	โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีกัอร์ดริง.....152
4.42	กระแสนมืดของซิลิกอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีกัอร์ดริง ที่ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและกัอร์ดริงค่าต่างๆ.....152

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.43 กระแสเม็คของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแวนอนและแนวตั้งที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริงค่าต่างๆ.....	153
4.44 มุมมองด้านบนของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง.....	154
4.45 ความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสง และความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาว เส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง ของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ไม่ได้รับแสง ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ.....	155
4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและอัตราส่วนพื้นที่ต่อความยาวเส้นรอบรูป.....	156
4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเม็คและอัตราส่วนพื้นที่ต่อความยาวเส้นรอบรูป.....	156
4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ต่อความยาวเส้นรอบรูปและกระแสแสงต่อ กระแสเม็คของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN.....	157
4.49 โครงสร้างซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โครงสร้างอเรียที่ไม่มีการ์ดริง.....	158
4.50 วงจรวัดกระแสแพร่ด้านข้าง.....	158
4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเม็คที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีการ์ดริง.....	159
4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีการ์ดริง.....	160
4.53 เปรียบเทียบกระแสแพร่ของโฟโตไดโอดที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีการ์ดริง ขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง.....	160
4.54 โครงสร้างซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โครงสร้างอเรียที่มีการ์ดริง.....	161
4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเม็คที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่มีการ์ดริง.....	162
4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเม็คที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีการ์ดริง.....	162
4.57 เปรียบเทียบกระแสแพร่ด้านข้างของโฟโตไดโอดที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่มีการ์ดริง ขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง.....	163
4.58 กระแสการแพร่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรียแบบที่ไม่มีการ์ดริง และมีการ์ดริง.....	164
4.59 ทิศทางการแพร่ประจุพาหะของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบมีการ์ดริง โครงสร้างอเรีย.....	164

สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.60 กระแสมีคของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย.....	165
5.1 แผนผังการทดลองตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN.....	166
5.2 การต่อซิลิคอน โฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์.....	167
5.3 วงจรทดลองเพื่อหาระยะห่างระหว่างหัวฉายรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์.....	167
5.4 ระยะห่างระหว่างหัวฉายรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเอาท์พุทเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น.....	168
5.5 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีซิลิคอน ไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี.....	169
5.6 แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน.....	169
5.7 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีซิลิคอน ไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี.....	170
5.8 แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง.....	171
5.9 แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้ง ด้วยวิธีการตรวจจับรังสีเอ็กซ์วิธีตรง.....	171
5.10 การดูกลืนรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (ก) โครงสร้างแนวนอน (ข) แนวตั้ง.....	172
5.11 แรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้ง ด้วยวิธีการฉายรังสีเอ็กซ์วิธีอ้อม.....	173
5.12 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสี.....	174
5.13 แรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทของวงจรในการตรวจจับแบบวิธีตรงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอน ไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี.....	174
5.14 แรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทของวงจรในการฉายแบบวิธีอ้อมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอน ไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี.....	175

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
5.15 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์ซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี.....	176
5.16 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับรังสี.....	177
5.17 แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรในการตรวจจับวิธีตรงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ ซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิคอน และซิลิคอน ไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี.....	177
5.18 แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรในการตรวจจับวิธีอ้อมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ ซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นรับรังสีแบบพอร์ซิลิคอน และแบบซิลิคอนไดออกไซด์	178
5.19 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นรับแสงแบบพอร์ซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์.....	179
5.20 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอน (ก) PIN (ข) NIP.....	179
5.21 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN....	180
5.22 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด NIP....	180
5.23 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP ด้วยการตรวจจับวิธีตรงและวิธีอ้อม.....	181
5.24 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ที่มีระยะชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ.....	182
5.25 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่ความกว้างชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ.....	182
5.26 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดออร์ธอนิค PIN โครงสร้างแนวตั้ง.....	183
5.27 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ความหนาแผ่นอะคริลิกค่าต่างๆ.....	184
5.28 ภาพหลังจากการควอนไตเซชันแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต.....	184

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Al	Aluminium	อะลูมิเนียม
ARC	Anti-Reflection Coating	ชั้นลดการสะท้อนแสง
DC	Direct Current	ไฟฟ้ากระแสตรง
DI	De-Ionization water	น้ำปลอดไอออน
P.R.	Photoresist	น้ำยาไวแสง
PS	Porous Silicon	พอร์สซิลิคอน
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
h	คือ	ค่าคงตัวของพลังค์
I_p	คือ	กระแสแสง
I_{sc}	คือ	กระแสลัดวงจร
J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงตัวของ โบสค์มันน์
L_c	คือ	ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน
L_h	คือ	ระยะการแพร่ของโฮล
N_A	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้รับ
N_D	คือ	ความหนาแน่นของสารเจือผู้ให้
N_i	คือ	ความหนาแน่นอินทรินซิก
P_{in}	คือ	กำลังงานไฟฟ้าอินพุต
q	คือ	ประจุอิเล็กตรอน
R_s	คือ	ความต้านทานอนุกรม
R_{sh}	คือ	ความต้านทานขนาน
T	คือ	อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_R	คือ	แรงดันไบอัสย้อนกลับ
η	คือ	ประสิทธิภาพของการเปลี่ยนพลังงาน
λ	คือ	ความยาวคลื่น
τ	คือ	อายุของพาหะ
U	คือ	ความถี่คลื่น

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

กระบวนการโซคราสกี
กระบวนการรวมตัวใหม่
กระแสมืด
กระแสรั่วไหล
กระแสแสง
กระแสอิ่มตัว
การกัดข้อมสี
การดักจับแสง
การแพร่สารเจือด้วยความร้อน
การออกซิเดชันด้วยความร้อน
ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค
ควอนตัมไซส์เอฟเฟค
เครื่องถ่ายภาพซีทีเอกซเรย์ระบบคอมพิวเตอร์
ชั้นลดการสะท้อนแสง
เซนแนลอิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์
ซินเตอร์ริง
ซิลิคอนไดออกไซด์
ดัชนีหักเห
ไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น
น้ำยาไวแสง
ผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอน
ผลึกหลายรูปของซิลิคอน
โฟตอน
โฟโตคอนดักทีฟโหมด
โฟโตมาสก์
โฟโตลิโธกราฟี
โฟโตลูมิเนสเซนซ์
โฟโตโวลตาอิกโหมด

ภาษาอังกฤษ

Czochralski process
recombination process
dark current
leakage current
photocurrent
saturation current
stain etching
light trapping
thermal diffusion
thermal oxidation
quantum confinement effect
quantum size effect
Computerized Tomography
anti-reflection layer
channel electron multipliers
sintering
silicon dioxide
reflective index
p-n junction diode
photoresist
single crystalline silicon
poly crystalline silicon
photon
photoconductive mode
photomask
photolithography
photoluminescence
photovoltaic mode

สเปกตรัม

spectrum

สารกึ่งตัวนำ

semiconductor

สารกึ่งตัวนำชนิดพี

p-type semiconductor

สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น

n-type semiconductor

สารเจือปน

impurity

สารเรืองแสง

scintillator

แสงที่ตามองเห็น

visible light

อิเล็กตรอน

electron

อิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์

electroluminescence

โฮล

hole

1.1 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นเป็นครั้งแรกของประเทศไทย ที่ห้องปฏิบัติการอิเล็กทรอนิกส์ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง โดยในงานวิจัยนี้จะสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN และศึกษาถึงลักษณะคุณสมบัติที่สำคัญและการออกแบบของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีประสิทธิภาพทางควอนตัมที่ดี

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังการศึกษา วิจัย และพัฒนาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โดยมีวัตถุประสงค์หลักอยู่ 3 ประการ คือ

1.) การเพิ่มกระแสแสง โดยการสร้างพอร์ซิลิคอน (porous silicon : PS) แทนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งพอร์ซิลิคอนนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง (absorption) สูง นอกจากนี้พอร์ซิลิคอนมีการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งจากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้มีความเป็นไปได้สูงในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ให้สูงขึ้น โดยการนำพอร์ซิลิคอนมาสร้างอยู่บนชั้นรับรังสี

2.) การลดกระแสมืด นอกจากคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์จะเป็นคุณสมบัติที่สำคัญของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN แล้ว กระแสมืด (dark current) หรือ กระแสรั่ว (leakage current) ยังถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN การสร้างชั้นกักรังสีชนิดพีเข้มชั้น (P⁺ guard ring) จะช่วยลดกระแสรั่วได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตาม ตำแหน่งในการสร้างชั้นกักรังสี ยังมีผลในการช่วยลดกระแสรั่วอีกด้วย

3.) การพัฒนาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรย์ (array) ในการใช้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในการสร้างภาพจากรังสีเอ็กซ์ เช่นการใช้ ในอุปกรณ์เครื่องถ่ายภาพรังสีเอ็กซ์ระบบคอมพิวเตอร์ (computerized tomography) เป็นต้น ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ตัวเดียวกันนั้น จะถูกออกแบบและสร้างเรียงกันเป็นแถวเดียวเพื่อให้สามารถสแกนวัตถุได้

1.3 สมมติฐานของการศึกษา

ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีจำหน่ายอยู่ในท้องตลาดทั่วไป ส่วนใหญ่แล้วจะมีซิลิคอนไดออกไซด์อยู่บนชั้นรับแสงเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง แต่เมื่อไม่นานมานี้ได้มีรายงานการประยุกต์ใช้พอร์ซิลิคอนมาสร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ [2] และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบพลาสมา [3] แทนการใช้ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของซิลิคอนโฟโตไดโอดให้สูงขึ้น โดยพอร์ซิลิคอน (porous silicon : PS) คือซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุน สามารถสร้างได้จากวิธีการกัดข้อมสี (stain etching) ซึ่งพอร์

ซิลิคอนนั้นมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง (absorption) สูง เนื่องจากโครงสร้างที่เป็นพื้นที่ผิวขรุขระอย่างมากของพอร์ซิลิคอน ทำให้พอร์ซิลิคอนมีอัตราส่วนพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ซึ่งช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสง นอกจากนี้จากการที่พอร์ซิลิคอนมีลักษณะเป็นรูพรุนทำให้มีการสะท้อนแสงที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งพอร์ซิลิคอนจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางแสงให้สูงขึ้น จากเหตุผลที่กล่าวมาทำให้มีความเป็นไปได้สูงในการพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ให้สูงขึ้น โดยการนำพอร์ซิลิคอนมาสร้างอยู่บนชั้นรับรังสี

นอกจากนี้กระแสมืด (dark current) หรือกระแสรั่ว (leakage current) ยังถือว่าเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ กระแสมืดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เกิดขึ้นได้ทั้งในบริเวณเนื้อสารและที่บริเวณผิวหน้าของไดโอดโดยเป็นผลรวมของกระแสต่างๆ เช่น กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย กระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 โดยที่กระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 จะมีค่าสูง การสร้างชั้นกักรังสีชนิดพีเข้มชั้น (P⁺ guard ring) จะช่วยลดกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 และในเนื้อสาร ซึ่งถือว่าการลดกระแสรั่วได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามแม้ว่าการสร้างชั้นกักรังสีจะสามารถช่วยลดกระแสรั่วได้ดี แต่ตำแหน่งที่จะสร้างชั้นกักรังสีนั้น ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของกักรังสีในการลดกระแสรั่วให้สูงขึ้น

เพื่อพัฒนาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ให้สามารถไปประยุกต์ใช้งานจริงตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ จะถูกออกแบบและสร้างเรียงกันเป็นแถวเดียว ซึ่งการออกแบบให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์อยู่ใกล้กันมากๆ การทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ตัวหนึ่งๆ จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ตัวอื่นซึ่งอยู่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากเมื่อตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้รับรังสีเอ็กซ์ค่าหนึ่ง จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้น ซึ่งคู่อิเล็กตรอน-โฮล นี้เอง จะเกิดการแพร่ไปสู่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ตัวอื่นที่ไม่ได้รับรังสีหรือได้รับรังสีเอ็กซ์ค่าอื่น ซึ่งจะทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้มีค่าเปลี่ยนแปลงไป ส่งผลให้ภาพที่ได้จากการแปลสัญญาณไฟฟ้ามีค่าผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง ซึ่งเมื่อระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์มีค่าเพิ่มขึ้น การรบกวนกันของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แต่ละตัวจะน้อยลง อย่างไรก็ตามระยะห่างของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มากขึ้น จะทำให้ความละเอียดของภาพที่สร้างได้น้อยลงไปด้วย

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือ

1.) ชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกักข้อมสี เมื่อนำมาสร้างอยู่บนชั้นรับรังสีของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้

2.) การสร้างชั้นคาร์ดริงล้อมรอบพื้นที่รับรังสีของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN สามารถช่วยลดกระแสมืดได้ นอกจากนี้ตำแหน่งของการสร้างชั้นคาร์ดริงจะมีส่วนช่วยในการลดกระแสมืดที่ต่างกัน

3.) ระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย มีผลต่อกระแสแพร่ของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ นอกจากนี้การใส่ชั้นคาร์ดริงล้อมรอบตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แต่ละตัว สามารถลดผลจากกระแสแพร่ได้

1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

พอร์สซิลิคอน (PS) เป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการดูดกลืนแสงได้ดีและมีการสะท้อนแสงที่ต่ำ ชั้นพอร์สซิลิคอนจึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง และรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ซึ่งชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้หลายวิธี แต่วิธีที่ง่ายและประหยัดที่สุดคือ วิธีการกัดข้อมสี่

คาร์ดริง เป็นชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีเข้มข้น (P^+) เหมือนพื้นที่รับรังสีของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN หน้าที่สำคัญของคาร์ดริงคือ การลดกระแสมืดของโฟโตไดโอด โดยคาร์ดริงจะถูกสร้างรอบตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์เอาไว้เพื่อช่วยลดกระแสมืด กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของกระแสมืดคือ สนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์จะถูกเบี่ยงเบนให้มีทิศทางไปยังคาร์ดริงส่งผลให้พาหะที่จะก่อให้เกิดกระแสมืดที่เกิดในเนื้อสาร และระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 เคลื่อนที่ไปยังคาร์ดริงแทนที่จะไปยังตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้กระแสมืดของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ลดลง

ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย เป็นการออกแบบให้ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์เรียงติดกันเป็นแถว การที่ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์อยู่ใกล้กันมากๆ คู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้น จะสามารถแพร่ไปสู่ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ตัวอื่น กลายเป็นกระแสการแพร่ซึ่งจะเป็นกระแสที่ไปรบกวนการทำงานของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ตัวอื่น ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าจริงที่ได้จากรังสีเอ็กซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงไปส่งให้ภาพที่ได้จากการแปลสัญญาณ ไฟฟ้ามืดค่าผิดเพี้ยนไปจากความเป็นจริง ซึ่งเมื่อระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์มีค่าเพิ่มขึ้น การรบกวนกันของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แต่ละตัวจะน้อยลง อย่างไรก็ตาม การใส่คาร์ดริงจะทำให้กระแสแพร่มีค่าลดลง ทำให้ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์สามารถสร้างได้ใกล้กันมากขึ้น ส่งผลให้ภาพที่สร้างจากรังสีเอ็กซ์มีความละเอียดเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ การออกแบบพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น วัสดุที่สร้างบนชั้นรับแสง โครงสร้าง PIN และ NIP ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและคาร์ดริง ความกว้างชั้นอินทรีนซิก ขนาดของพื้นที่รับ

แสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง และระยะห่างระหว่างไดโอดโครงสร้างออร์เบ่ เป็นต้น ซึ่งพารามิเตอร์เหล่านี้เมื่อได้รับการออกแบบที่เหมาะสม จะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด และการลดกระแสมีด

1.5 ขอบเขตงานวิจัย

ขอบเขตงานวิจัยนี้อยู่ที่การหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า การตอบสนองทางแสง และการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ โดยทดลองด้านทางแสง และรังสีเอ็กซ์ พร้อมทั้งเปรียบเทียบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง

1.6 ขั้นตอนการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอการศึกษา และพัฒนาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง โดยศึกษาทั้งการตอบสนองทางแสง และการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีหัวข้อการศึกษาดังนี้

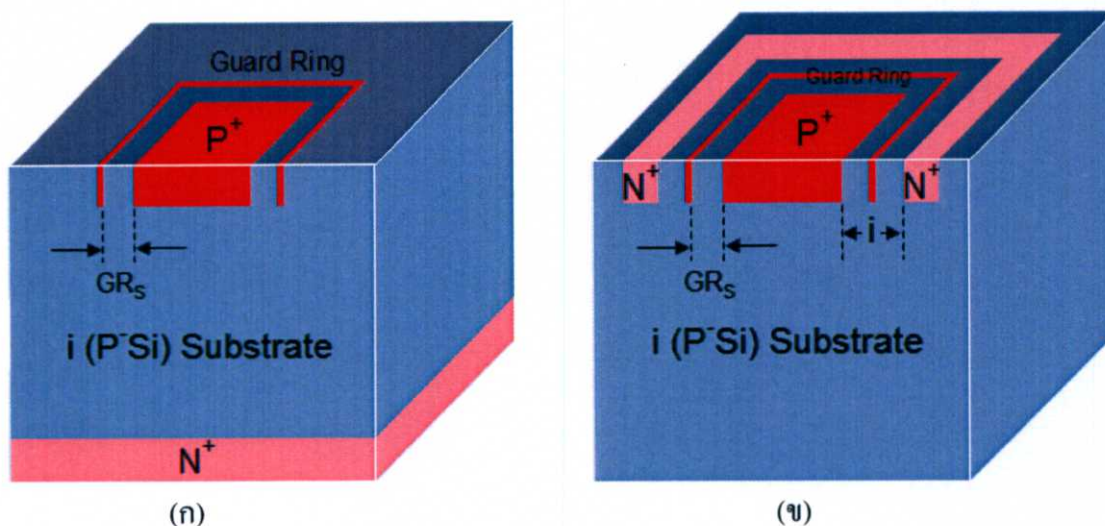
การศึกษาการตอบสนองทางแสง

การศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

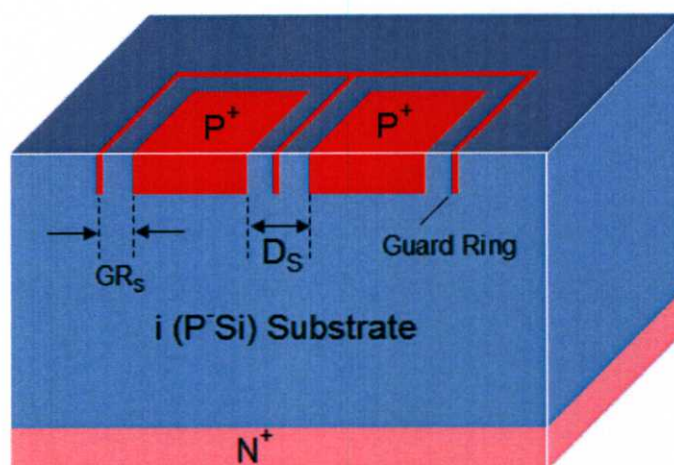
- 1.) ศึกษาคุณลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะไม่ได้รับแสง
- 2.) ศึกษาคุณลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะไม่ได้รับแสง
- 3.) ศึกษาคุณลักษณะความจุ-แรงดันไฟฟ้า
- 4.) ศึกษาผลตอบสนองเชิงความถี่
- 5.) ศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง

การศึกษาพารามิเตอร์การออกแบบต่างๆของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

- 1.) ศึกษาผลของพอร์สซิลิคอนที่ใช้สร้างบนชั้นรับแสง
- 2.) ศึกษาความไวต่อแสงของโครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN และ NIP
- 3.) ศึกษาผลของระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิค
- 4.) ศึกษาผลของการ์ดริงและตำแหน่งของการ์ดริง
- 5.) ศึกษาผลของความหนาแน่นกระแสของพื้นที่ต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง
- 6.) ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างออร์เบ่



รูปที่ 1.1 โครงสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN (ก) แบบแนวตั้ง (ข) แบบแนวนอน



รูปที่ 1.2 โครงสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างออร์เรย์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์จะแบ่งเนื้อหาออกเป็นบทต่าง ตามรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงประเด็นของที่มาของปัญหา ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ แนวคิดที่ใช้ ขอบเขตงานวิจัย และขั้นตอนการศึกษาวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เพื่อทำความเข้าใจภาพรวมของวิทยานิพนธ์

บทที่ 2 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐานรังสีเอ็กซ์ ทฤษฎีพื้นฐานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PN และ ชนิด PIN และ ทฤษฎีเกี่ยวกับพอร์สซิลิคอน

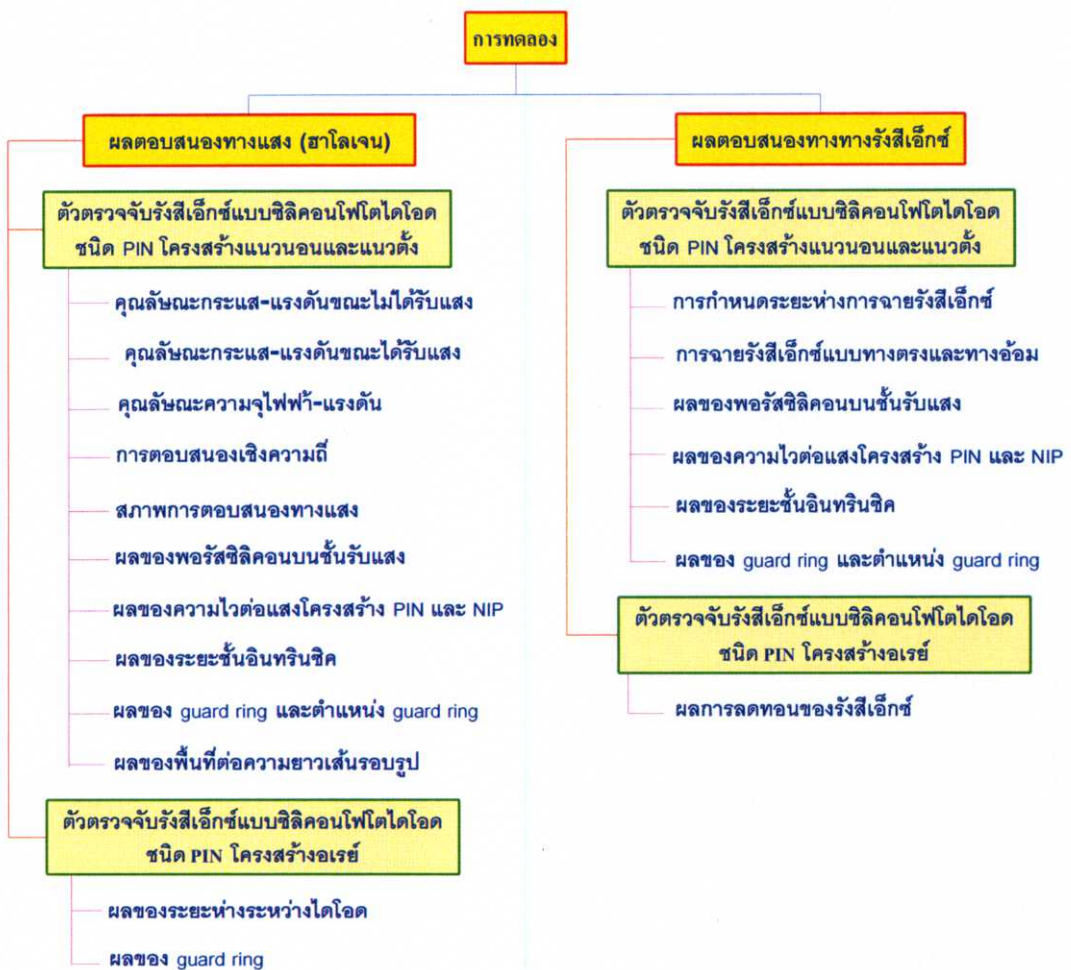
บทที่ 3 กระบวนการสร้าง การออกแบบ และการทดลอง กล่าวถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ การออกแบบ โฟโตมาสค์ กระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ วิธีการวัดและการจัดการการทดลองเพื่อวัดผลต่างๆ

บทที่ 4 ผลการทดลองทางแสง และการอภิปราย กล่าวถึงการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน และพารามิเตอร์การออกแบบต่างๆของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้งที่วัดกับแสงจากหลอดฮาโลเจน

บทที่ 5 ผลการทดลองทางรังสีเอ็กซ์ และการอภิปราย กล่าวถึงการศึกษาพารามิเตอร์การออกแบบต่างๆของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้งที่วัดกับรังสีเอ็กซ์

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้จากบทที่ 4 และบทที่ 5 พร้อมทั้งขอเสนอแนะที่เป็นประโยชน์

ขั้นตอนการทดลอง บทที่ 4 และ บทที่ 5 สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 1.3

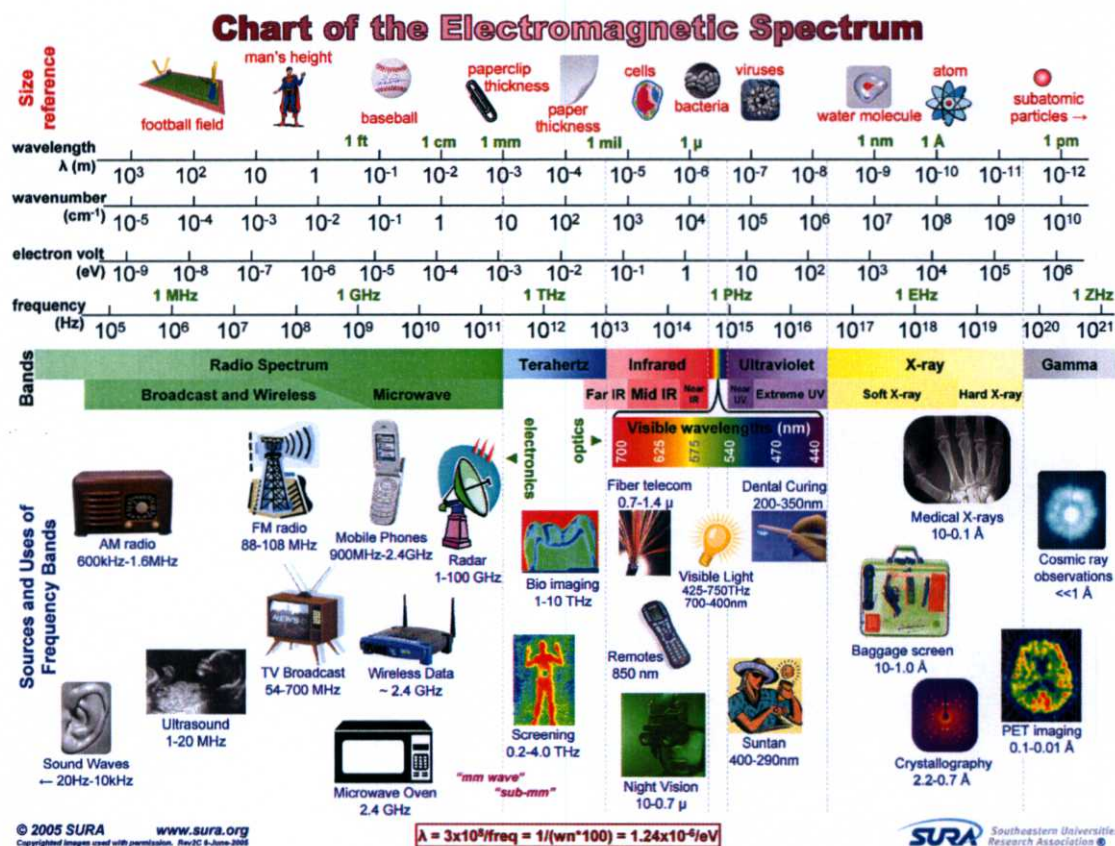


รูปที่ 1.3 ภาพรวมขั้นตอนการทดลองบทที่ 4 และบทที่ 5

บทที่ 2

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโพโตไดโอดชนิด PIN

รังสีเอ็กซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีอำนาจทะลุทะลวงสูง ในปัจจุบันนี้รังสีเอ็กซ์ได้เข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันมากขึ้น เช่น การแพทย์ การเกษตร หรือระบบทางด้านการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น อุปกรณ์อย่างหนึ่งซึ่งจำเป็นอย่างยิ่งในการประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์คือ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์นี้สามารถแบ่งได้หลายชนิดตามการใช้งาน แต่หากจะกล่าวถึงระบบการสร้างภาพจากการประมวลผลของคอมพิวเตอร์แล้ว ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่เหมาะสมกับการใช้งานร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์คือ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน คือ อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนพลังงานจากรังสีเอ็กซ์ให้เป็นพลังงานไฟฟ้า



รูปที่ 2.1 แผนภูมิสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า

รูปที่ 2.1 แสดงแผนภูมิสเปกตรัมแม่เหล็กไฟฟ้า และการประยุกต์ใช้งานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ความยาวช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าซึ่งใช้ในงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronic) ทั่วไป คือ

รังสีแกมมา ความยาวคลื่นช่วงสั้นกว่า 0.1 Å รังสีเอ็กซ์ความยาวช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.01-10 nm. อัลตราไวโอเลตความยาวช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.01-0.4 μm . แสงที่ตามองเห็นได้ (visible light) ซึ่งเป็นช่วงคลื่นแคบ ที่มีผลตอบสนองต่อตามนุษย์ตั้งแต่ 0.4-0.7 μm . คือสีม่วงจนถึงสีแดง และอินฟราเรด ความยาวช่วงคลื่นตั้งแต่ 0.7-1,000 μm . ซึ่งความยาวช่วงคลื่นเหล่านี้ถูกประยุกต์ในใช้งานด้านต่างๆ

2.1 รังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีความยาวคลื่นในช่วง 0.01-10 nm. คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์คล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาเป็นส่วนใหญ่ แต่คุณสมบัติพิเศษของรังสีเอ็กซ์คือ อานาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่างๆ ได้มากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นทึบ และน้ำหนักอะตอมของวัตถุที่รังสีเอ็กซ์ผ่าน นอกจากนั้น ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งทางเคมีชีวะและอื่นๆ อีกด้วย ในเบื้องต้นมีการใช้รังสีเอ็กซ์สำหรับถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยโรคและงานผลิตศาสตร์ (crystallography) รังสีเอ็กซ์เป็นการแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และมีอันตรายต่อมนุษย์

ทฤษฎีอิเล็กตรอนสมัยปัจจุบัน อธิบายถึงการเกิดรังสีเอ็กซ์ว่า ธาตุประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากในอะตอมแต่ละตัวมีนิวเคลียสเป็นใจกลาง และมีอิเล็กตรอนวิ่งวนเป็นชั้นๆ ธาตุเบาจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่น้อยชั้น และธาตุหนักมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่หลายชั้น เมื่ออะตอมธาตุหนักถูกยิงด้วยอิเล็กตรอน จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในถูกชนกระเด็นออกมาวิ่งวนอยู่รอบนอก ซึ่งมีภาวะไม่เสถียรและตกไปวิ่งวนในชั้นในอีก พร้อมกับปล่อยพลังงานออกมาในรูปรังสี ถ้าอิเล็กตรอนที่ชนเข้าไปมีพลังงานมาก จะชนอิเล็กตรอนในชั้นลึกๆ ทำให้ได้รังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานมากเรียกว่า “ฮาร์ดเอ็กซ์เรย์” (hard X-ray) ถ้าอิเล็กตรอนที่ชนมีพลังงานน้อย เข้าไปได้ไม่ลึกนัก จะให้รังสีที่เรียกว่า “ซอฟท์เอ็กซ์เรย์” (soft X-ray)

กระบวนการเกิดรังสีเอ็กซ์นั้น ทั้งโดยมนุษย์และธรรมชาติมีอยู่ 2 วิธีใหญ่คือ

1.) เป็นวิธีกำเนิดรังสีเอ็กซ์โดยการเร่งลำอนุภาคอิเล็กตรอนเข้าชนแผ่นโลหะหนัก เช่นทั้งสแตนไดอิเล็กตรอนที่ถูกเร่งจะชนอิเล็กตรอนของโลหะที่เป็นเป้า ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกชนเปลี่ยนตำแหน่งการโคจรรอบนิวเคลียส เกิดตำแหน่งที่ว่างของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสเดิม อิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ในตำแหน่งวงโคจรที่มีพลังงานสูงกว่าจะเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนเดิมแล้วปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ รังสีเอ็กซ์ เครื่องตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ใช้กันทั่วไปในโรงพยาบาลและโรงงานอุตสาหกรรม เป็นเครื่องผลิตรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธีนี้

2.) เป็นวิธีกำเนิดรังสีเอ็กซ์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่นอิเล็กตรอน หรือโปรตรอน อย่างมีความเร่ง คือ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นแล้วเป็นธรรมชาติของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เองที่ต้องปล่อยพลังงานออกมาในรูปแบบคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ซึ่งถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมามีความถี่สูงมากพอจะเป็นรังสีเอ็กซ์ การ

กำเนิดรังสีเอ็กซ์วิธีนี้เป็นวิธีที่นักวิทยาศาสตร์ที่นิยมใช้ในการกำเนิดรังสีเอ็กซ์ในห้องทดลองวิทยาศาสตร์

2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์

ผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรกคือ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ วิลเฮม คอนราด เรินท์เกน (Wilhelm Conrad Roentgen) การค้นพบนี้เกิดในตอนเย็น ของวันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ. 1895 ภายในห้องทดลองที่มหาวิทยาลัยวูร์ซบวร์ค (Wurzburg) ประเทศเยอรมัน



รูปที่ 2.2 วิลเฮม คอนราด เรินท์เกน ผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก

เรินท์เกนได้ค้นพบรังสีเอ็กซ์โดยบังเอิญในขณะที่ทดลองเรื่องการดูดกลืนของหลอดรังสีแคโทด โดยใช้หลอดทดลองที่เรียกว่า 'crooke's tube' เรินท์เกนสังเกตเห็นว่าหลอดรังสีแคโทด ทำให้กระดาษแข็งที่ฉาบด้วยแบเรียมพลาคิโนไซยาไนด์ (barium platinocyanide) เกิดการเรืองแสงขึ้น โดยระยะไกลที่สุดที่ยังมีการเรืองแสงบนกระดาษแข็งคือ 120 cm. ในขณะเดียวกัน เรินท์เกนสังเกตเห็นอีกว่า ตัวอักษร A ที่เคลือบด้วยแบเรียมพลาคิโนไซยาไนด์ซึ่งอยู่ห่างออกไปเกือบสิบฟุตเกิดการเรืองแสงขึ้นด้วย ทั้งๆที่ไม่ได้อยู่ในระยะของหลอดรังสีแคโทด เรินท์เกนจึงได้ค้นพบรังสีชนิดใหม่ และให้ชื่อว่า "รังสีเอ็กซ์" (X-ray) เรินท์เกนได้ใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ต่อมาทำการสังเกตการทะลุทะลวง (penetration) ของรังสีเอ็กซ์ผ่านโลหะ หรือแม้กระทั่งผ่านคน และเขาได้ถ่ายภาพรังสีของมือภรรยาเขาไว้ด้วย ในที่สุดเรินท์เกนจึงได้ประกาศว่าเขาได้ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก



รูปที่ 2.3 ภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์ภาพแรก ซึ่งเป็นภาพถ่ายมือซ้ายของภรรยาเรินท์เกน

2.1.2 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์

- 1.) เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงคลื่นสั้นมาก คืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.01-10 nm. หรืออยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมมาและรังสีอุลตราไวโอเลต
- 2.) มีคุณสมบัติเหมือนกับแสงสว่างธรรมดา เช่น เดินทางเป็นเส้นตรง ความเร็วการเดินทางในสุญญากาศมีความเร็วเท่ากับแสงคือ 3.8×10^8 m/s นอกจากนี้แล้ว ยังมีการสะท้อนกลับ การหักเห และเบี่ยงเบนได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา
- 3.) ไม่หักเหโดยสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก
- 4.) เกิดจากอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งเข้าชนเป้าโลหะหนัก อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้จะไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่นๆที่อยู่ในวงโคจรของอะตอมโลหะหนัก ให้หลุดออกนอกวงโคจร
- 5.) ทำให้เกิดการเรืองแสง ในสารพิเศษบางอย่าง
- 6.) คุกคามโดยสสารทุกชนิด มากบ้างน้อยบ้างขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและน้ำหนักอะตอมของสารนั้น
- 7.) ทำให้เกิดการไอออนไนเซชัน (ionization) เมื่อผ่านไปใ้อากาศหรือแก๊ส
- 8.) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อรังสีเอ็กซ์ไปถูกฟิล์มถ่ายรูป จะทำให้ฟิล์มนั้นดำ จึงนำผลนี้ มาใช้ในการบันทึกภาพลงบนแผ่นฟิล์มรังสีเอ็กซ์
- 9.) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ เช่น ทำให้เซลล์ของร่างกายมีการเปลี่ยนแปลง หรือเกิดการผ่าเหล่า (mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็นจำนวนมากและนานพอ
- 10.) มีอำนาจในการทะลุทะลวงสูง สามารถผ่านเนื้อมนุษย์ และสัตว์ได้ แต่ไม่สามารถผ่านแผ่นตะกั่วหรือคอนกรีตหนาๆได้

2.1.3 การกำเนิดรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์เกิดขึ้นโดยอนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงเคลื่อนที่ชนเป้าโลหะ ผลทำให้เกิดเป็นรังสีเอ็กซ์และความร้อน การกำเนิดรังสีเอ็กซ์นั้นอาศัยองค์ประกอบสำคัญ 5 ประการ คือ

1.) ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน หรือการแยกอิเล็กตรอนออกจากอะตอมของโลหะ

อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้น หรือแยกออกจากอะตอมของโลหะที่ทำเป็นไส้หลอดรังสีเอ็กซ์ โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในไส้หลอด (filament) จนกระทั่งไส้หลอดร้อนขึ้นประมาณ $2,000$ °C หรือมากกว่านั้น มีผลทำให้เกิด เทอร์มิโอนิกอิมิชัน (thermionic emission) คือ อิเล็กตรอนหลุดออกมาจากวงโคจร เมื่อถูกความร้อน อิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ จะมารวมตัวกันอยู่ที่ผิวหน้าของโลหะ จนกลายเป็นกลุ่ม (cloud) เรียกว่า space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอนไม่สามารถหลุดพ้นไปจากผิวหน้าโลหะได้ เนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน และอะตอมของโลหะยังมีอยู่

2.) การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุด และเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง

วิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมไปได้คือ ต้องหาสิ่งที่มีพลังงานหรือแรงดึงดูดมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนและอะตอมโลหะมาดึงดูดอิเล็กตรอน สิ่งนั้นคือ ไฟฟ้าแรงสูง (high voltage) ไฟฟ้าแรงสูงนี้ นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวหน้าของโลหะแล้ว ยังทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ หรือวิ่งด้วยความเร็วสูง กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ ต้องทำให้ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบให้ต่างกัน ความต่างศักย์นี้ยิ่งมีค่ามากขึ้นเท่าใด ก็ยิ่งทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกจากผิวหน้าของไส้หลอดได้มากขึ้นเท่านั้น และเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงขึ้น ที่ความต่างศักย์ 100 kV จะทำให้อิเล็กตรอนมีความเร็วประมาณ 165 km/s

3.) การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไม่ต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง

การที่อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงได้ จะต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง ดังนั้น ภายในหลอดรังสีเอ็กซ์จึงเป็นสุญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศหรือแก๊สอยู่ภายในหลอดแม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลง เนื่องจากเกิดการไอออนไนเซชัน

4.) การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้มข้น (concentration of electron)

ต้องมีวิธีการที่จะทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปในแนวและทิศทางเดียวกันคือ ฟุ้งไปหาจุดโฟกัสของเป้าด้วยปริมาณความเข้มข้นที่มากพอสมควร ซึ่งทำได้โดยการใช้เครื่องมือที่เรียกว่า "electron focusing device" คอยควบคุมให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ไปตกในบริเวณจุดโฟกัสของเป้า

5.) การทำให้อิเล็กตรอนหยุดวิ่งอย่างทันทีทันใด

การที่จะทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งมาด้วยความเร็วสูงนี้หยุดวิ่งอย่างทันทีทันใด ทำได้โดยหาวัตถุมารับ หรือขวางอิเล็กตรอน วัตถุนั้นคือ เป้าโลหะ ผลที่เกิดขึ้นคือ เกิดการชน หรือกระทบกันระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าโลหะอย่างแรง อิเล็กตรอนดังกล่าวจะไปชนอิเล็กตรอนที่อยู่ในวงโคจรของอะตอมเป้านั้น ให้อิเล็กตรอนออกวงโคจร และจะมีอิเล็กตรอนจากวงโคจรอื่นๆที่อยู่ถัดไปวิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจากพลังงานของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจรไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์และความร้อนซึ่งส่วนใหญ่เป็นความร้อน กล่าวคือ จากพลังงานของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่งไปสู่เป้าโลหะนั้น 99.8% จะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2% จะเปลี่ยนเป็นรังสีเอ็กซ์

2.2 การนำรังสีเอ็กซ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

2.2.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

ตั้งแต่การค้นพบของเรินท์เกน ว่ารังสีเอ็กซ์สามารถบอกรูปร่างของกระดูกได้ รังสีเอ็กซ์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการถ่ายภาพทางการแพทย์ นำไปสู่สาขาวิชาที่เรียกว่า รังสีวิทยา โดยนักรังสีวิทยาได้ใช้ภาพถ่ายที่ได้มาใช้ในการช่วยการวินิจฉัยโรค

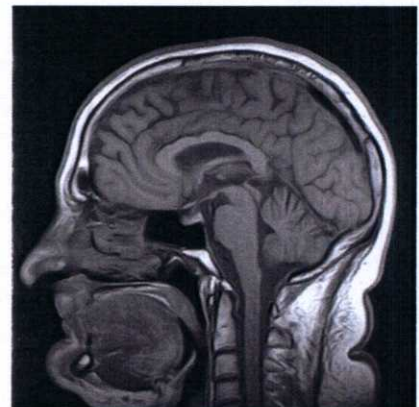
รังสีเอ็กซ์มักถูกนำมาใช้ในการตรวจหาสภาพทางพยาธิวิทยาของกระดูก แต่ก็สามารถหาความผิดปกติของบางโรคที่เป็นเนื้อเยื่อทั่วไปได้ ตัวอย่างที่พบเห็นได้ทั่วไป เช่น การเอ็กซ์เรย์ปอด ซึ่งสามารถบอกถึงความผิดปกติได้หลายโรค เช่น โรคปอดบวม (pneumonia) โรคมะเร็งปอด (lung cancer) หรือน้ำท่วมปอด (pulmonary edema) รวมถึงการเอ็กซ์เรย์ช่องท้อง เช่น การตรวจภาวะอุดตันในลำไส้เล็ก (ileus) ภาวะลม หรือของเหลวคั่งในช่องท้อง ในบางครั้งยังใช้ในการตรวจหานิวไคนดิวมาติ หรือนิวไคนดิวมาติในกระเพาะปัสสาวะได้ รวมทั้งในบางกรณีสามารถใช้ในการถ่ายภาพเนื้อเยื่อบางชนิด เช่น สมองและกล้ามเนื้อได้

ปัจจุบันการถ่ายภาพเนื้อเยื่อส่วนใหญ่ถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิคการสร้างภาพจากคอมพิวเตอร์ (computed tomography : CT) CT scanner เป็นเครื่องมือที่ใช้ในการวินิจฉัยอาการจากรูปภาพที่สร้างจากรังสีเอ็กซ์ ซึ่งจะใช้ควบคู่กับเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ภาพออกมาภาพที่ได้ออกมาจะแสดงถึงส่วนต่างๆของร่างกาย เช่น กระดูก กล้ามเนื้อ ไขมัน อวัยวะ ซึ่ง CT scanner สามารถบ่งบอกถึงรายละเอียดต่างๆได้ดีกว่าการตรวจจากรังสีเอ็กซ์

ในการตรวจจากรังสีเอ็กซ์โดยทั่วไป จะตรวจจากรังสีเอ็กซ์ออกไปยังส่วนของร่างกายที่ต้องการจะตรวจสอบ ซึ่งจะมีแผ่นฟิล์มที่ไว้รับรังสีเอ็กซ์วางไว้ด้านหลังของส่วนของร่างกายที่ทำการตรวจสอบ รังสีเอ็กซ์จะผ่านส่วนของร่างกายนั้น และปรากฏภาพออกมาที่แผ่นฟิล์มที่อยู่ด้านหลัง โดยภาพที่เห็นจะมีส่วนกระดูก กล้ามเนื้อ และส่วนที่เป็นเนื้อต่างๆ ในส่วนที่เป็นอวัยวะ จะไม่สามารถปรากฏเป็นภาพได้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.4 การประยุกต์ใช้รังสีเอ็กซ์ (ก) CT scanner (ข) ภาพที่สร้างจาก CT scanner

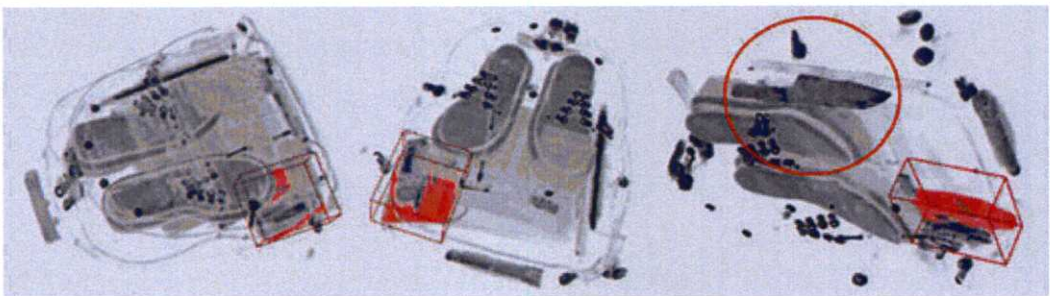
เครื่อง CT scanner จะมีหลักการคือ ในการตรวจจากรังสีเอ็กซ์ของคอมพิวเตอร์ รังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอบๆร่างกายที่ตรวจ การที่รังสีเอ็กซ์เคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอบๆร่างกาย จะทำให้มีมุมมองหลายมุมมองที่ตรวจสอบอวัยวะ ซึ่งจะได้อภาพที่มีข้อมูลมากกว่าการตรวจจากรังสีเอ็กซ์

โดยทั่วไป ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณมายังคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์ จะทำหน้าที่ในการแปลข้อมูลและแสดงออกมาในรูปแบบภาพ 2 มิติ หรือ ภาพ 3 มิติ

2.2.2 การประยุกต์ใช้งานด้านความปลอดภัย

ในแต่วันละผู้คนมากมายเดินทางข้ามประเทศจากซีกโลกหนึ่งไปยังอีกซีกโลกหนึ่งผ่านทาง อากาศยาน สัมภาระและกระเป๋าเดินทางจะถูกตรวจสอบหาวัตถุระเบิดและวัตถุอันตราย หรือ แม้กระทั่งของเหลวทุกชนิดก็ถูกห้ามนำติดตัวไปกับผู้โดยสาร เทคโนโลยีที่มีชื่อเสียงในการสแกน หาวัตถุต้องสงสัย คือ เครื่องเอ็กซ์เรย์คอมพิวเตอร์โทโมกราฟี (computerized tomography) หรือ เรียกอีกอย่างว่า CT scanner เทคโนโลยีนี้อยู่บนพื้นฐานของความรู้ทางวิทยาศาสตร์เกี่ยวกับรังสี เอ็กซ์ สมบัติของคลื่น ความหนาแน่น และสมบัติของอะตอม ก่อนจะนำมาใช้ที่ท่าอากาศยาน เครื่อง CT scanner ใช้ในทางการแพทย์มาก่อน โดยใช้ในการสแกนอวัยวะต่าง ๆ ของร่างกาย เทคโนโลยีนี้ ได้ช่วยชีวิตคนมานับไม่ถ้วนโดยการตรวจหาอาการต่าง ๆ เช่น มะเร็ง โดยเครื่องนี้จะให้ภาพ รายละเอียดของร่างกายโดยใช้คอมพิวเตอร์ร่วมกับเครื่อง X-ray ที่หมุนได้รอบ โดยภาพที่ได้จะเป็น ภาพตัดขวางของอวัยวะต่าง ๆ เช่น สมอง หัวใจ เป็นต้น

แหล่งกำเนิดรังสีและเครื่องตรวจวัดจะอยู่คนละข้างภายในเครื่องสแกน ที่มีลักษณะเป็นวง แหวน ดังนั้นการสแกนสามารถเคลื่อนที่ไปรอบ ๆ ตามขอบวงแหวน ลำแสงของรังสีเอ็กซ์จะผ่าน ลำตัวของผู้ป่วยและถูกบันทึกโดยเครื่องตรวจวัดที่อยู่ด้านตรงข้าม ทั้งเครื่องตรวจวัดและ แหล่งกำเนิดรังสีเอ็กซ์จะหมุน 360 องศารอบผู้ป่วย เครื่องตรวจวัดจะเก็บข้อมูลจากหลาย ๆ มุมที่มีการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ผ่านผู้ป่วย ข้อมูลที่ได้จะถูกส่งไปยังคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะทำการแปลผลออกมา เป็นรูปภาพ ภาพที่ได้จะเป็นชุดของภาพตัดขวางที่เรียกว่า slices โดยการวินิจฉัยภาพตัดขวาง หลายๆภาพจะสามารถทำให้เห็นร่างกายหรืออวัยวะแบบสามมิติซึ่งเป็นประโยชน์ในการวินิจฉัย อย่างมาก



รูปที่ 2.5 ภาพ 3 มิติที่สร้างจากเครื่อง CT scanner แสดงให้เห็นถึงวัตถุอันตรายในการเป่าเดินทาง คือมีดและระเบิดซีพีอาร์

2.2.3 การประยุกต์ใช้งานด้านการเกษตร

ปัจจุบันได้มีการนำรังสีเอ็กซ์นำมาใช้ประโยชน์ด้านการเกษตร โดยมีประโยชน์หลัก 4 ด้าน คือ (1) การใช้รังสีเพื่อถนอมอาหาร หรือยืดอายุการเก็บรักษา (2) ชับยั้งการงอก หรือควบคุมการงอก และชะลอการสุกผลผลิต เช่น หอมหัวใหญ่ มันฝรั่ง (3) นำเชื้อโรคและพยาธิในอาหารหรือผลิตภัณฑ์ เช่น แหนม มันฝรั่ง พริกแห้ง พริกไทย เป็นต้น ใช้กำจัดแมลงศัตรูพืช เช่น ทำหมันแมลงวันทอง การทำหมันแมลงผลไม้ เป็นต้น ไล่ศัตรูพืชในพืชผัก ไม้ผล ไม้ดอก ในเมล็ดพืช ธัญพืช เช่น มะม่วง มะขามหวาน กระเจี๊ยบเขียว ก๋วยเตี๋ยว (4) ใช้ในการปรับปรุงพันธุ์พืชหรือสร้างพันธุ์พืชใหม่ที่สวยงามและมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเดิม

2.2.4 การประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์ด้านอื่นๆ

รังสีเอ็กซ์ได้ถูกพัฒนานำไปใช้ในหลายสาขา เช่น การวิเคราะห์ลักษณะของอะตอมและการผลิต โดยอาศัยการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray crystallography) การวิจัยทางดาราศาสตร์ที่อาศัยการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ที่มาจากวัตถุในวัตถุ (X-ray astronomy) การถ่ายภาพและผลิตภาพในขนาดเล็ก (X-ray microscopic analysis) รวมทั้งการตรวจหารอยร้าวขนาดเล็กในโลหะ การติดตามผลของตัวอย่างในการวิจัยโดยอาศัยคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence)

2.3 ชนิดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

การสร้างภาพจากรังสีเอ็กซ์นั้น สิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งคือ อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด และแต่ละชนิดจะมีความเหมาะสมกับรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่างกันไป ตามการใช้งาน ซึ่งชนิดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบ่งได้ดังนี้

2.3.1 ฟิล์มรังสีเอ็กซ์ (X-ray film)

ฟิล์มรังสีเอ็กซ์เป็นวิธีที่ยังใช้กัน โดยมาก ซึ่งมีหลักการเหมือนกับการถ่ายภาพ โดยการใช้งานเป็นการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ลงบนฟิล์ม แล้วนำไปล้างเพื่อขึ้นลาย ทำให้เกิดเป็นภาพเช่นเดียวกับภาพถ่ายทั่วไป โดยไม่ต้องมีกระบวนการใดๆอีก แม้ว่าฟิล์มจะง่ายต่อการใช้งานและให้ภาพที่มีความละเอียดสูง แต่มีข้อเสียคือ การแยกแยะความต่างของพลังงานยังไม่ชัดเจน

2.3.2 น้ำยาไวแสง (resist)

น้ำยาไวแสง ประกอบด้วยโพลิเมอร์สายโซ่ยาว โดยทั่วไปมีทั้งชนิดบวกและลบ เคลือบอยู่บนชั้นฐานรองด้วยความหนาประมาณ 50-200 nm. โดยมีคุณสมบัติที่หลังจากตรวจจับรังสีเอ็กซ์ จะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้ผิวมีลักษณะเหมือนรูปร่างของรังสีที่ตกกระทบ น้ำยาไวแสงมีการ

ตอบสนองต่อรังสีอย่างไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเหมาะกับการบันทึกรูปที่มีเพียงสองระดับสี เช่นการทำมาร์คของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

2.3.3 แชนแนลอิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์ (channel electron multipliers : CEMs)

แชนแนลอิเล็กตรอนมัลติพลายเออร์ ถูกนำไปใช้งานที่ต้องการการตรวจนับโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ โดยมากเป็นซอฟต์แวร์เอ็กซ์เรย์ (soft X-ray) เช่น X-ray spectroscopy และ X-ray astronomy อาศัยความสามารถในการตรวจนับโฟตอนที่เข้ามา และบางครั้งถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มการปล่อยโฟตอนของไดโอด โดยโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ สามารถตรวจนับได้โดย photocathode และ electron multiplication scheme ซึ่งต่อมามีการพัฒนา CEMs ให้มีลักษณะเป็นช่องเล็กๆและนำมาประกอบกันเป็นอาร์เรย์ ซึ่งมีรูปร่างเป็นเพลต เรียกว่า micro channel plates (MCPs)

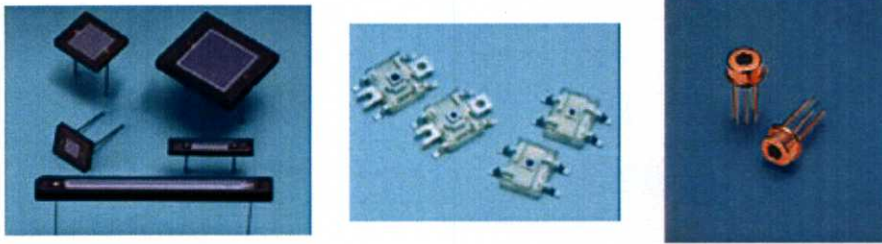
2.3.4 ตัวตรวจจับประเภทแก๊ส (gas detector)

เมื่ออะตอมของแก๊สได้รับรังสีเอ็กซ์จะทำให้เกิดการแตกตัวเป็นประจุบวกและประจุลบ แล้วใช้อุปกรณ์ขยายมาตรวจจับประจุเหล่านี้ หลักการนี้ใช้ได้กับรังสีเอ็กซ์ในทางดาราศาสตร์และกล้องจุลทรรศน์รังสีเอ็กซ์ แก๊สที่ใช้ในอุปกรณ์นี้ได้แก่ ฮีเลียม (He), อาร์กอน (Ar), คริปทอน (Kr), และ ซีซีนอน (Xe)

2.3.5 ตัวตรวจจับประเภทซิลิคอน (silicon detector)

เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทโฟโตไดโอดและโฟโตทรานซิสเตอร์สามารถนำมาประยุกต์กับการดักคลื่นรังสีเอ็กซ์ได้ โดยเมื่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดักคลื่นโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลในวงวงจร โดยปกติอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจะถูกนำมาประยุกต์ใช้กับรังสีเอ็กซ์ในช่วงพลังงานประมาณ 1-100 keV และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานต่างๆ ให้ดีขึ้นด้วยการออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์ให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานในย่านต่างๆ

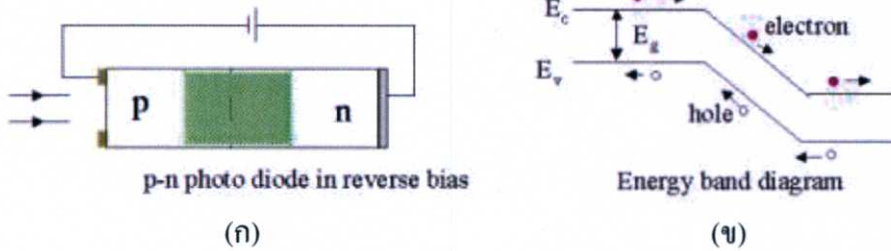
ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ประเภทซิลิคอนนั้น นิยมนำโฟโตไดโอดมาประยุกต์ใช้สำหรับตรวจจับรังสีเอ็กซ์เนื่องจากมีประสิทธิภาพทางควอนตัมสูง และความจุไฟฟ้าต่ำ โดยโฟโตไดโอดทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยทั่วไปอยู่ในรูปกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถแบ่งตามลักษณะโครงสร้าง และมีการนำไปใช้งานทั่วไป [4] ได้แก่ โฟโตไดโอดชนิด PN โฟโตไดโอดชนิด PIN โฟโตไดโอดชนิดอะวาแลนซ์ โฟโตไดโอดชนิด MSM โดยในรูปที่ 2.6 แสดงภาพโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน



รูปที่ 2.6 แสดงภาพโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ ที่มีผู้ผลิตขายในปัจจุบัน

2.3.5.1 โฟโตไดโอดชนิด PN

โฟโตไดโอดชนิด PN มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นทั่ว ๆ ไป แต่ได้ถูกออกแบบให้แสงสามารถตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็นได้ โครงสร้างทั่วไปของโฟโตไดโอดและแถบพลังงานของพี-เอ็นโฟโตไดโอด แสดงในรูปที่ 2.7

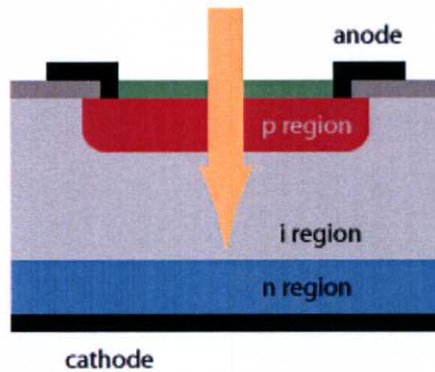


รูปที่ 2.7 โฟโตไดโอดชนิด PN (ก) โครงสร้างภาคตัดขวางขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับทำให้สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงขึ้น และบริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้น เมื่อมีแสงมากตกกระทบบน และโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้นพี บริเวณปลอดพาหะ และชั้นเอ็น ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าในชั้นพีจะแพร่ไปสู่ในชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนดังรูปที่ 2.7 (ข) ทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่วงจรภายนอกจำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแปรโดยตรงกับความเข้มแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน

2.3.5.2 โฟโตไดโอดชนิด PIN

โฟโตไดโอดชนิด PIN มีโครงสร้างที่คล้ายกับโฟโตไดโอดชนิด PN แต่แตกต่างที่โฟโตไดโอดชนิด PIN มีการสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง (เจือสารปริมาณน้อยมาก) หรือสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (i) ระหว่างรอยต่อพี-เอ็น ดังในรูปที่ 2.8 ขณะได้รับแสงอินฟราเรด การกระจายตัวของสนามไฟฟ้าจะเต็มชั้นอินทรีนซิก เนื่องจากชั้นอินทรีนซิกมีสภาพต้านทานสูงกว่าด้านพีเข้มข้นและด้านเอ็นเข้มข้น เป็นผลให้เมื่อโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้รับแสงอินฟราเรดจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้นอินทรีนซิก

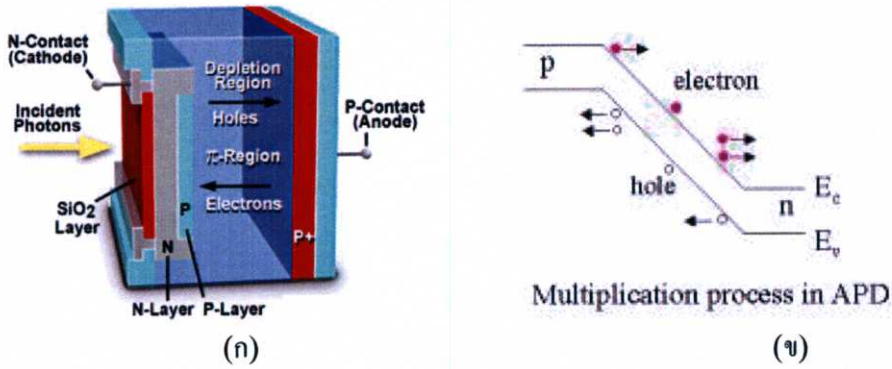


รูปที่ 2.8 โครงสร้างภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิด PIN

เนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมที่ส่วนอินทรีนซิกจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้นอินทรีนซิก จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ส่งผลให้ โฟโตไดโอดชนิด PIN มีผลตอบสนองด้านเวลารวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการทำงานที่รวดเร็ว เช่น ระบบการสื่อสารด้วยแสง, อุปกรณ์คิดส์ หรือรีโมตคอนโทรลด้วยแสง เป็นต้น นอกจากนี้จะมีผลการตอบสนองด้านเวลารวดเร็วแล้ว โฟโตไดโอดชนิด PIN ยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่าโฟโตไดโอดชนิด PN เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้างกว่าบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากรอยต่อพี-เอ็น

2.3.5.3 โฟโตไดโอดชนิดอะวอลานซ์

โฟโตไดโอดชนิดอะวอลานซ์ (avalanche photodiode : APD) คือโฟโตไดโอดชนิด PIN หรืออาจเป็นแบบ Metal-Semiconductor Photodiode ก็ได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.9 แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้โฟโตไดโอดทำงานใกล้ ๆ กับจุดพังทลาย (breakdown point) ด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 100 โวลต์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์อะวอลานซ์ขึ้น

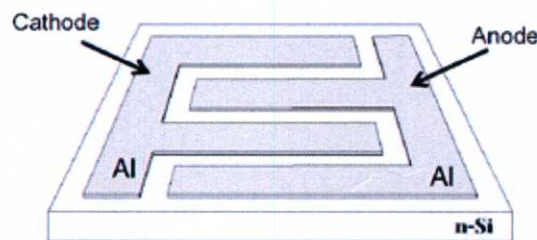


รูปที่ 2.9 โฟโตไดโอดชนิด APD (ก) โครงสร้างภาคตัดขวาง (ข) แถบพลังงานแสดงการเคลื่อนที่ของพาหะ

เนื่องจากที่ใกล้ ๆ กับจุดพังทลาย สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ หรือในชั้นอินทรีนซิคมีค่าสูงมาก จึงทำให้เกิดปรากฏการณ์ “การทวีคูณของพาหะ” (carrier multiplication) ได้ ดังนั้นในภาวะนี้ กระแสแสงจะมีค่าสูงมาก ซึ่งข้อได้เปรียบของอะวาลานซ์โฟโตไดโอด คือ เป็นโฟโตไดโอดที่มีการตอบสนองสูง (high sensitive photodiode) และมีอัตราขยายสัญญาณ (gain) ซึ่งมากกว่าโฟโตไดโอดชนิด PIN 50-300 เท่า แต่มีข้อเสียเปรียบคือ ต้องใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่สูงมาก ทำให้สัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังของแสงอินพุต และสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจากมีอัตราขยายในโฟโตไดโอด

2.3.5.4 โฟโตไดโอดชนิด MSM

โฟโตไดโอดชนิด MSM (metal-semiconductor-metal) สร้างขึ้นจากรอยสัมผัสชนิดกึ่งยวระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้นดูดกลืนแสงอยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง โครงสร้างชนิด MSM ของโฟโตไดโอด แสดงได้ดังรูปที่ 2.10



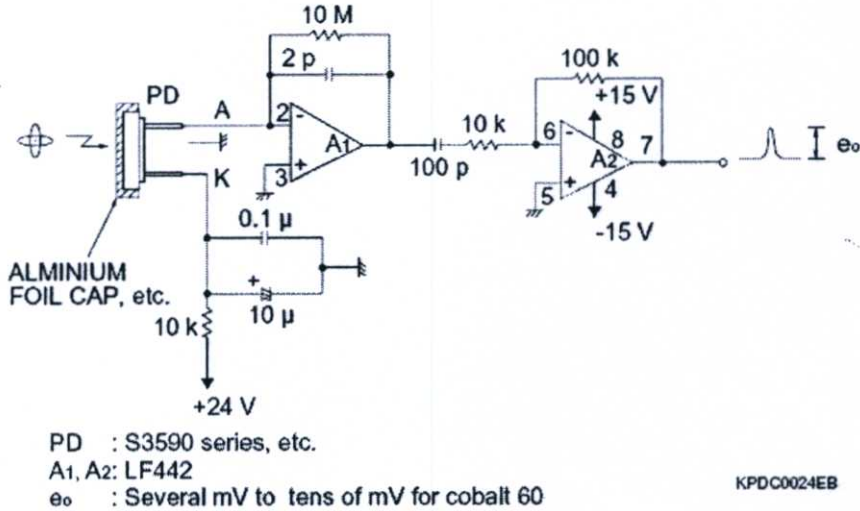
รูปที่ 2.10 โฟโตไดโอดชนิด MSM

เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นได้ และขอบของโลหะโฟตอนทีตกกระทบจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะถ้า

เปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดชนิด PIN แล้ว โฟโตไดโอดชนิด MSM จะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้โครงสร้างชนิด MSM ยังมีค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูง

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพควอนตัมต่ำ ในส่วนของชั้นโลหะด้านหน้ายังสามารถสะท้อนแสงได้สูงทำให้การส่งผ่านแสงน้อยลง อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอน และระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

การใช้งานส่วนใหญ่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ประเภทซิลิคอนจะถูกต่อเข้ากับวงจรขยายเพื่อทำการขยายสัญญาณให้ใหญ่ขึ้นก่อนนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป ในส่วนของภาครับนั้นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์เป็นส่วนประกอบที่สำคัญเพราะทำหน้าที่เปลี่ยนรังสีเอ็กซ์ให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ซึ่งเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพการทำงานของวงจรภาครับ ดังนั้นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ต้องมีความไวสูง ตอบสนองเร็ว กระแสมีค่าน้อย ราคาถูก และมีเสถียรภาพการทำงานที่ดี นอกจากนี้วงจรขยายก็ต้องมีความเหมาะสมกับลักษณะการใช้งานด้วย ไม่ว่าจะเป็นด้านอัตราขยาย ความไว แบนด์วิท และสัญญาณรบกวน เป็นต้น



รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับต่อร่วมกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด

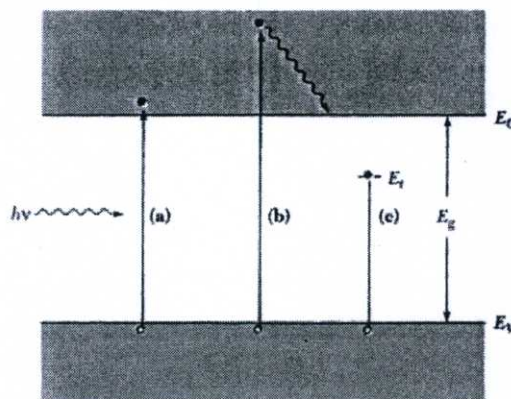
รูปที่ 2.11 วงจรสำหรับตัวตรวจจับรังสีแกมมา และรังสีเอ็กซ์ เมื่อรังสีถูกดูดกลืน หรือกระเจิง ในโฟโตไดโอด ทำให้เกิดประจุไฟฟ้าในบริเวณดังกล่าว ซึ่งประจุไฟฟ้าเหล่านี้กลายเป็นสัญญาณเอาต์พุตไหลสู่วงจรภายนอก ในวงจรนี้ A1 เป็นวงจรขยายประจุ (charge amplifier) ซึ่งทำหน้าที่เปลี่ยนประจุไฟฟ้าที่เกิดจากชั้นที่ผ่านมาให้อยู่ในรูปของพัลส์แรงดัน ออปแอมป์จึงต้องมีค่าอัตราสลับสูง ๆ แต่กินกระแสไปอึดค่า

2.4 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดคือ โฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถตรวจจับแสงหรือรังสีเพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณไฟฟ้า โดยนำมาประยุกต์ใช้งานในการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งโฟโตไดโอดคือ ไดโอดแบบรอยต่อพีเอ็นหรือพิน (PIN) ทั่วไป แต่เนื่องจากต้องทำงานเกี่ยวกับการรับแสงหรือรังสีต่างๆ ดังนั้นจึงถูกออกแบบให้สามารถรับแสงหรือรังสีได้ในขณะใช้งาน โดยทั่วไปการทำงานพื้นฐานจะมี 3 ขั้นตอนหลัก [5] คือ ขั้นตอนแรกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากการดูดกลืนแสง ขั้นตอนที่สอง คู่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ผ่านชั้นดูดกลืนแสง และขั้นตอนที่สาม คู่อิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์และเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรต่อไป

2.4.1 กระบวนการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายใน ประกอบด้วยการดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำสารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์



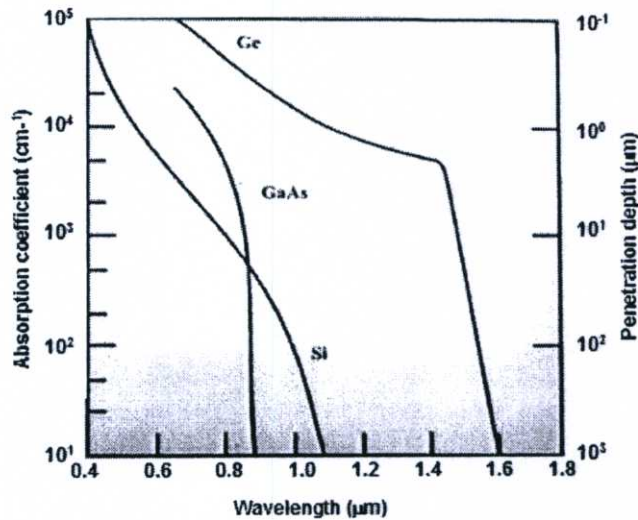
รูปที่ 2.12 กระบวนการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

เมื่อได้รับแสง โฟตอนในแสงสีที่มีพลังงานสูงกว่าขนาดช่องว่างพลังงาน (Energy Gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $h\nu > E_g$ จะทำให้มีการดูดกลืนโฟตอนในสารกึ่งตัวนำ โดยหนึ่งโฟตอนของแสงจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล หนึ่งคู่ ซึ่งถูกเรียกว่า อิเล็กตรอนแสง (Photo Electron)

และโฟตอนแสง (Photo Hole) ในทางอุดมคติบริเวณที่เข้มข้นและเย็นเข้มข้นในส่วนของเนื้อสาร (Bulk) ของสารกึ่งตัวนำเป็นบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในบริเวณนี้ จึงรวมตัวกันเอง (Recombination) โดยไม่มีผลทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าใด ๆ แต่โฟตอนในลำแสงที่ ตกกระทบและผ่านเข้าไปถึงบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น สนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะผลักให้อิเล็กตรอนและโฮลเคลื่อนที่ออกไปจากบริเวณนี้อย่างรวดเร็ว โดยอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังด้านเย็นเข้มข้น และโฮลเคลื่อนที่ออกไปยังด้านที่เข้มข้น

ถ้าสมมติให้ว่าสารกึ่งตัวนำถูกตรวจจับด้วยแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน และ Φ_0 คือ ฟลักซ์โฟตอนที่ตกกระทบต่อหน่วยพื้นที่ เมื่อฟลักซ์โฟตอนเคลื่อนที่ผ่านสารกึ่งตัวนำ บางส่วน จะถูกดูดกลืน ดังนั้นจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนจะเพิ่มขึ้นตามระยะทาง (Δx) และ เป็นไปตามฟังก์ชัน $\alpha\Phi(x)\Delta x$ โดยที่ α คือสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง สามารถเขียนเป็นสมการ ได้ดังนี้

$$\Phi(x) = \Phi_0 e^{-\alpha x} \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมของสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ [4]

สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงเป็นฟังก์ชันของ $h\nu$ รูปที่ 2.13 แสดงสเปกตรัมของ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่าง ๆ ที่ใช้สร้างเป็นตัวตรวจจับแสง จะเห็นว่า สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงลดอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงจุดความยาวคลื่นคัทออฟ (λ_c) ตาม ความสัมพันธ์ของสมการที่ 2.2

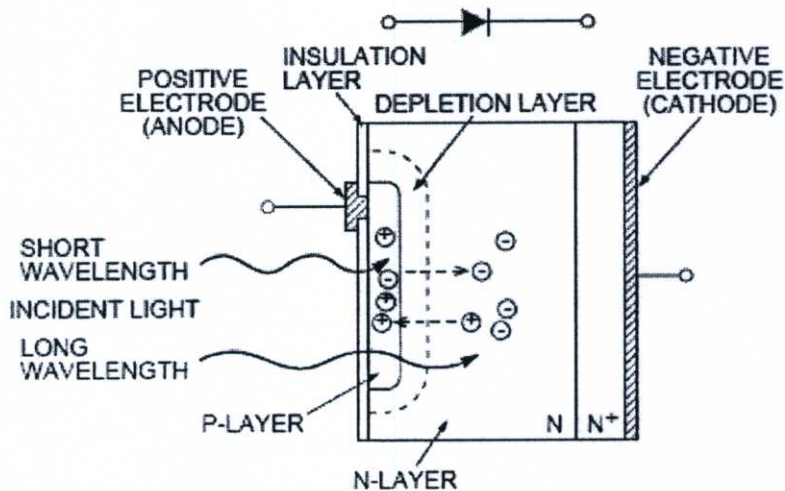
$$\lambda_c = \frac{hc}{E_g} = \frac{1.24}{E_g (eV)} (\mu m) \quad (2.2)$$

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

C คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

2.4.2 หลักการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

โครงสร้างภาคตัดขวางแสดงดังรูปที่ 2.14 เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็น โฟตอนจากภายนอกเข้ามาในบริเวณหรือใกล้ ๆ กับบริเวณปลอดพาหะ โดยโฟตอนนั้นต้องมีพลังงานหนึ่งทีมากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารที่ใช้สร้างไดโอดนั้นคือ $h\nu \geq E_g$ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบคอนดักชันได้ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น



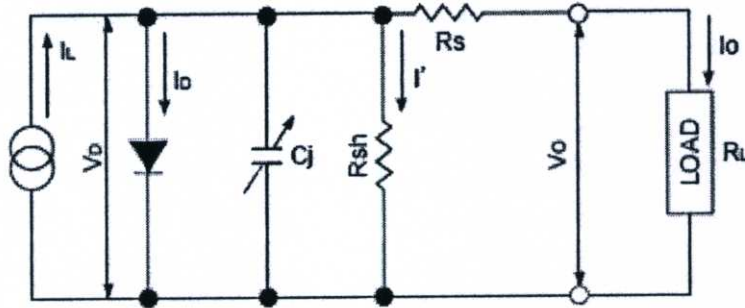
รูปที่ 2.14 โครงสร้างภาคตัดขวางโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น [6]

การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้น สามารถเกิดได้ทั้งในชั้นพี บริเวณปลอดพาหะ และชั้นเอ็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิเล็กตรอนในชั้นพีจะแพร่ไปสู่ชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนในบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะพัดพาไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนกรณีของโฮลนั้นจะเคลื่อนที่ทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ โฮลในชั้นเอ็นจะแพร่ไปสู่ชั้นพี และโฮลในบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะพัดพาไปสู่ชั้นพี ซึ่งจำนวนของการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้จะแปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนแสง (photon flux) ที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน กระแสที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะจะเพิ่มขึ้นจากกระแสรั่วไหลย้อนกลับเดิมที่มีอยู่เรียกว่า “กระแสแสง” โดยเรียกอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ออกแบบมาเพื่อตรวจจับแสงนี้ว่า “โฟโตไดโอด”

2.4.3 วงจรสมมูลของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

วงจรสมมูลของโฟโตไดโอดจะเห็นว่า กระแสเนื่องจากแสงแทนแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (I_L) กระแสไฟฟ้าที่ออกมาในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น โดยมี

ความต้านทานของรอยต่อแบบชั้นดีมีค่ามาก ความจุไฟฟ้ารอยต่อ ความต้านทานอนุกรมมีค่าน้อย ต่ออยู่แสดงในรูปที่ 2.15 โดยที่พารามิเตอร์ต่าง ๆ นั้นคือ



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด [6]

เมื่อ I_L คือ กระแสเนื่องจากแสง

C_j คือ ความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ

R_s คือ ความต้านทานอนุกรม

V_D คือ แรงดันตกคร่อมไดโอด

V_O คือ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

I_D คือ กระแสมืด

R_{sh} คือ ความต้านทานชั้นดี

I' คือ กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่าน R_{sh}

I_O คือ กระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

จากวงจรนี้ สามารถคำนวณกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้

$$I_O = I_L - I_D - I' = I_L - I_S \left(\exp \frac{qV_D}{kT} - 1 \right) - I' \quad (2.3)$$

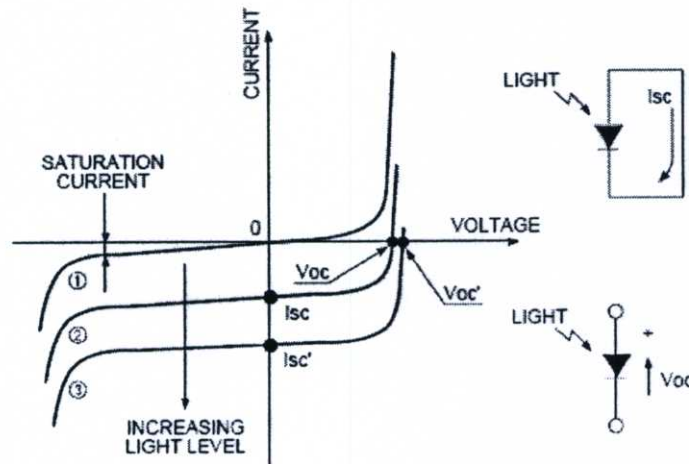
โดยที่ I_S คือ กระแสไฟฟ้าอิ่มตัวย้อนกลับของโฟโตไดโอด

ถ้าสมมติให้ว่า I' มีค่าน้อยมาก เนื่องจากค่าความต้านทานของรอยต่อแบบชั้นดีมีค่ามาก จึงสามารถไม่คิดค่า I' ดังนั้น กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตคือ ผลต่างของกระแสเนื่องจากแสงกับกระแสมืดนั่นเอง

2.4.4 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

เมื่อรอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง แรงเคลื่อนไฟฟ้าทั้งหมดจะไปปรากฏที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น และมีทิศทางตรงกันข้ามกับศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อจึงทำให้เกิดการหักล้างของแรงดัน นั่นคือ กำแพงศักย์มีค่าลดลงจากเดิม ส่งผลให้พาหะเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อเกิดเป็นกระแสไฟฟ้าเรียกว่า “กระแสไบอัสตรง” (forward current) ไหลผ่านรอยต่อจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กซ์โปเนนเชียลกับแรงดัน

เมื่อรอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยต่อเช่นเดียวกับกรณีไบอัสตรง แต่กรณีนี้สนามไฟฟ้าจากแรงดันไบอัสมีทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าในรอยต่อ ทำให้กำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นจากเดิม ทำให้โฮลจากด้านพีและอิเล็กตรอนจากด้านเอ็นไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ อย่างไรก็ตาม พาหะส่วนน้อยของด้านพีและด้านเอ็นสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ จึงทำให้เกิดกระแสค่าน้อยไหลผ่านรอยต่อเรียกว่า “กระแสมืด” (dark current) ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดสามารถเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.16

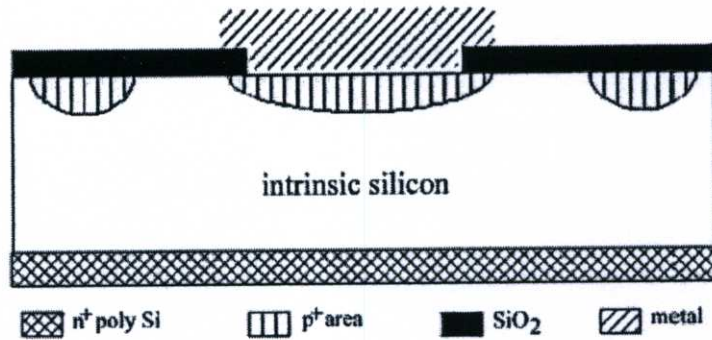


รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็น โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานแก่สารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดคูพาหะอิเล็กตรอน-โฮลขึ้น และจะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายในทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสไฟฟ้าในขณะที่ยังไม่ได้รับไบอัสตรง กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง” (Photo current) ซึ่งกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด

2.5 โครงสร้างและหลักการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN มีโครงสร้างที่คล้ายกับโฟโตไดโอดชนิด PN แต่แตกต่างที่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN มีการสร้างชั้นสารกึ่งตัวนำที่มีความบริสุทธิ์สูง (เจือสารปริมาณน้อยมาก) หรือสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก (i) ระหว่างรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 2.17



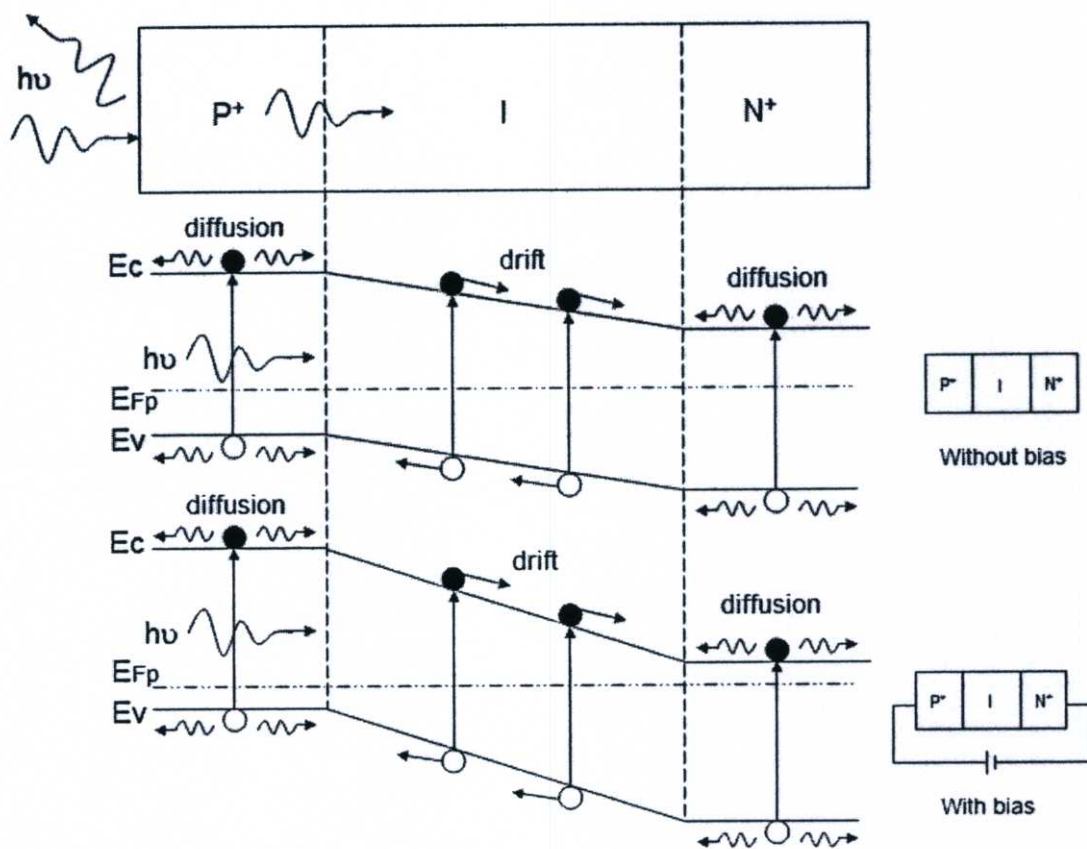
รูปที่ 2.17 โครงสร้างภาคตัดขวางตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN [7]

ลักษณะเด่นของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN คือ จากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูง เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนรังสีที่กว้าง ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้งานโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์กันอย่างกว้างขวาง เช่น [8-9] การตรวจจบบยาเสพติด การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร การสร้างภาพทางการแพทย์ ระบบติดตามด้วยเลเซอร์ (laser tracking systems) และการสร้างภาพ 3 มิติ และระบบการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น ดังนั้นในหัวข้อนี้จะกล่าวเกี่ยวกับคุณสมบัติ และการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดชนิด PIN

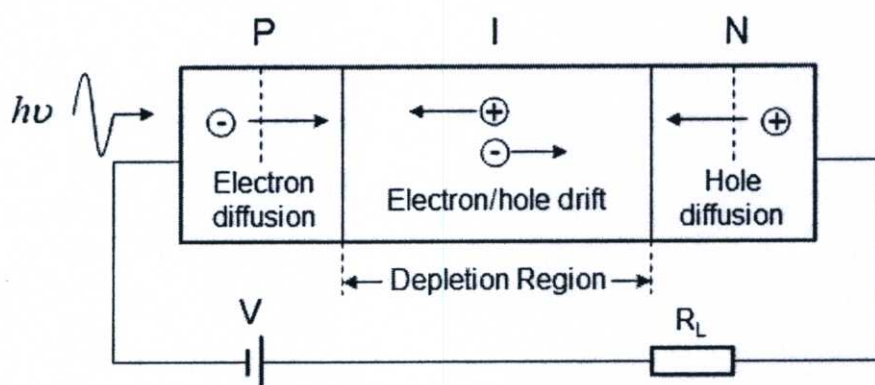
2.5.1 หลักการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN

หลักการทำงานพื้นฐานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบชนิดอินโฟโตไดโอดชนิด PIN นั้น คล้ายกับกรณีของชนิดอินโฟโตไดโอดชนิด PN แตกต่างที่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบชนิดอินโฟโตไดโอดชนิด PIN มีชั้นอินทรีนซิกอยู่ระหว่างชั้นพีเข้มชั้นและเอ็นเข้มชั้น ความกว้างเขตปลอดพาหะสามารถควบคุมได้โดยการกำหนดปริมาณและวิธีการเติมอะตอมสารเจือจางรอยต่อพี-เอ็น

จากรูปที่ 2.18 เมื่อมีแสงหรือรังสีมาตกกระทบกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบชนิดอินโฟโตไดโอด กลุ่มก้อนพลังงานของแสงหรือรังสี เรียกว่า “โฟตอน” (photon) จะถ่ายเทพลังงานให้กับอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น ทั้งในชั้นพีเข้มชั้น เขตปลอดพาหะ และชั้นเอ็นเข้มชั้น แต่บริเวณที่มีสนามไฟฟ้าจะเป็นพื้นที่ที่ทำให้เกิดกระแสแสงได้ดี เช่น บริเวณปลอดพาหะที่รอยต่อ $P^+ - i$, รอยต่อ $N^+ - i$ และชั้นอินทรีนซิก อิเล็กตรอนในชั้นพีจะแพร่ไปสู่ชั้นเอ็น และอิเล็กตรอนในบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะพัดพาไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนกรณีของโฮลนั้นจะเคลื่อนที่ทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน กล่าวคือ โฮลในชั้นเอ็นจะแพร่ไปสู่ชั้นพี และโฮลในบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะพัดพาไปสู่ชั้นพี แสดงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.18 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แสดงแถบพลังงานขณะไม่ได้รับการไบอัส และได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.19 หลักการทำงานของโฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น

พาหะที่เกิดขึ้นจากแสงหรือรังสีนั้น จะเปลี่ยนเป็นกระแสไฟฟ้าที่เอาต์พุตได้ด้วยกลไก 2 ชนิด ดังรูปที่ 2.19 ได้แก่ [5]

1.) ถ้าพาหะอิสระเหล่านี้สามารถไหลออกสู่วงจรรภายนอกได้ ก็จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลพาหะอิสระที่เกิดในชั้นอินทรีนซิค จะมีบทบาทในการกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตได้มาก

ที่สุดโดยพาหะจากชั้นอินทรีนซิก จะถูกครีฟท์ (drift) ให้ไหลออกสู่วงจรภายนอกด้วยปรากฏการณ์ที่พาหะด้วยศักย์ไฟฟ้าภายใน โดยอิเล็กตรอนจะไหลออกมาทางชั้นเอ็น และโฮลจะไหลออกทางชั้นพี กระแสไฟฟ้าที่ได้ในลักษณะนี้เรียกว่า “กระแสไฟฟ้าครีฟท์” I_{drift} (drift current)

2.) โฮลที่เกิดในชั้นเอ็นนั้น ถ้ามีระยะทางการแพร่ (diffusion length) ที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่ซึมจากชั้นเอ็น ผ่านเข้าสู่ชั้นอินทรีนซิก และไหลไปสู่ชั้นพีได้ และกลายเป็น “กระแสไฟฟ้าแพร่” I_{diff} (diffusion current) ในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนที่เกิดในชั้นพี ถ้ามีระยะการแพร่ที่ไกลเพียงพอ ก็จะแพร่จากชั้นพี เข้าสู่ชั้นอินทรีนซิก และชั้นเอ็นได้ และจะกลายเป็นกระแสไฟฟ้าแพร่ด้วย

กระแสแสงรวม (I_p) ที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดชนิด PIN จึงเป็นผลรวมของกระแสไฟฟ้าครีฟท์ และกระแสไฟฟ้าแพร่ดังสมการที่ 2.4

$$I_p = I_{drift} + I_{diff} \quad (2.4)$$

ซึ่งกระแสไฟฟ้าครีฟท์ I_{drift} สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.5

$$I_{drift} = (1 - e^{-\alpha W_D}) = q \frac{P_0(1-R)}{h\nu} A(1 - e^{-\alpha W_D}) \quad (2.5)$$

สำหรับกระแสไฟฟ้าแพร่สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.6

$$I_{diff} = qA\Phi_0 \frac{\alpha L_p}{1 + \alpha L_p} e^{-\alpha W_D} + qAP_{n0} \frac{D_p}{L_p} \quad (2.6)$$

ดังนั้นกระแสแสงรวมทั้งที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดชนิด PIN จึงหาได้จากผลรวมของสมการที่ (2.5) และ (2.6) ได้ดังนี้

$$I_p = qA\Phi_0 \left[1 - \frac{e^{-\alpha W_D}}{1 + \alpha L_p} \right] + \frac{qAP_{n0}D_p}{L_p} \quad (2.7)$$

โดยที่ Φ_0 คือ ฟลักซ์โฟตอนที่ตกกระทบโฟโตไดโอดชนิด PIN ต่อหน่วยพื้นที่ A

W_D คือ ความหนาของชั้น i

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

P_{n0} คือ ความหนาแน่นของโฮล

L_p คือ ระยะทางการแพร่ของโฮล

L_n คือ ระยะทางการแพร่อิเล็กตรอน

จากสมการที่ (2.7) ค่ากระแสแสงเอาต์พุตรวมของโฟโตไดโอดชนิด PIN แปรผันตรงกับจำนวนโฟตอนต่อพื้นที่ตกกระทบตัวตรวจจรับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN

2.5.2 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN มีประสิทธิภาพควมดัมสูงเนื่องจากมีชั้นคูคกลินแสงที่กว้าง ซึ่งชั้นคูคกลินแสงคือ บริเวณปลอดพาหะ โดยขนาดความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของโฟโตไดโอดสามารถควบคุมได้ โดยการกำหนดแรงดันไบอัสแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผลึกฐานรองซิลิคอน V_R สามารถหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม แสดงได้ดังนี้ [10]

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s}{q} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} (V_{bi} + V_R) \quad (2.8)$$

2.5.3 ความจุไฟฟ้ารอยต่อ

ไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็นสามารถแสดงลักษณะสมบัติเป็นตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ เป็นความจุไฟฟ้าที่เกิดจากโครงสร้างบริเวณปลอดพาหะของรอยต่อ ซึ่งมีลักษณะที่คล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุแบบแผ่นโลหะขนานซึ่งเป็นตัวเก็บประจุพื้นฐานทั่วไป การวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าจากรอยต่อ คือ พิจารณาจากนิยามของความจุไฟฟ้า ซึ่งหมายถึงอัตราการเปลี่ยนแปลงของประจุไฟฟ้าเนื่องจากเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส ซึ่งความกว้างของของบริเวณปลอดพาหะจะมีการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้น

สำหรับความจุไฟฟ้าของรอยต่อ $p^+ - n$ แบบชั้นบันได หาได้จากสมการที่ 2.9 [10]

$$C_j = \epsilon_s \frac{A}{W_D} \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_R)}} \quad (2.9)$$

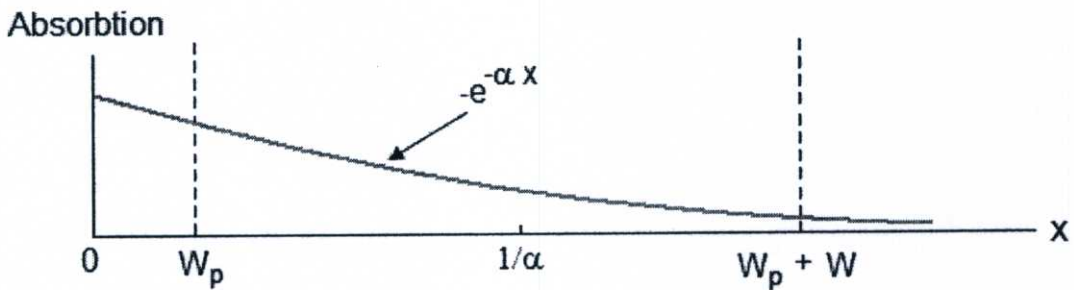
2.6 ลักษณะสมบัติต่างๆของตัวตรวจจรับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

2.6.1 ประสิทธิภาพควมดัม

นิยามของประสิทธิภาพควมดัม (quantum efficiency: η) ของโฟโตไดโอด คือ อัตราส่วนของจำนวนการเกิดคูพาหะอิเล็กตรอน-โฮล กับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ นั่นคือ [11]

$$\eta = \frac{J_p / q}{P_o / Ah\nu} = (1 - R) \left(1 - \frac{e^{-\alpha W_D}}{1 + \alpha L_P} \right) \quad (2.10)$$

ในทางอุดมคติแสงหรือรังสีที่ตกกระทบบนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบชนิดคอนโฟโตไดโอด ทั้งหมดควรจะถูกลูกคลื่นในบริเวณปลอดพาหะและคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นทั้งหมด เคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ประสิทธิภาพควอนตัมควรจะเท่ากับ 1 แต่ความจริงแล้วในทางปฏิบัติ โฟตอนจากแสงหรือรังสีที่ยังสารกึ่งตัวนำไม่ถูกลูกคลื่นในบริเวณปลอดพาหะทั้งหมด แต่จะถูกลูกคลื่นทั่วทั้งชิ้นสาร และพลังงานจะมีค่าลดลงเมื่อระยะทางเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 2.20 ทำให้ทราบว่า การเพิ่มประสิทธิภาพควอนตัมควรพิจารณาถึงความกว้างของบริเวณปลอดพาหะและการรวมตัวของพาหะก่อนถึงขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 2.20 การลดลงของพลังงานแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ตามระยะความลึก [12]

แต่อย่างไรก็ตาม ถ้าความกว้างบริเวณปลอดพาหะมากเกินไป จะทำให้พาหะต้องใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านชั้นอินทรีนซิคนานขึ้น และจะส่งผลให้ความเร็วในการตอบสนองลดลงได้

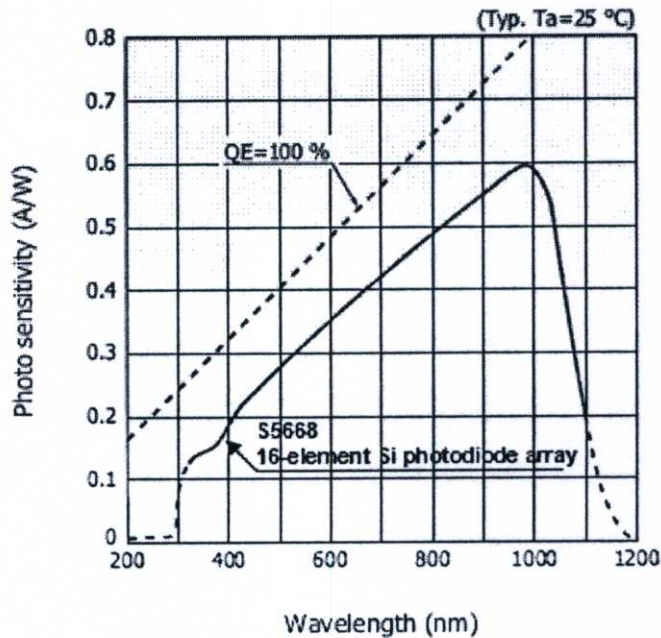
2.6.2 สภาพการตอบสนองทางแสง

สภาพการตอบสนองทางแสง (responsivity : \mathcal{R}) คือ อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดกับกำลังงานแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจจับ สามารถหาได้จากสมการที่ 2.11

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_o} = \eta \frac{q}{h\nu} \eta \frac{q\lambda}{hc} (A/W) \quad (2.11)$$

- โดยที่ P_o คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจจับ
 q คือ ประจุอิเล็กตรอน
 I_p คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทคเตอร์
 h คือ ค่าคงที่ของพลังค์
 ν คือ ความถี่ของคลื่น
 λ คือ ความยาวคลื่น
 η คือ ค่าประสิทธิภาพควอนตัม

จากสมการ (2.11) พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน อย่างไรก็ตาม ค่าประสิทธิภาพควอนตัม (η) จะขึ้นอยู่กับสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง (α) ซึ่งแปรผกผันตรงกับความยาวคลื่น (λ) รูปที่ 2.21 แสดงสภาพการตอบสนองทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN จะเห็นได้ว่าสภาพการตอบสนองลดอย่างทันทีทันใดเมื่อถึงจุดความยาวคลื่นคัทออฟ



รูปที่ 2.21 แสดงสภาพการตอบสนองทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN [6]

2.6.3 ความเร็วในการตอบสนอง

เมื่อตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้รับแสงหรือรังสี คู่อิเล็กตรอน-โฮลส่วนใหญ่เกิดในชั้นปลอดพาหะ และพาหะบางส่วนเกิดในชั้นพี และชั้นเอ็น ในระยะทางแพร่พาหะเหล่านี้ จะถูกแยกออกจากกันด้วยสนามไฟฟ้าที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และกลายเป็นกระแสไฟฟ้าเอาต์พุต

ความเร็วในการตอบสนองของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ได้แก่ เวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงหรือรังสีจนเกิดกระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมา ตามปกตินิยมแสดงด้วยช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) หรือค่าช่วงเวลาลง (t_f) โดยหลักการของปรากฏการณ์ทางแสงแล้ว การดูดกลืนแสงและการเกิดคูพาหะจะใช้เวลาสั้นมาก ดังนั้นการล่าช้าของเวลากว่าจะได้กระแสไฟฟ้าเอาต์พุตออกมาจึงขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ตัวอื่น ๆ มากกว่า โดยที่ตัวแปรสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความเร็วในการตอบสนองของตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้แก่

- 1.) เวลาครีพท์ (drift time : T_{drift}) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นปลอดพาหะ
- 2.) เวลาแพร่ (diffusion time : T_{diff}) ที่พาหะใช้ในการแพร่ซึมเข้าสู่ชั้นปลอดพาหะ
- 3.) ค่าคงที่เวลา (CR time constant : T_{CR}) ของวงจรภายนอก

1.) เวลาคริฟท์

พาหะในชั้นปลอดพาหะ สามารถเคลื่อนที่ด้วยแรงจากสนามไฟฟ้า (ε) และเรียกความเร็วในการวิ่งเช่นนี้ว่า ความเร็วคริฟท์ (drift velocity : v_d) โดยที่ $v_d = \mu\varepsilon$ และ μ คือ ความคล่องตัวของพาหะ ถ้าชั้น i หนาเท่ากับ W และแรงดันไฟฟ้าไบแอสย้อนกลับเท่ากับ V_R จะได้ว่า $\varepsilon = V_R/W$ ดังนั้นเวลาพัคพาที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้น i คือ

$$T_{drift} = \frac{WD}{V_d} = \frac{W^2}{\mu V_R} \quad (2.12)$$

เนื่องจากความคล่องตัวของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบตรง มีค่ามากกว่าในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง ดังนั้นเวลาคริฟท์ของพาหะในสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่าง พลังงานแบบตรงจึงมีค่าน้อยกว่าของสารกึ่งตัวนำที่มีช่องว่างพลังงานแบบไม่ตรง

2.) เวลาแพร์

ในบริเวณที่ไม่ได้เป็นชั้นปลอดพาหะเช่นชั้น p^+ หรือ n^+ จะไม่มีสนามไฟฟ้า ดังนั้น T_{diff} จึงถูกกำหนดด้วยเวลาอายุของพาหะนั้นเอง ในทางปฏิบัติจะออกแบบให้ชั้น p และ n บางมาก จึงทำให้การคุกคลืนแสงในชั้น p^+ และ n^+ มีน้อยมาก ดังนั้น I_{diff} จึงมีค่าน้อยกว่า I_{diff} มาก นั่นคือการออกแบบให้ I_{diff} มีค่าน้อยจะช่วยทำให้โฟโตไดโอดทำงานได้เร็วขึ้น โดยประมาณดังนี้

$$\text{กรณี แสงเข้าทาง PIN} \quad T_{diff} = \frac{1}{13} \left(\frac{3}{\alpha} - 0.54 \rho p^{1/2} (V_{bi} - V_R)^{1/2} \times 10^{-4} \right)^2 \quad (2.13)$$

$$\text{กรณี แสงเข้าทาง NIP} \quad T_{diff} = \frac{1}{36.4} \left(\frac{3}{\alpha} - 0.32 \rho p^{1/2} (V_{bi} - V_R)^{1/2} \times 10^{-4} \right)^2 \quad (2.14)$$

3.) ค่าคงที่เวลาของ CR

ค่าคงที่เวลาของ CR เกิดจากเวลาที่ต้องใช้ในการชาร์จ และดิสชาร์จประจุไฟฟ้าผ่านความจุไฟฟ้าของรอยต่อ และมีค่าเท่ากับผลคูณของ $R_L \times C_T$ คือ ความต้านทานของโหลดและ C_T คือ ความจุไฟฟ้าของรอยต่อ PIN (และรวมขาของต่อต่าง ๆ ด้วย) โดยรวมความต้านทานอนุกรมด้วย แต่ถ้าวางแบบดี ๆ และทำการไบแอสย้อนกลับ จะทำให้ $R_S \ll R_L$

นิยาม คือ เวลาที่ใช้ในการดิสชาร์จประจุมากกว่า 90% ของค่าสูงสุดลงเหลือ 10 % ดังนั้นค่าคงที่เวลา จึงเขียนได้ดังนี้

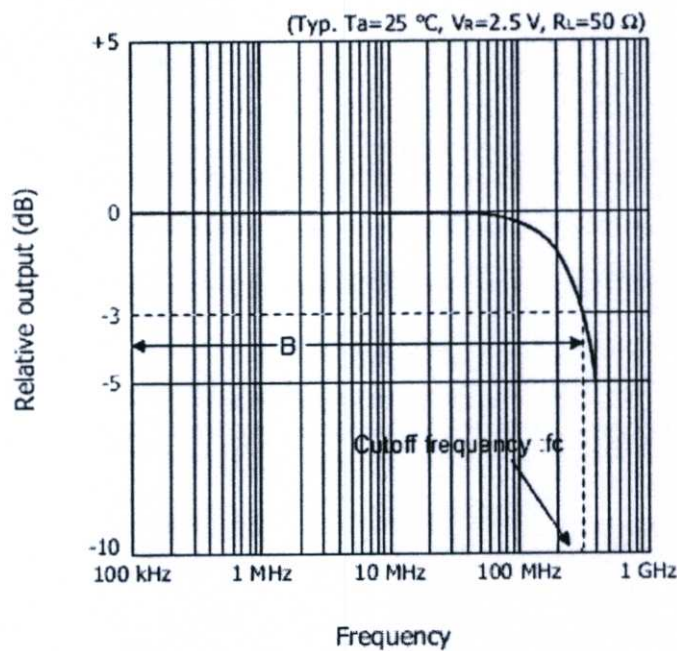
$$T_{CR} = 2.2R_L C_T \quad (2.15)$$

2.6.4 เวลาตอบสนอง และแบนด์วิดท์

ในจำนวนแฟกเตอร์เวลาทั้งสามชนิดที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ตัวใดที่มีค่ามากที่สุดจะเป็นตัวกำหนดความเร็วในการตอบสนอง หรือแฟกเตอร์เวลาทั้งสามชนิดมีอิทธิพลเท่าเทียมกัน อาจใช้ค่าเฉลี่ยได้ว่า

$$T = (T_{dri}^2 + T_{diff}^2 + T_{CR}^2)^{1/2} \quad (2.16)$$

ถ้า T_{diff} มีค่ามากจะทำให้ความเร็วในการตอบสนองลดลง การออกแบบให้การดูคลื่นแสงในชั้น p^+ และ n^+ มีค่าน้อยจะเป็นการลดกระแสไฟฟ้าแพร่ และทำให้ T_{diff} น้อยลงทางด้านค่าคงที่เวลา CR นั้น การออกแบบให้ชั้นปลอดพาหะหนาขึ้นจะทำให้ค่าความจุรอยต่อลดลง และจะทำให้ค่าคงที่เวลาลดลงได้



รูปที่ 2.22 การตอบสนองทางความถี่ของสัญญาณ

สำหรับความถี่ซึ่งจะทำให้แรงดันไฟฟ้าลดลงเหลือ 0.707 (-3dB) ดังแสดงในรูปที่ 2.22 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณที่ความถี่คัทออฟ นั่นคือ

$$B = \frac{1}{2\pi RC} \quad (2.17)$$

โดยที่ B นี้เรียกว่า แบนด์วิดท์

ถ้าสิ่งประดิษฐ์ถูกกำหนดด้วยแฟกเตอร์ค่าคงที่เวลา CR มาก จะได้ความสัมพันธ์ระหว่างแบนด์วิธ และค่าคงที่เวลา CR ดังนี้

$$T = T_{CR} = 2.2CR \frac{2.2}{2\pi B} = \frac{0.35}{B} \quad (2.18)$$

2.6.5 การเกิดสัญญาณรบกวน

สัญญาณรบกวน (noise) เป็นแฟกเตอร์สำคัญ การเกิดสัญญาณรบกวนในโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นสาเหตุที่ทำให้โฟโตไดโอดไม่สามารถตรวจจับแสงที่มีความเข้มต่ำกว่าขีดจำกัด ในการใช้งานตัวตรวจจับแสงหรือรังสีที่ได้ผลต่างๆ ไปนั้น แสงหรือรังสีจะต้องผลิตกระแสไฟฟ้าแสงให้ได้ปริมาณมากกว่าสัญญาณรบกวน [11] การเกิดสัญญาณรบกวนที่จะนำมาพิจารณาในหัวข้อนี้มี 3 ส่วน คือ 1.) สัญญาณรบกวนมืด (dark noise) 2.) สัญญาณรบกวนชนิดช็อต (shot noise) และ 3.) สัญญาณรบกวนชนิดจอห์นสัน (Johnson noise) หรือเทอร์มอล (thermal noise)

1.) สัญญาณรบกวนมืด

สัญญาณรบกวนชนิดนี้เกิดจากผลของกระแสรั่ว เมื่อใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดที่ต้องป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแส I_d ไหลผ่านโฟโตไดโอด ขณะไม่มีแสงตกกระทบพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด ปริมาณกระแสมีค่านับกับโครงสร้าง และระดับแรงดันที่ตกคร่อมรอยต่อของไดโอด ซึ่งสามารถอธิบายการเกิดสัญญาณรบกวนได้โดยการแจกแจงฟังก์ชันของปัวส์ซอง (Poisson distribution) แสดงด้วยสมการ ดังนี้

$$i_n = (2qBI_d)^{1/2} \quad (2.19)$$

เมื่อ I_d คือ กระแสมืดของโฟโตไดโอด

B คือ แบนด์วิธ

q คือ ประจุอิเล็กตรอน

i_n คือ กระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนมืด

การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตไดโอดไวลดาอีกทำให้สัญญาณรบกวนชนิดนี้มีค่าเกือบเป็นศูนย์เพราะไม่มีกระแสมืด ถ้าสัญญาณรบกวนลดลงได้ทำให้ความไวแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นเนื่องจากอัตราส่วน S/N มากขึ้น

2.) สัญญาณรบกวนชนิดช็อต สัญญาณรบกวนชนิดแปรผันกับความเข้มแสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอด กระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนเกิดเมื่อโฟตอนจากแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

อิเล็กทรอนิกส์-โฮลอิสระขึ้นในวัสดุที่ใช้สร้างตัวตรวจจับ ซึ่งโฟตอนที่ตกกระทบโฟโตไดโอดแบบไม่เป็นระเบียบ(random) ทำให้เกิดการผลิตคู่พาหะอิเล็กทรอนิกส์แบบไม่เป็นระเบียบด้วยสัญญาณรบกวนชนิดช็อคจึงเปลี่ยนตามกระแสแสง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนชนิดช็อคเกิดได้ในโฟโตไดโอดทั้งกรณีไม่ไบอัส และไบอัส ซึ่งสามารถอธิบายฟังก์ชันการเกิดสัญญาณรบกวนได้โดยการแจกแจง ของปัวส์ซอง แสดงด้วยสมการได้ดังนี้

$$i_{sh} = (2qBI_p)^{1/2} \quad (2.20)$$

เมื่อ I_p คือ กระแสแสงของโฟโตไดโอด

B คือ แบนด์วิท

i_{sh} คือ กระแสไฟฟ้าของสัญญาณรบกวนชนิดช็อค

3.) สัญญาณรบกวนชนิดจอห์นสัน สัญญาณรบกวนชนิดนี้เรียกอีกอย่างว่า “สัญญาณรบกวนชนิดเทอร์มอล” (thermal noise) เป็นผลจากการเคลื่อนที่แบบไม่เป็นระเบียบของอิเล็กตรอนเนื่องจากผลของอุณหภูมิตัวนำ ดังนั้นสัญญาณรบกวนชนิดจอห์นสันไม่ขึ้นกับสัญญาณอินพุต และความต้านทานแบบจันต์ในโฟโตไดโอดเป็นสาเหตุของสัญญาณรบกวนชนิดนี้ ซึ่งสมการกระแสไฟฟ้ารบกวนสามารถแสดงได้ดังนี้

$$I_J = (4KTB / R_{SH})^{1/2} \quad (2.21)$$

เมื่อ K คือ ค่าคงที่โบลทซ์มันน์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

B คือ แบนด์วิท

R_{SH} คือ ความต้านทานจันต์ของโฟโตไดโอด

กระแสไฟฟ้ารบกวนในตัวอุปกรณ์สามารถหาได้โดยหาผลรวมที่สองของสัญญาณรบกวนทั้ง 3 ชนิด ดังนี้

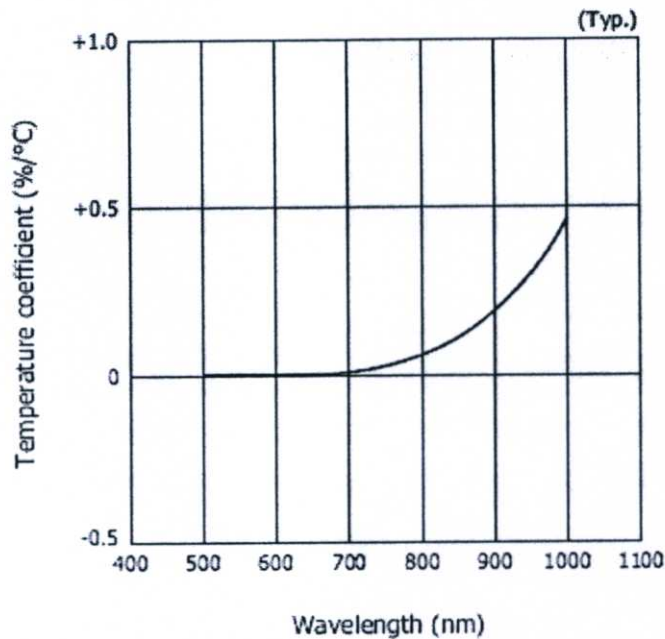
$$i_T = (i_n^2 + i_{sh}^2 + i_J^2)^{1/2} \quad (2.22)$$

เมื่อ i_T คือ สัญญาณรบกวนรวมที่เกิดในโฟโตไดโอด i_n คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากกระแสรั่วขณะไม่ได้รับแสง i_{sh} คือ สัญญาณรบกวนที่เกิดจากผลของโฟตอนที่ตกกระทบโฟโตไดโอดในแบบไม่เป็นระเบียบและ i_J คือสัญญาณรบกวนที่เกิดการลดลงของความต้านทานจันต์เนื่องจากผลอิทธิพลของอุณหภูมิจากสมการ (2.22) จะเห็นได้ว่า การลดกระแสมืดดังกล่าวจะทำให้

สามารถลดสัญญาณรบกวนของโฟโตไดโอดลงได้ซึ่งกลไกการเกิดกระแสมีจะอธิบายรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

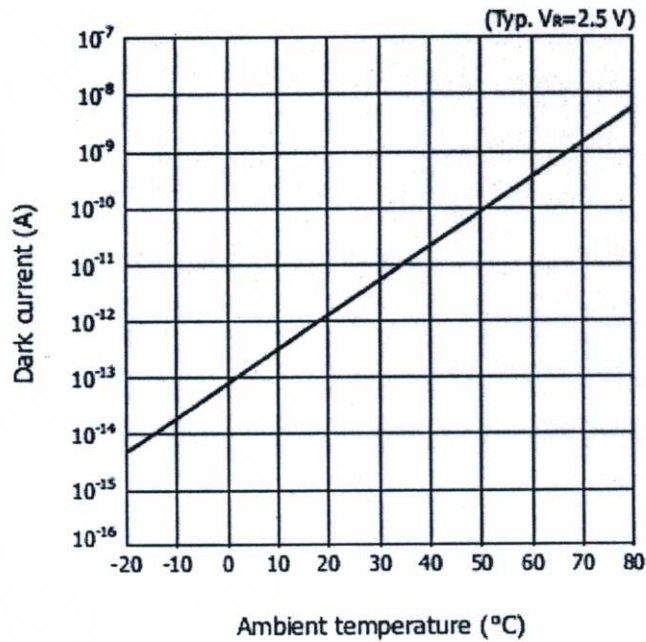
2.6.6 อิทธิพลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิมีอิทธิพลต่อการทำงานของโฟโตไดโอด การเปลี่ยนแปลงทำให้ผลตอบสนองต่อความยาวคลื่นของแสงและกระแสเกิดจากการเปลี่ยนแปลง กล่าวคือ ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงมีค่าสูงขึ้น โดยจะทำให้ผลตอบสนองต่อแสงที่มีความยาวคลื่นยาวขึ้น ขณะที่แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นมีผลตอบสนองต่อแสงต่ำลงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อสเปกตรัมเอาท์พุทของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

สำหรับกระแสมีค่านั้น เนื่องจากถ้าอุณหภูมิสูงขึ้น ความน่าจะเป็นของการกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ให้ขึ้นไปแถบคอนดักชันจะมีค่ามากขึ้น ดังนั้น กระแสมีคจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ดังรูปที่ 2.24 นอกจากนี้ถ้าอุณหภูมิสูงขึ้นจะทำให้ความต้านทานชั้นดัดลงและสัญญาณชนิดเทอร์มอลและสัญญาณชนิดช็อคเพิ่มขึ้นด้วย



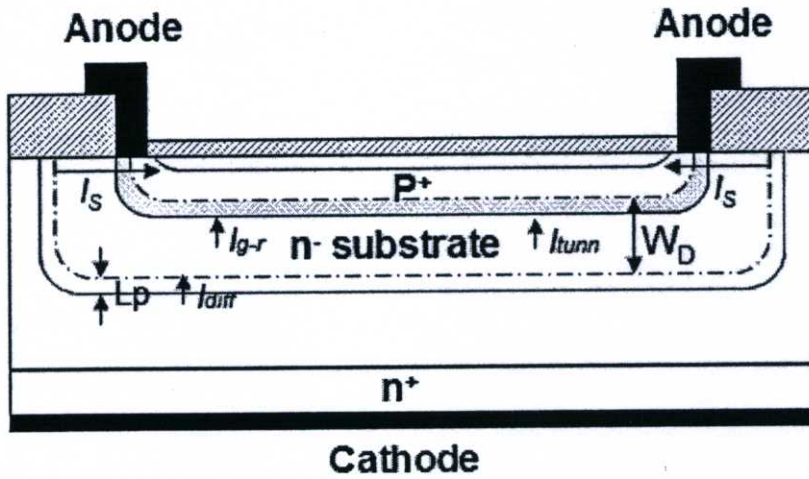
รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

2.6.7 พฤติกรรมการเกิดกระแสมืด [13]

จากหัวข้อที่ผ่านมาปัจจัยที่มีข้อจำกัดในการใช้งานโฟโตไดโอด คือ ขนาดกระแสมืด ขณะโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และไม่ได้รับแสง หรือรังสี จะมีกระแสค่าน้อยๆ ไหลผ่านไดโอด โดยกระแสรั่ว หรือกระแสมืดดังกล่าวนี้เกิดจากในเนื้อสาร (bulk) และบริเวณผิวสัมผัส (Si/SiO₂) ของตัวตรวจจับ โดยทั่วไปแหล่งการเกิดกระแสมืด (I_{dark}) ของโฟโตไดโอดสามารถแบ่งได้ 4 ประเภท คือ

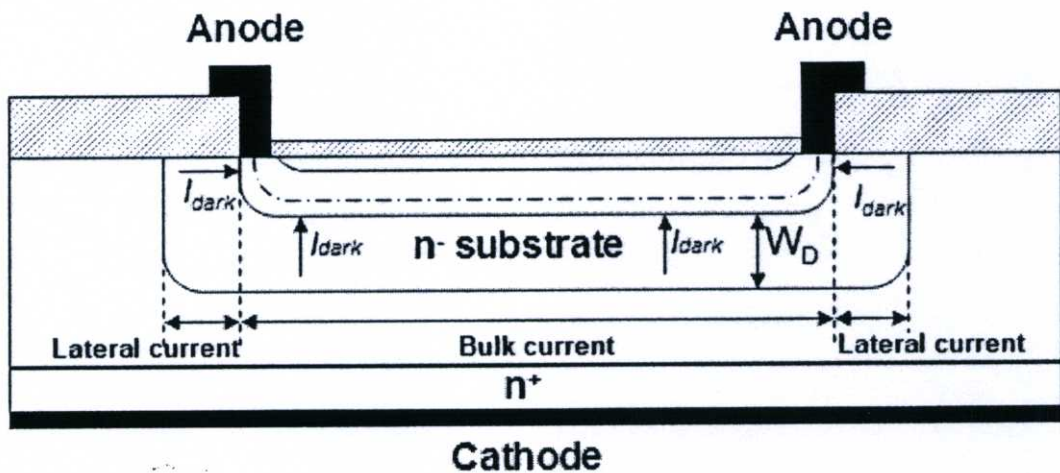
$$I_{dark} = I_{diff} + I_{g-r} + I_{tun} + I_s \quad (2.23)$$

ซึ่งเป็นผลรวมของกระแสแพร่ของพาหะส่วนน้อย (diffusion current : I_{diff}), กระแสการเกิด-รวมตัวใหม่ในบริเวณปลอดพาหะ (generation-Recombination current : I_{g-r}), กระแสทะลุอุโมงค์ก้ำแพงศักย์ (tunnel current : I_{tun}), กระแสรั่วผิวสัมผัส (surface leakage current : I_s) โดยที่กระแสมืดแต่ละประเภทมีพฤติกรรมการเกิดแตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 แหล่งกำเนิดกระแสมีชนิดต่างๆของโฟโตไดโอด

บริเวณการเกิดกระแสมีดอาจแบ่งได้เป็น กระแสได้บริเวณผิวสัมผัส (Lateral current) และในเนื้อสาร (Bulk current) กระแสได้บริเวณผิวสัมผัสเป็นกระแสมีดที่เกิดในบริเวณใกล้ขอบด้านข้างของโฟโตไดโอด กระแสนี้จึงแปรผันกับพื้นที่ขอบด้านข้างของโฟโตไดโอด ส่วนกระแสในเนื้อสารเป็นกระแสมีดที่เกิดจากพื้นที่ได้บริเวณรอยต่อพี-เอ็น โดยตรง กระแสในเนื้อสารขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่รอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 การเกิดกระแสมีดแบ่งตามบริเวณของโฟโตไดโอด

2.6.7.1 กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย

เมื่อโฟโตไดโอด ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ สนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะสูงมาก จนความสมดุลระหว่างพาหะแพร่ และครีฟท์ไม่เท่ากัน ทำให้กระแสครีฟท์มากกว่ากระแสแพร่ โสไลต์ขอบบริเวณชั้นเอ็นเคลื่อนที่ไปยังชั้นพีด้วยสนามไฟฟ้าในบริเวณปลอดพาหะ อิเล็กตรอนในชั้นพีเคลื่อนที่ไปยังชั้นเอ็น เมื่อพาหะส่วนน้อยเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้า พาหะส่วนน้อย

ภายในบริเวณใกล้เคียงมาแทนที่ จึงเกิดเป็นกระแสการแพร่ภายใต้แรงดันไบอัส กระแสการแพร่สามารถอธิบายได้ดังสมการ

$$I_{diff} = q \frac{n_i^2}{N_D} \left[\sqrt{\frac{D_p}{\tau_p}} \right] = q \frac{n_i^2}{N_D} \sqrt{\frac{L_p}{\tau_p}} \quad (2.24)$$

เมื่อ q คือ ประจุอิเล็กตรอน

n_i คือ ความหนาแน่นอินทรินซิก

N_D คือ ความหนาแน่นอะตอมผู้ให้

D_p คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล

τ_p คือ อายุของโฮล

L_p คือ ระยะการแพร่ของโฮล

จากสมการเห็นได้ว่ากระแสการแพร่ไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัส แต่อิทธิพลของอุณหภูมิทำให้กระแสการแพร่มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นอินทรินซิกเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่สูงขึ้น

2.6.7.2 กระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่

กระแสการเกิดและการรวมตัวใหม่ หรือกระแส $g-r$ เป็นกลไกการเกิดกระแสมีอีกตัวหนึ่งที่เป็นตัวกำหนดสมรรถนะของโฟโตไดโอด ซึ่งสาเหตุเนื่องจากการเกิดศูนย์กลางการเกิด และรวมตัวใหม่ (generation-recombination center) ในช่องว่างพลังงาน ทำหน้าที่เป็นศูนย์กลางการรวมตัวของอิเล็กตรอน และโฮลได้ เมื่อมีระดับพลังงานแปลกปลอมเหล่านี้อยู่ในบริเวณปลอดพาหะขณะที่อุณหภูมิสูงกว่าศูนย์เคลวิน และไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสนิคใหม่เกิดขึ้นเรียกว่ากระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่ โดยปริมาณศูนย์กลางการเกิด และการรวมตัวใหม่ขึ้นอยู่กับตำหนิ และอะตอมธาตุแปลกปลอมของผลึก สามารถเขียนสมการการเกิดกระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่ ได้ดังนี้

$$I_{g-r} = \frac{q n_i A W_D}{\tau} \quad (2.25)$$

จากสมการกระแสการเกิด และการรวมตัวใหม่ จะเห็นได้ว่าปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเกิดกระแส คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะซึ่งเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส และความหนาแน่นอินทรินซิก ซึ่งเป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ

2.6.7.3 กระแสรั่วบริเวณสัมผัส

กระแสมีดส่วนใหญ่ของโฟโตไดโอดเกิดเนื่องจากการเกิด และรวมตัวของพาหะในบริเวณเนื้อสารและบริเวณปลอดพาหะ ในทางปฏิบัติกระบวนการสร้างจริงโฟโตไดโอดยังสามารถเกิดกระแสมีดได้อีกในผิวสัมผัสของตัวอุปกรณ์ในระหว่างผิวสารกึ่งตัวนำและฉนวน จะมีสถานะพลังงานในช่องว่างแถบพลังงานเกิดขึ้นเป็นศูนย์กลางการเกิด-รวมตัวใหม่ (g-r center) และเป็นแหล่งเกิดพาหะและกระแสมีดที่สำคัญ กระบวนการเกิดนี้อธิบายโดยอัตราเร็วการเกิด-รวมตัวใหม่ที่ผิว กระแสบริเวณผิวสัมผัส หาได้ดังนี้

$$I_s = qn_iSA_s \quad (2.26)$$

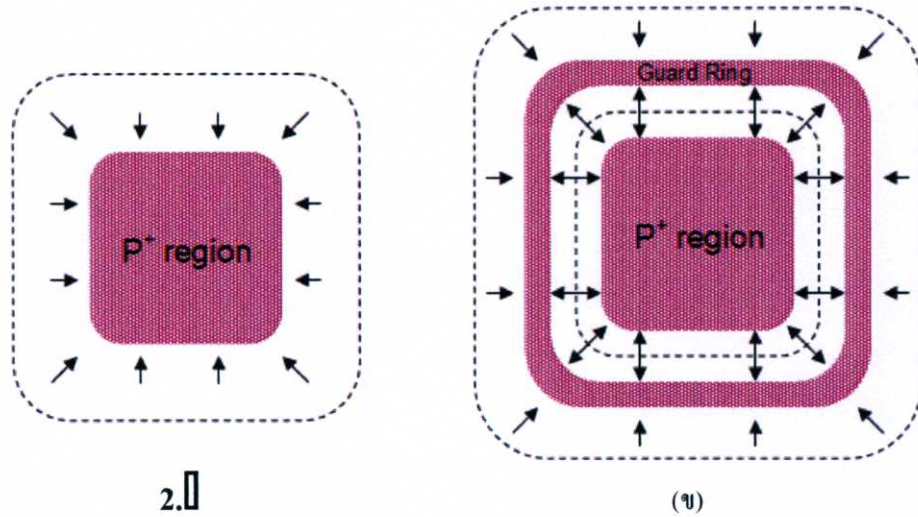
เมื่อ	S	คือ	อัตราเร็วกว่าการเกิด-รวมตัวใหม่
	$A_s = Lw_d$	คือ	พื้นที่ปลอดพาหะของผิวสัมผัส Si/SiO ₂
	L	คือ	บริเวณขอบของโฟโตไดโอด
	W_d	คือ	ความกว้างบริเวณปลอดพาหะผิวสัมผัส Si/SiO ₂

2.7 การ์ดริง

จากข้อหวัก่อนหน้านี กระแสมีดที่เกิดขึ้นขณะโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และไม่ได้รับแสง หรือรังสี จะมีกระแสค่าน้อยๆ ไหลผ่านไดโอด โดยกระแสรั่ว หรือกระแสมีดดังกล่าวนี้เกิดจากในเนื้อสาร และบริเวณผิวสัมผัส Si/SiO₂ ของตัวตรวจจับ เป็นปัจจัยที่มีข้อจำกัดในการใช้งานตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอีกตัวหนึ่งที่มีผลเป็นอย่างมากต่อประสิทธิภาพการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด และเนื่องจากกระแสการเกิดพาหะเนื่องจากความร้อนในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสรั่วระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO₂ เป็นกระแสมีดส่วนใหญ่ที่เกิดในโฟโตไดโอด [14-15] การสร้างชั้นการ์ดริง (guard ring) จะช่วยลดกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO₂ และในเนื้อสารได้ ดังนั้นการลดกระแสดังกล่าวจึงเป็นการลดกระแสมีดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดได้เป็นอย่างดี

การ์ดริงเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดที่เข้มข้น (ชั้น P⁺) เหมือนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่สร้างล้อมรอบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ไว้เพื่อช่วยลดกระแสมีด หน้าที่สำคัญของการ์ดริงคือ การลดกระแสมีดของโฟโตไดโอด

กระแสมีดส่วนใหญ่ นอกบริเวณพื้นที่ไวแสง หรือบริเวณขอบนอกของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะไหลไปยังการ์ดริงดังแสดงในรูปที่ 2.27 กลไกที่ช่วยลดกระแสมีดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN เปรียบเทียบระหว่างโครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง และโครงสร้างที่มีการ์ดริง ในกรณีของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่ไม่มีการ์ดริง กระแสมีด



รูป 2.27 กลไกการลดกระแสรั่วของซิลิคอนโฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างที่ไม่มีการ์ดริง (ข) โครงสร้างที่มีการ์ดริง

ส่วนใหญ่ของบริเวณพื้นที่ไวแสงจะไหลไปยังโฟโตไดโอดทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2.27 (ก) จึงมีผลให้กระแสรั่วของโฟโตไดโอดมีค่าสูงกว่ากรณีโครงสร้างที่มีการ์ดริง กลไกสำคัญที่ทำให้เกิดการลดลงของกระแสรั่วคือ สนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะถูกเบี่ยงเบนให้มีทิศทางไปยังการ์ดริงส่งผลให้พาหะที่จะก่อให้เกิดกระแสรั่วที่เกิดในเนื้อสาร และระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 เคลื่อนที่ไปยังการ์ดริงแทนที่จะไปยังตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงทำให้กระแสรั่วของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

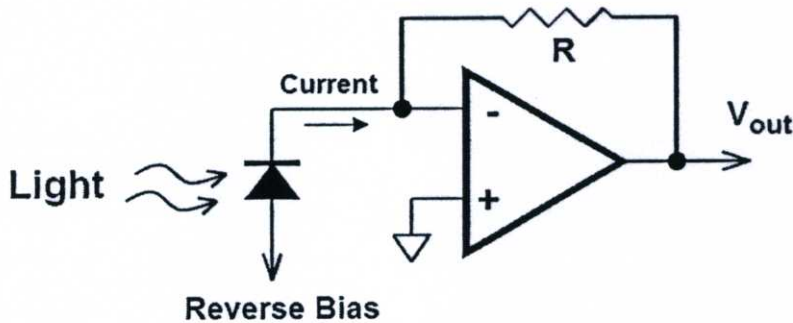
2.8 โหมดการทำงานของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอด

สัญญาณจากโฟโตไดโอดนั้น สามารถวัดได้ทั้งรูปแบบกระแสไฟฟ้า หรือ แรงดันไฟฟ้า กระแสแสงที่โฟโตไดโอดจ่ายออกมานั้น ขึ้นอยู่กับพลังงานแสงที่โฟโตไดโอดได้รับ และกระแสแสงนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้าด้วยวงจรขยายแบบทรานซิมพีแดนซ์ (transimpedance amplifier) โหมดการทำงานพื้นฐานของโฟโตไดโอดอาจแบ่งตามการจ่ายแรงดันไบอัสเป็น 2 แบบ [11] คือ โหมดโฟโตไดโอดคอนดักทีฟ (photoconductive mode) และโหมดโฟโตไดโอดโวลตาอิก (photovoltaic mode) โฟโตไดโอดที่ทำงานในโหมดโฟโตโวลตาอิก ไม่ต้องจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับไดโอด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดในโหมดนี้เหมือนกับกรณีเซลล์แสงอาทิตย์ได้รับแสง ในทางกลับกันกรณีที่จ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับไดโอด ก็จะทำงานในโหมดโฟโตไดโอดคอนดักทีฟ

2.8.1 โหมดโฟโตคอนดัคทีฟ

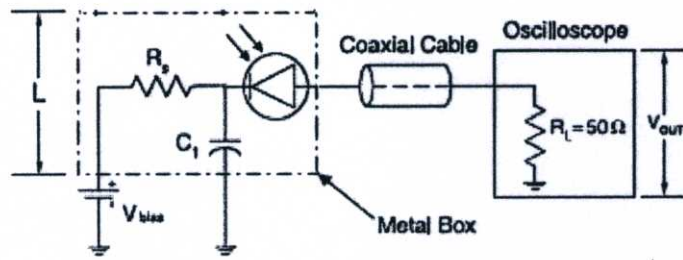
การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตคอนดัคทีฟ เป็นการจ่ายแรงดันไบอัสภายนอกในทิศทางไบอัสย้อนกลับให้กลับรอยต่อพี-เอ็น ในกรณีนี้กระแสที่เกิดมาจากสองแหล่งคือ กระแสที่เกิดจากแสง และกระแสรั่วไหลย้อนกลับ การจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ไดโอดทำให้เวลาเคลื่อนที่ของพาหะลดลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในที่เพิ่มและยังช่วยลดค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อได้ด้วยเนื่องจากเขตปลอดพาหะมีการขยายเพิ่มขึ้น

ในการใช้งานในโหมดโฟโตคอนดัคทีฟนี้ จะเป็นการประยุกต์การใช้งานโฟโตไดโอดที่เน้นความเร็วมากกว่าความเที่ยงตรง ความเร็วตอบสนองของโฟโตไดโอดที่เพิ่มขึ้นนี้มาจากผลของสนามไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้น และค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อที่ลดลง ส่งผลให้ค่าคงที่เวลา (time constant : CR) ลดลง นอกจากนี้การตอบสนองของโฟโตไดโอดยังมีความเป็นเชิงเส้นเพิ่มขึ้นด้วย แต่อย่างไรก็ตามการจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับทำให้เกิดกระแสรั่วไหลย้อนกลับ ทำให้ signal to noise ratio (SNR) ของโฟโตไดโอดลดลง วงจรการทำงานในโหมดโฟโตคอนดัคทีฟแสดงในรูปที่ 2.28



รูปที่ 2.28 การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตคอนดัคทีฟ

ในการประยุกต์การใช้งานกับแสง หรือรังสีที่มีพลังงานค่าต่ำนั้น การเพิ่มอัตราขยายของวงจร สามารถทำได้โดยการเพิ่มค่าตัวต้านทานให้มากขึ้น ส่วนในการประยุกต์การใช้งานกับแสงที่มีพลังงานสูง หรือความเร็วการตอบสนองสูงนั้น การต่อวงจรให้มีระยะทางสั้นจะมีความเหมาะสม ดังรูปที่ 2.29 โฟโตไดโอดจะถูกต่อตรงเข้ากับออสซิลอสโคป หรือถูกป้อนเข้าวงจรขยายที่มีการตอบสนองสูง การวัดด้วยออสซิลอสโคปสามารถปรับเปลี่ยนแบนด์วิทของสโคปให้เข้ากับแบนด์วิทของแหล่งจ่ายแสงได้ เพื่อให้ได้อัตรา S/N สูงที่สุด ซึ่งการประยุกต์ใช้งานแบบนี้ โฟโตไดโอดจะถูกไบอัสย้อนกลับค่าสูง โฟโตไดโอดจะถูกต่อเข้ากับอินพุทของออสซิลอสโคปอนุกรมกับตัวต้านทาน และต่อลงกราวด์



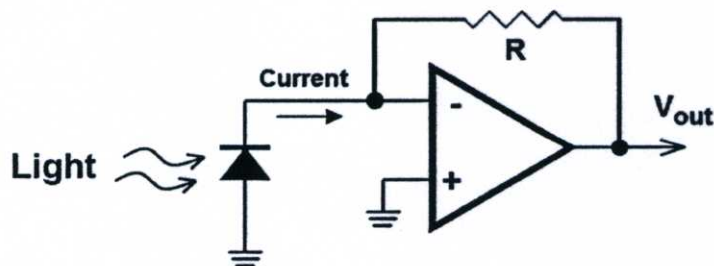
รูปที่ 2.29 วงจรตัวอย่างการใช้งานโหมดโฟโตคอนดักทีฟ ที่มีการตอบสนองความเร็วสูง หรือใช้กับแสงพลังงานสูง

การประยุกต์ใช้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์เพื่อสร้าง 2 หรือ 3 มิติ เช่น ในเครื่อง CT scanner จะนิยมต่อใช้งานโฟโตไดโอดโหมดโฟโตคอนดักทีฟ เนื่องจากโดยปกติแล้ว สารกึ่งตัวนำประเภทซิลิคอนตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ได้ต่ำ ดังนั้นจึงต้องมีการไบอัสเพื่อเพิ่มขีดความสามารถในการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

2.8.2 โหมดโฟโตโวลตาอิก

การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลตาอิก จะไม่มีการจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้ให้รอยต่อพี-เอ็น เนื่องจากไม่มีการจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ไดโอด ดังนั้นทำให้เวลาสนามไฟฟ้าภายในจะมีค่าน้อยและค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อจะมีค่ามาก เมื่อเทียบกับโหมดโฟโตคอนดักทีฟ

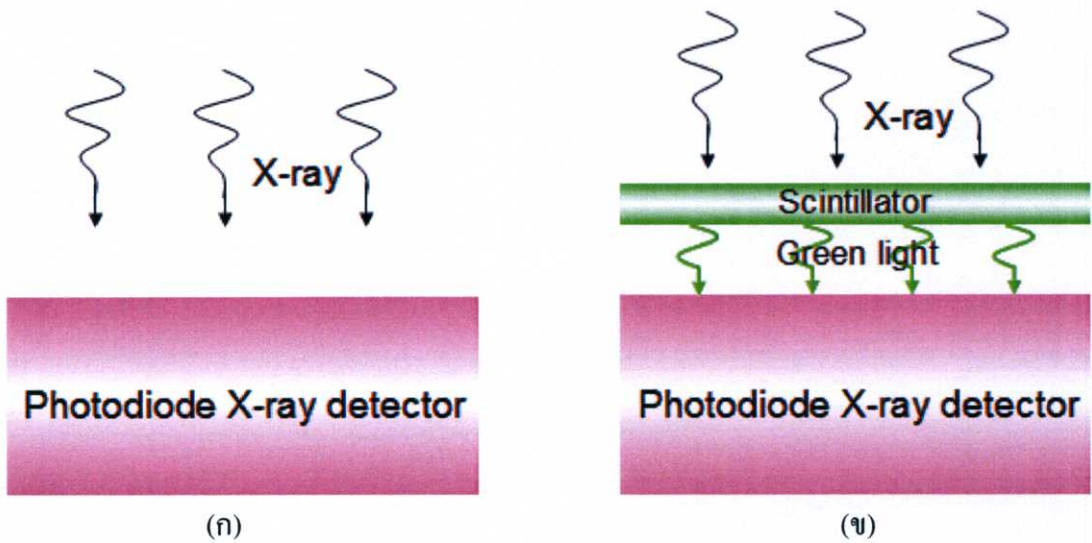
ในการใช้งานในโหมดโฟโตโวลตาอิกนี้ จะเป็นการประยุกต์การใช้งานโฟโตไดโอดที่เน้นความเที่ยงตรงมากกว่าความเร็ว เนื่องจากการทำงานในโหมดนี้ไม่ต้องจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่โฟโตไดโอดทำให้ไม่มีกระแสมืดจึงทำให้ signal to noise ratio (SNR) ของโฟโตไดโอดสูงกว่าการทำงานในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ นอกจากนี้ยังให้เอาท์พุตที่เป็นเชิงเส้นอีกด้วย แต่อย่างไรก็ตาม โหมดโฟโตโวลตาอิกนี้ ความเร็วการตอบสนองจะไม่สูงมาก การทำงานในโหมดโฟโตโวลตาอิกของโฟโตไดโอดแสดงในรูปที่ 2.30



รูปที่ 2.30 การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลตาอิก

2.9 วิธีการตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์

การตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์นั้น มีวิธีการตรวจจ็ับ 2 วิธี [16] คือ 1.) วิธีการตรวจจ็ับโดยตรง (direct exposure method) เป็นการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์โดยตรง ในกรณีนี้คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้น จะเกิดจากการที่ตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์ดูดกลืนพลังงานจากรังสีเอ็กซ์โดยตรง 2.) วิธีการตรวจจ็ับโดยอ้อม (indirect method) เป็นการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์โดยผ่านชั้นสารเรืองแสง [17] (scintillator) ชั้นสารเรืองแสงนี้เมื่อได้รับรังสีเอ็กซ์จะมีการเรืองแสงในย่านความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็นได้ และตกกระทบพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นในกรณีนี้ คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นจะเกิดจากการที่ตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์ดูดกลืนแสงย่านความยาวคลื่นของแสงที่ตามองเห็นได้แทนการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 และตารางที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารเรืองแสงประเภทต่างๆ



รูปที่ 2.31 กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง (ก) วิธีการตรวจจ็ับโดยตรง (ข) วิธีการตรวจจ็ับโดยอ้อม

เมื่อเปรียบเทียบการตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงและแบบโดยอ้อมผ่านสารเรืองแสง ในกรณีการตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อม ซิลิคอน โฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่ากรณีการตรวจจ็ับรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรง เนื่องจากซิลิคอนสามารถตอบสนองความยาวคลื่นช่วงแสงที่ตามองเห็นได้ดีกว่าความยาวคลื่นของรังสีเอ็กซ์นั่นเอง

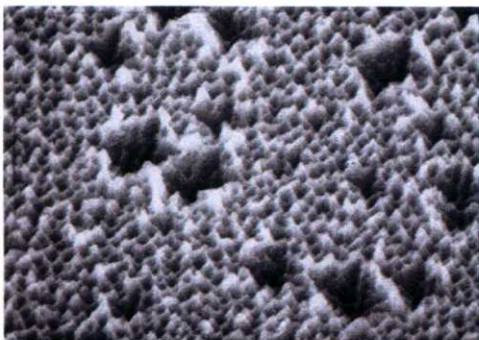
สารเรืองแสงนั้นมีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีคุณสมบัติทางฟิสิกส์แตกต่างกันออกไป แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของสารเรืองแสงประเภทต่างๆ [18]

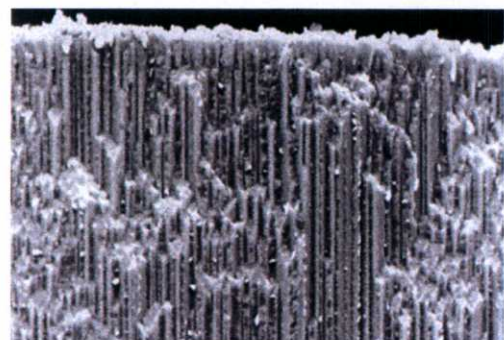
คุณสมบัติทางฟิสิกส์	ชนิดสารเรืองแสง		
	NE102A	Gd5O5S:Tb	CsI:Tl
density (g/cm ³)	1.032	7.3	4.5
$Z_{\text{eff}}/A_{\text{eff}}$	0.5	0.41	0.42
eff. excitation potential (eV)	6.5×10^1	4.9×10^2	5.5×10^2
scintillation eff (%)	6.3	18	9.2
light escape fraction (%)	95	22	22
peak wavelength (nm)	423	544	580
energy per photon (eV)	2.29	2.24	2.14
light decay time (μs)	0.0024	2.4	1
effective thickness (mg/cm ²)	25	33.7	45

2.10 พอร์ซซิลิคอน

พอร์ซซิลิคอน (porous silicon : PS) มาจากคำว่า พอร์ซ (porous) ที่หมายถึง รูพรุน รวมกับคำว่า ซิลิคอน (silicon) ซึ่งเป็นธาตุของแข็ง ใช้อธิบายผลึกขนาดระดับนาโนเมตรของซิลิคอน (nanocrystallites silicon) ที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีลักษณะที่แข็ง และเปราะ โครงสร้างระดับนาโนนี้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยลักษณะแท่ง (columnar) หรือ ทรงกลม (dots or sphere) หรือ ลักษณะผสมของทั้งสองส่วน ซึ่งมีลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy skeleton) [19] จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าว จึงเรียกผลึกระดับนาโนเมตรของซิลิคอนนี้ว่า พอร์ซซิลิคอน ลักษณะผิวหน้า และภาคตัดขวางแสดงได้ดังรูปที่ 2.32



(ก)



(ข)

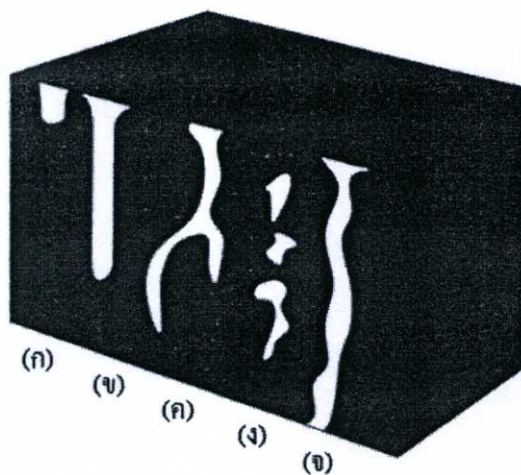
รูปที่ 2.32 ภาพถ่ายพอร์ซซิลิคอน (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง

2.10.1 ประเภทของพอร์สซิติคอน

เนื่องจากโครงสร้างของชั้นพอร์สซิติคอน จะประกอบไปด้วยรูพรุนขนาดเล็กหลายลักษณะแทรกตัวอยู่ระหว่างเนื้อซิติคอน ทำให้การแบ่งประเภทของพอร์สซิติคอนสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทตามลักษณะของรูพรุน คือ แบ่งตามลักษณะของรูพรุน (pore type) แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (pore shape) และแบ่งตามขนาดของรูพรุน (pore size) [20]

ประเภทของพอร์สซิติคอนเมื่อแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (pore type) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.33 คือ

1. ลักษณะหลุมตัน (blind or saccate) เกิดขึ้นในกรณีที่ชั้นพอร์สซิติคอนมีความบางมาก ๆ เหมือนเป็นฟิล์มบาง [21]
2. ลักษณะถุง (dead-end or saccate) ลักษณะรูพรุนคล้ายถุง โดยก้นถุงจะเป็นทางตัน คล้ายกับลักษณะหลุมตัน แต่จะมีความลึกที่มากกว่า
3. ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (interconnected or branched) รูพรุนมีลักษณะแตกกิ่งก้านและเชื่อมต่อถึงกันคล้ายรากไม้ที่มีรากฝอยกระจายทั่วไป
4. ลักษณะโพรงปิด (totally isolated or close) เหมือนมีโพรงอากาศแทรกอยู่ในเนื้อซิติคอนจำนวนมาก [22-23]
5. ลักษณะทะลุ (through pores) รูพรุนจะเปิดที่ปลายทั้งสองด้าน จะพบลักษณะนี้ในโครงสร้างแบบเมมเบรน (membrane) ที่มีการกัดแบบนาน ๆ ให้อรูพรุนทะลุเนื้อซิติคอนอีกด้านหนึ่ง [24]

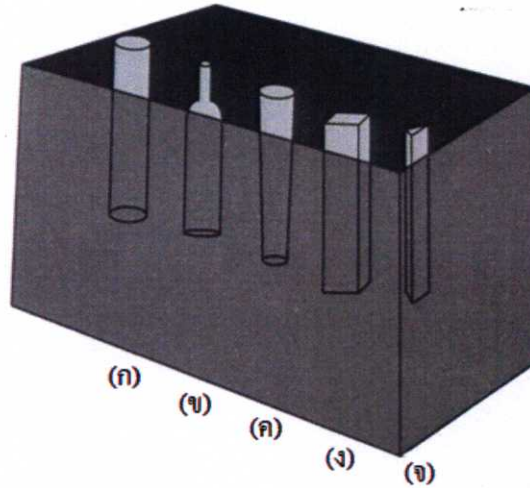


รูปที่ 2.33 ประเภทของพอร์สซิติคอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (ก) ลักษณะหลุมตัน

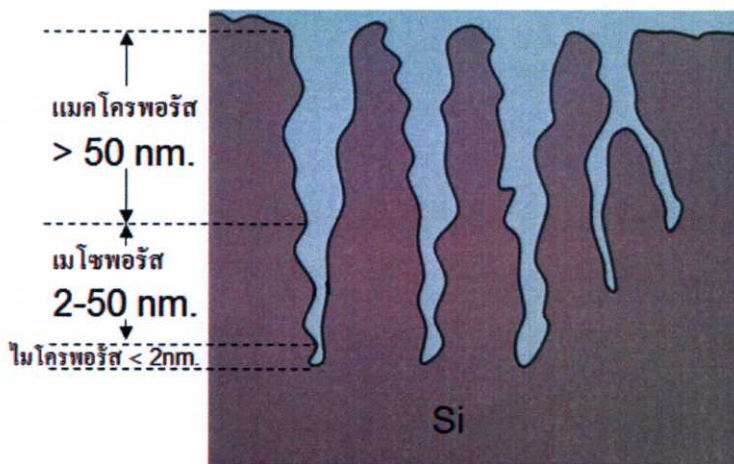
(ข) ลักษณะถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (ง) ลักษณะโพรงปิด (จ) ลักษณะทะลุ [25]

ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามรูปทรงของรูพรุน (pore shape) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปทรง ดังรูปที่ 2.34 คือ

1. ทรงกระบอก (cylindrical)
2. ทรงขวดหมึก (ink-bottle) [26-27]
3. ทรงกรวย (funnel)
4. ทรงลูกบาศก์ (cuboid or slit) [28]
5. ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด (triangular or pyramidal)



รูปที่ 2.34 ประเภทของพอร์สซิลิคอนแบ่งตามรูปทรงของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงขวดหมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (ค) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด



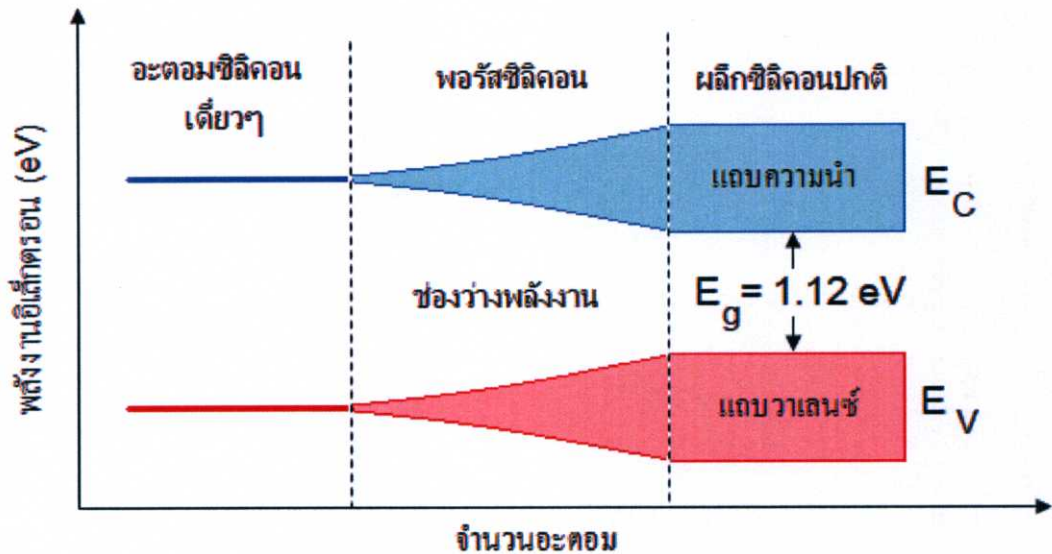
รูปที่ 2.35 ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน

ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน (pore size) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด [29] แสดงดังรูปที่ 2.35 คือ

1. ไมโครพอร์ส (microporous) มีขนาดความกว้างของหลุม (pore width) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 นาโนเมตร โดยชั้นไมโครพอร์สนี้จะมีโครงสร้างที่ติดกับเนื้อของซิลิคอน
2. เมโซพอร์ส (mesoporous) มีขนาดความกว้างของหลุม ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมโครพอร์ส (macroporous) มีขนาดความกว้างของหลุม มากกว่า 50 นาโนเมตร

2.10.2 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิคอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงาน ในอะตอมให้เกิดการแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการดังกล่าวถ้าสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะไม่มีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิคอนเดิม



รูปที่ 2.36 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่าง ๆ [30]

จากรูปที่ 2.36 พบว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้น สามารถทำได้โดยการลด หรือบีบขนาด โครงสร้างของผลึกซิลิคอน ให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตร จนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม อันจะมีผลทำให้ลักษณะ โครงสร้างทางช่องว่างพลังงาน มีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (quantum confinement effect)

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็ก ๆ เหล่านี้ จะเสมือนถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัด ไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้โดยอิสระในแบบ 3 มิติเหมือนในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้า และคุณสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบ หรือบังคับด้วยลักษณะ และขนาดของโครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ ควอนตัมไซค์เอฟเฟค (quantum size effect) หรือควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (quantum confinement effect) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ด้วยกัน คือ

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

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

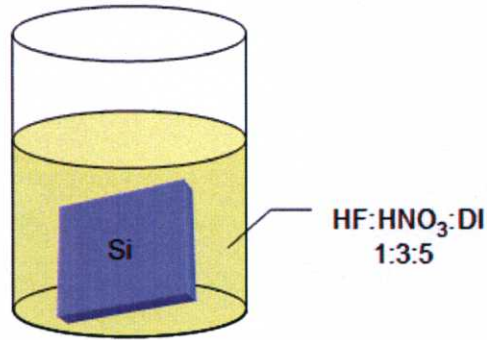
2.10.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน

กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน สามารถสร้างได้ด้วยกันหลายวิธี เช่น วิธีการสลายตัวของแก๊สไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ วิธีการสลายตัวของแก๊สไซเรนด้วยแสงเลเซอร์ วิธีการจากคลื่นความถี่สูง วิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี วิธีการกัดข้อมลีส แต่วิธีการสร้างชั้นพอร์สที่ง่ายที่สุด และประหยัดที่สุด คือวิธีการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมลีส

2.10.3.1 วิธีการกัดข้อมลีส (stain etching)

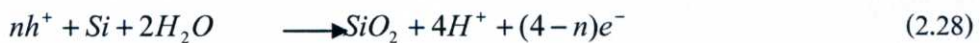
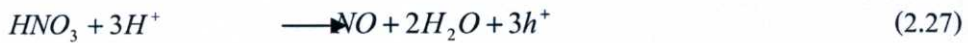
การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมลีส (stain etching) เริ่มมีการนำมาใช้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1960 [2] โดยทั่วไป การกัดข้อมลีสผลึกซิลิคอนเพื่อสร้างชั้นพอร์ส สามารถทำได้ง่ายด้วยการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายซึ่งประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริก (HF 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO_3 60 wt.%) และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ [31] นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้แสงสว่างเพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในขณะที่ทำการกัดด้วยดังรูปที่ 2.37

โดยปฏิกิริยาเคมี เริ่มต้นจากกรดไนตริก (HNO_3) ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เกิดเป็นไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO), น้ำ และไฮล (h^+) ดังสมการที่ (2.27) ซึ่งไฮลที่เกิดขึ้นนี้จะทำปฏิกิริยากับซิลิคอนและน้ำ เกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์, ไฮโดรเจนไอออน และอิเล็กตรอน ดังสมการที่ (2.28) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยา



รูปที่ 2.37 การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมล

กับกรดไฮโดรฟลูออริก ได้เป็น H_2SiF_6 ดังสมการที่ (2.29) จากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเองไปเรื่อยๆนี้เอง ทำให้เนื้อซิลิคอนบางส่วนถูกละลายออกไป และมีรูพรุนขนาดเล็กๆเกิดขึ้น กลายเป็นชั้นพอร์สซิลิคอน มองเห็นเป็นสีต่างๆปรากฏขึ้น ปฏิกิริยาเคมีรวมแสดงดังสมการที่ (2.30)



ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยาเคมี มีสีสันเปลี่ยนไป ในรูปแบบที่คล้ายวงเวินสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์แทรกสอดของคลื่นแสง และความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น วงรอบการเปลี่ยนสีจากน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ (หลายๆครั้ง) ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 μm . ถึงประมาณ 1.5 μm . เป็นต้น นอกจากนี้ในกระบวนการกัดข้อมลนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการบ่มสารละลายไฮโดรฟลูออริกพร้อมกับกรดไนตริก ก่อนที่จะนำไปสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน ซึ่งเรียกช่วงเวลาดังกล่าวว่า ช่วงการบ่มสารละลาย (incubation period)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมลคือ

1.) อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริก จะมีผลอย่างมากต่อการเกิดโฮล ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์สขึ้น

2.) ชนิดของสารเจือและ ค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์สมีผลอย่างมากต่อการเหนี่ยวนำ (induction time) ให้เกิดชั้นพอร์สโดยตรง เนื่องจากชั้นพอร์สต้องอาศัยโฮลในการเกิดปฏิกิริยาเคมี ดังนั้น ในกรณีซิลิคอนชนิดพีจะมีเวลาเหนี่ยวนำจะน้อยกว่าซิลิคอนชนิดเอ็น ที่ค่าสภาพความต้านทานเท่ากัน

3.) สภาพแผ่นผลึกของซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างพอร์สซิลิคอน มีการทดลองกับแผ่นผลึกซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป แผ่นผลึกซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส และอัลลอยด์ของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($\text{Si}_{1-x}\text{Ge}_x$) ที่สร้างจากกระบวนการอพิแทกซ์ เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมลึ พบว่า การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว และแผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป สามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) ได้ แต่พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นผลึกซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัสกลับไม่แสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ส่วนกรณีอัลลอยด์ของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียมพบว่า การเพิ่มอัตราส่วนของเจอร์เมเนียม จะทำให้ความเข้มแสงจากการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลงขณะที่ความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4.) การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำให้ปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายเกิดการทำให้ปฏิกิริยาที่ทำให้โครงสร้างชั้นพอร์สมีความเป็นระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สที่มีความหนามากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างชั้นพอร์สโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย

2.10.4 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่างคือ

1.) คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์สซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีลักษณะที่แข็ง เปราะ และมีรูพรุนมากมาย มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง

2.) คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์สซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าซิลิคอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิคอน และสามารถสร้างเป็นสารไดอิเล็กทริก (dielectric) ได้ พอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหต่ำกว่าซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติอิเล็กโตรลูมิเนสเซนซ์ (electroluminescence) หรือคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์

คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอนเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างนั่นเอง ทำให้พอร์สซิลิคอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆมากมาย เช่น เซลล์แสงอาทิตย์ [32] ตัวตรวจจับแก๊สและความชื้น [33] เป็นต้น

2.10.5 ศักยภาพของพอร์สซิลิคอน

เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติหลายอย่างที่โดดเด่น และมีคุณสมบัติทางวัสดุที่น่าสนใจซึ่งแตกต่างอย่างชัดเจนกับซิลิคอนทั่วไป ทำให้พอร์สซิลิคอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย และถูกคาดหวังว่าจะเป็นตัวทำให้เทคโนโลยีของซิลิคอนมีความสมบูรณ์ขึ้นในอนาคต โดยธรรมชาติพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าในชั้นสารซิลิคอน ดังนั้นจึงสามารถนำมาประยุกต์สร้างอยู่บนพื้นที่รับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ หรือซิลิคอนโฟโตไดโอด ได้

ซึ่งฟิล์มบางของพอร์สซิติคอนมีค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับค่าความพรุนซึ่งอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 1.25-3 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในช่วงกว้าง

ศักยภาพของพอร์สซิติคอนในการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ หรือซิติคอนโฟโตไดโอดประกอบด้วย

1.) การสะท้อนแสง (integrated reflectance) โครงสร้างที่เป็นพื้นผิวขรุขระอย่างมากของพอร์สซิติคอน จะช่วยเพิ่มพื้นที่การรับแสง (light trapping) ชั้นพอร์สซิติคอนที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนนั้น นอกจากจะมีการสะท้อนแสงที่น้อยกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในการกัดผิวหน้าของผลึกซิติคอนระนาบ (100) แล้ว การกัดผิวหน้าด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะสามารถกระทำได้เฉพาะกับผลึกรูปเดี่ยวของซิติคอนที่มีระนาบ (100) เท่านั้น แต่ในขณะที่พอร์สซิติคอนสามารถสร้างได้ในผิวหน้าของผลึกรูปเดี่ยวของซิติคอนไม่ว่าระนาบใดก็ได้ หรือในผลึกหลายรูปของซิติคอนก็ตาม อีกทั้งยังคิดว่าการใช้ซิติคอนไดออกไซด์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ซึ่งนิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิติคอน และเมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของพอร์สซิติคอนที่สร้างบนผลึกหลายรูปของซิติคอนกับชั้นลดการสะท้อนแสงแบบอื่นๆพบว่า การสร้างพอร์สซิติคอนที่ผิวหน้าของผลึกซิติคอนจะมีการสะท้อนแสงเทียบได้กับวิธีการกัดผิวหน้าวิธีอื่นๆที่มีความซับซ้อนมากกว่า นอกจากนี้พอร์สซิติคอนสามารถสร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อน มีข้อจำกัดน้อย และยังมีราคาถูกกว่าการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงที่ซับซ้อนมาก

2.) คุณสมบัติการดูดกลืนแสง (absorption property) และคุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซิติคอน (light-emission property) สามารถปรับแต่งได้ในช่วงที่กว้าง และเนื่องจากขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงาน (band gap) ในพอร์สซิติคอนสามารถปรับได้จึงมีความเหมาะสมในการหาจุดสมดุลสำหรับการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นค่าต่างๆ เนื่องจากซิติคอนสามารถตอบสนองทางแสงอย่างมากในช่วงคลื่นความยาว 400 – 1,000 nm. ซึ่งขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานของชั้นดูดกลืนแสงประมาณ 1.12 eV ซึ่งขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานนี้อยู่ในช่วงของขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานในซิติคอน จึงทำให้พอร์สซิติคอนเป็นวัสดุที่มีความเหมาะสมมากในการสร้างอยู่บนชั้นรับแสง

3.) คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิติคอนจะช่วยเปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ต (ultraviolet) และ แสงสีน้ำเงิน (blue light) ให้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพให้กับซิติคอนโฟโตไดโอด

4.) พอร์สซิติคอนที่ถูกสร้างขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นผลึกซิติคอนที่ปลูกด้วยวิธีโซคราสกี (Czochralski-grown) จะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวรับอะตอมแปลกปลอมภายนอก หรืออีกนัยหนึ่ง คือ เป็นศูนย์กลางของสิ่งแปลกปลอมที่มารวมกันขณะทำการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงไม่แพร่กระจาย ซึ่งคุณสมบัตินี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อซิติคอนโฟโตไดโอด เพราะการสร้าง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดจากผลึกซิลิคอนให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นมีหลายขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง

2.10.5.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนกับซิลิคอนโฟโตไดโอด

เมื่อไม่นานมานี้ได้มีรายงานการประยุกต์ใช้พอร์สซิลิคอนสร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ [2] พบว่าเมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์แบบปกติที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน พบว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง มีกระแสลัดวงจร (I_{sc}) กำลังงานสูงสุด (P_m) และประสิทธิภาพการแปลงพลังงาน (η) สูงกว่าเซลล์แสงอาทิตย์แบบธรรมดาที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

นอกจากการประยุกต์ใช้พอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์แล้ว ยังมีรายงานการใช้พอร์สซิลิคอนในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบพลาสมา [3] อีกด้วย ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบซิลิคอนในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ และแบบพอร์สซิลิคอน พบว่าซิลิคอนในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอนสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าซิลิคอนในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งกระแสแสงเพิ่มขึ้น 10-30 % เมื่อตรวจจับแสงจากหลอดฮาโลเจน และเมื่อตรวจจับแสงอัลตราไวโอเล็ต กระแสแสงเพิ่มขึ้นมากกว่า 115%

2.10.5.2 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

จากที่กล่าวมาพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติโดดเด่นในหลายๆด้าน เช่น ธรรมชาติการหักเหต่ำ คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ และคุณสมบัติการดูดกลืนแสง เมื่อพิจารณาคุณสมบัติต่างๆของพอร์สซิลิคอน แม้ว่าพอร์สซิลิคอนจะมีคุณสมบัติเหมาะสมกับการตรวจจับแสง แต่คุณสมบัติการดูดกลืนแสง หรือการดูดกลืนโฟตอน สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างชั้นพอร์สที่อยู่บนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แทนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์ได้

จากที่กล่าวมา การที่พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติในการดูดกลืนโฟตอนสูง เนื่องจากจากลักษณะทางกายภาพของพอร์สซิลิคอนที่มีโครงสร้างมีรูพรุนมากมาย ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง (มากกว่า $500 \text{ m}^2/\text{cm}^3$) ทำให้โฟตอนนั้นสามารถถูกดูดกลืนได้มากกว่ากรณีของซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีพื้นผิวเรียบ นอกจากนี้ยังมีรายงานถึงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนต่อรังสีเอ็กซ์ด้วย ซึ่งรังสีเอ็กซ์ที่พลังงานต่ำกว่า 1.2 kV จะสามารถทำให้พอร์สซิลิคอนสามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ได้ ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดให้สูงขึ้นไปอีก เนื่องจากซิลิคอนสามารถตอบสนองแสงที่ตามองเห็นได้ (visible light) ดีกว่ารังสีเอ็กซ์

บทที่ 3

กระบวนการสร้าง การออกแบบ และการทดลอง

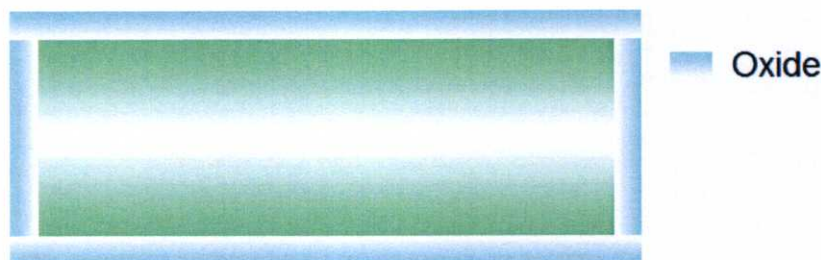
การออกแบบ (layout design) และการสร้างโฟโตมาสก์ (photomask) เป็นสิ่งสำคัญอันดับแรกในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด เนื่องจากขนาดและความซับซ้อนของอุปกรณ์ทั้งหมดต้องถูกกำหนดโดยการออกแบบ จากนั้นลวดลายที่ต้องการจะต้องถูกนำมาถ่ายทอดลงบนโฟโตมาสก์ เพื่อใช้โฟโตมาสก์เป็นต้นแบบการสร้างลวดลายบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography) ต่อไป ในบทนี้ จะกล่าวถึงเทคโนโลยีที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN การออกแบบลวดลายพารามิเตอร์ต่าง ๆ และกระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ในตอนท้ายจะกล่าวถึงวิธีการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติการทำงานตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์

3.1 เทคโนโลยีการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐาน 5 กระบวนการ คือ ออกซิเดชัน กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี การแพร่สารเจือ สร้างชั้นโลหะ และซินเตอร์ริง ซึ่งรายละเอียดแต่ละกระบวนการมีดังนี้

3.1.1 กระบวนการออกซิเดชัน

ภายหลังจากขั้นตอนการทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จึงนำมาสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ขึ้นปกคลุมทั้งด้านหน้าและด้านหลังของแผ่น ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางของแผ่นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผ่านกระบวนการออกซิเดชัน

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จะเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เพื่อวัตถุประสงค์หลัก 2 อย่าง คือ เพื่อเป็นหน้ากากป้องกันการแพร่ (diffusion mask) ใช้ขั้นตอน

การแพร่ชั้นสารเจือ และเพื่อป้องกันผิวหน้าแผ่นซิลิคอนเพื่อป้องกันอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เพื่อวัตถุประสงค์ดังกล่าว จะใช้เตาที่มีปลายเปิดด้านเดียวดังรูปที่ 3.2



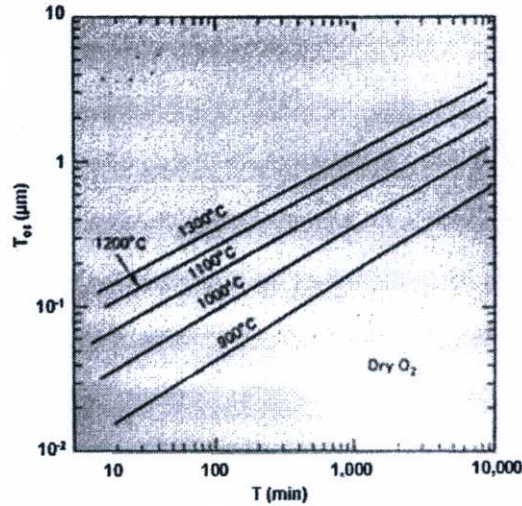
รูปที่ 3.2 เตาสำหรับการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

โดยทั่วไปจะมีความหนาอยู่ในช่วง 5,000 – 10,000 Å กระบวนการสร้างชั้นออกไซด์หนา นี้จะเรียกว่า กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน (thermal oxidation process) โดยการให้แผ่นซิลิคอนทำปฏิกิริยากับออกซิเจน (O_2) หรือบรรยากาศที่มีไอน้ำ (O_2+H_2O) ที่อุณหภูมิในช่วง 900 ถึง 1,150 °C ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นบนผิวหน้าซิลิคอน เป็นดังนี้



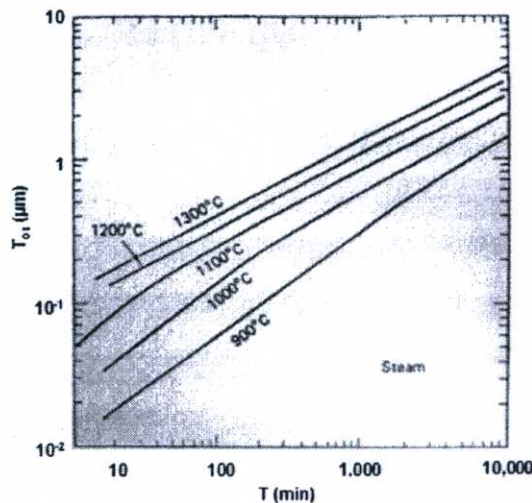
กระบวนการออกซิเดชันด้วยความร้อน ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. การออกซิเดชันแบบแห้ง (dry oxidation) เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์ปราศจากสารอื่นเจือปน ที่อุณหภูมิสูงในช่วง 900 ถึง 1,150 °C จะทำให้อุณหภูมิของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ดังในสมการที่ (3.1) ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้โดยวิธีดังกล่าวนี้ จะมีคุณสมบัติเป็นฉนวนที่ดี สำหรับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 ความสัมพันธ์ของความหนาซิลิกอนไดออกไซด์กับเวลาการออกซิเดชัน ในการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบแห้ง [38]

2. การออกซิเดชันแบบชื้น (wet oxidation) เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของผลึกซิลิกอน และอะตอมของก๊าซออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวนี้แสดงในหน้าขึ้น เนื่องจากการสร้างชั้นออกไซด์แบบชื้นจะสร้างได้เร็วกว่า และสร้างชั้นออกไซด์สมการที่ (3.2) อัตราการเกิดออกไซด์ ที่ได้จากกระบวนการแบบชื้นจะเร็วกว่าอัตราการเกิดที่ได้จากกระบวนการแบบแห้งถึง 4 เท่า เนื่องจากขนาดของโมเลกุลน้ำเล็กกว่าของโมเลกุลออกซิเจนครึ่งหนึ่ง ดังนั้น อัตราการแพร่ของโมเลกุลน้ำไปยังชั้น SiO_2 จึงมากกว่าอัตราการแพร่ของออกซิเจน



รูปที่ 3.4 ความสัมพันธ์ของความหนาซิลิกอนไดออกไซด์กับเวลาการออกซิเดชัน ในการสร้างซิลิกอนไดออกไซด์ที่อุณหภูมิต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบชื้น [38]

แม้ว่าอัตราการเกิดออกไซด์ด้วยโมเลกุลน้ำจะมากกว่าออกซิเจน แต่ออกไซด์แบบแห้งจะมีความหนาแน่นของ โครงสร้างออกไซด์สูงกว่าแบบชื้น กระบวนการออกซิเดชันทั่ว ๆ ไปจะใช้ “แห้ง-ชื้น-แห้ง” โดยเริ่มต้นการสร้างชั้นออกไซด์แบบแห้งจากนั้นจึงสร้างชั้นออกไซด์แบบชื้น เพื่อให้ชั้นออกไซด์แบบแห้งเป็นชั้นตอนสุดท้ายสำหรับความหนาของชั้นซิลิกอน ไดออกไซด์แบบชื้นสามารถพิจารณาได้จาก รูปที่3.4

3.1.2 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ภายหลังการออกซิเดชันแผ่นผลึกซิลิกอนแล้ว ชั้นของ SiO_2 จะเคลือบผิวซิลิกอนทั้งหมด เพื่อป้องกันการแพร่สารเจือเข้าไปในเนื้อซิลิกอน ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำต่าง ๆ จึงจำเป็นต้องเปิดช่องออกไซด์ออก ซึ่งเรียกว่า โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) โดยกระบวนการดังกล่าวนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่งในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจำเป็นต้องมีการเปิดช่องออกไซด์หลายครั้ง กระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีเป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากมาสก์ ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน

สำหรับขั้นตอนของกระบวนการ โฟโตลิโธกราฟีต้องการห้องสะอาดสำหรับปฏิบัติการเพื่อป้องกันฝุ่นละอองที่จะตกลงมาที่ฐานรองซิลิกอน ในขั้นตอนนี้ยาไวแสงซึ่งจะทำให้เกิดจุดเสียหายขึ้นที่ลวดลายที่ถ่ายแบบลงไป ดังนั้นห้องสะอาดจึงมีความจำเป็นมากสำหรับขบวนการโฟโตลิโธกราฟีโดยขั้นตอนของโฟโตลิโธกราฟีเริ่มต้นจากการนำแผ่นผลึกซิลิกอน ซึ่งมีชั้นซิลิกอนไดออกไซด์อยู่ที่ผิวด้านบนไปเคลือบผิวหน้าด้านด้วยน้ำยาไวแสง จากนั้นนำไปฉายแสงโดยผ่านกระจกลดลายต้นแบบเรียกว่า โฟโตมาสก์ (photo mask) ซึ่งทำหน้าที่เป็นต้นแบบ มีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจกซึ่งได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิริยาเคมีแสงที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป บางส่วนยังคงเหลืออยู่บนผิวหน้าของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกกัด หลังจากนั้นเมื่อชั้นน้ำยาไวแสงถูกลอกออกก็จะปรากฏภาพ หรือลวดลายของชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ขึ้น โดยมีลักษณะเหมือนลวดลายบนกระจกต้นแบบ การเกิดลวดลายได้ก็เพราะชั้นซิลิกอนไดออกไซด์บางส่วนถูกกัดออกไปนั่นเอง

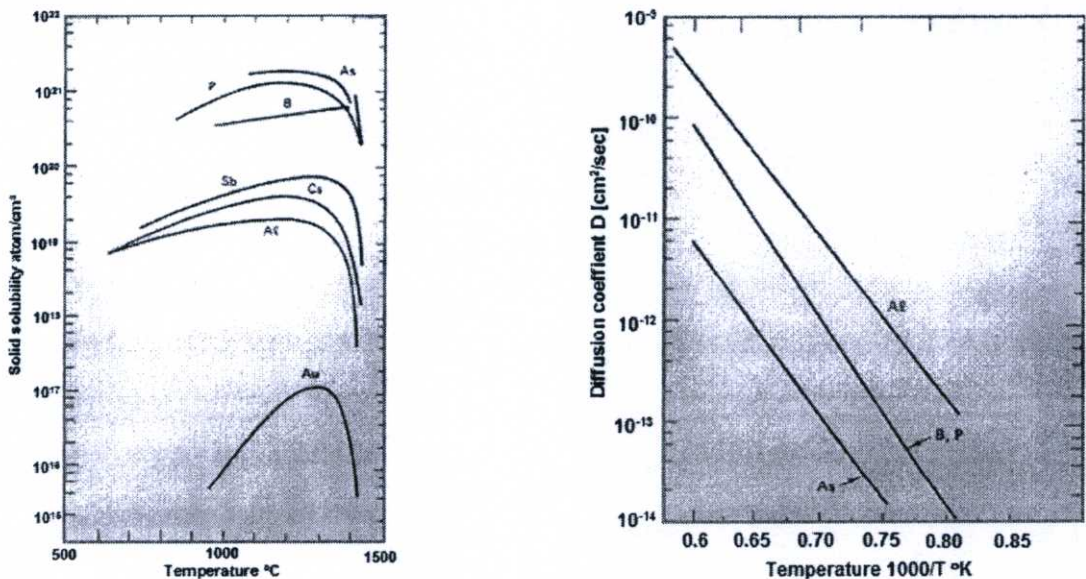
3.1.3 กระบวนการแพร่สารเจือ

กระบวนการแพร่สารเจือเป็นกระบวนการแพร่สารเจือลงในแผ่นฐานรอง ด้วยวิธีการแพร่ที่อุณหภูมิสูง ทำให้อะตอมจากแหล่งสารเจือ (source) เคลื่อนที่ไปยังผลึกแผ่นฐานรอง และถ้าความ

เข้มข้นของอะตอมของสารเจือสูงกว่าของแผ่นฐานรอง ทำให้เกิดเป็นรอยต่อพี-เอ็นขึ้น ขั้นตอนของการแพร่สารเจือ ทำให้ได้โดยการกระตุ้นแหล่งสารเจือที่อุณหภูมิสูง ทำให้เกิดเป็นบรรยากาศของสารเจือ ซึ่งแหล่งสารเจือโบรอน (boron source) ใช้ในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดพีและใช้ฟอสฟอรัสในการสร้างสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เมื่อนำแผ่นฐานรองเข้าไปยังบรรยากาศของสารเจือ อะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่ไปยังแผ่นฐานรอง และแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ความเข้มข้นของการแพร่ สำหรับเทคนิคการแพร่สารเจือกระทำสองขั้นตอน ทั้งนี้ก็เพื่ออำนวยความสะดวกในการควบคุม และแก้ไขให้การกระจายของสารเจือเป็นไปตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

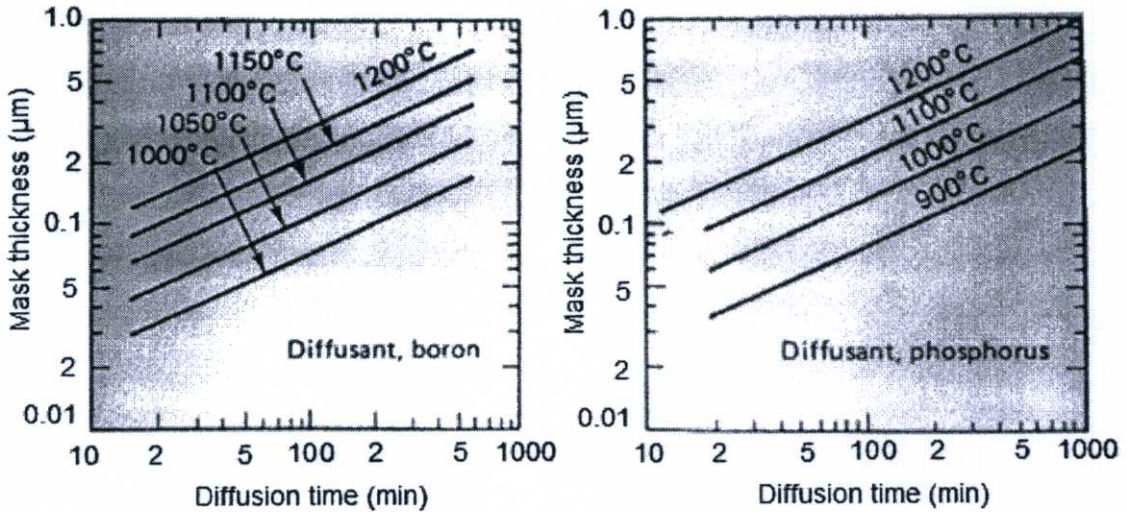
ขั้นที่ 1 การแพร่สารเจือขั้นต้น (pre-deposition)

กระบวนการ pre-deposition กระทำโดยการแพร่สารเจือในเงื่อนไขที่ว่าปริมาณจำนวนอะตอมของสารเจือที่ผิวมีค่าคงที่ตลอดไปไม่จำกัด การแพร่ขั้นนี้ทำให้ช่วงเวลาสั้นๆ และอุณหภูมิไม่สูงนักราว 1000°C การแพร่สารเจือขั้นต้นในอุณหภูมิสูง เป็นการควบคุมปริมาณสารเจือ โดยการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในการแพร่สารเจือ โดยที่อุณหภูมิหนึ่งๆ จะมีปริมาณสารเจือสูงสุดในการแพร่เข้าไปยังผลึกฐานรอง ซึ่งเรียกการกำหนดปริมาณนี้ว่า ความสามารถในการแพร่เข้าในของแข็ง (solid solubility) และปริมาณสารเจือที่ผิวผลึกฐานรองเรียกว่า ความเข้มข้นผิว (surface concentration : N_s) โดยความสัมพันธ์ของค่า solid solubility กับอุณหภูมิในการแพร่ และความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ แสดงในรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 กราฟที่ใช้ในการคำนวณปริมาณสารเจือ (ก) solid solubility ของ ธาตุต่างๆ ในซิลิคอน
(ข) กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การแพร่กับอุณหภูมิ [38]

สำหรับความสามารถในการแพร่ของสารเจือ เช่น As, P หรือ B สามารถแพร่ในชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ได้น้อยกว่าในผลึกฐานรองซิลิคอน ดังนั้นชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงถูกใช้เป็นหน้ากาก (mask) เพื่อป้องกันการแพร่ที่ผิวหน้าของผลึกฐานรอง โดยความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้พิจารณาจากอุณหภูมิ เวลา และสารเจือที่ใช้ในการแพร่ ดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ความหนาชั้น SiO₂ ที่ใช้เพื่อป้องกันการแพร่ของโบรอนและฟอสฟอรัส [38]

การกระจายอะตอมสารเจือในผลึกฐานรองซิลิคอน แสดงดังสมการ 3.3

$$N(x,t) = N_s \operatorname{erfc}(x / \sqrt{4D_p t_p}) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (3.3)$$

- ซึ่ง N_s คือ ความเข้มข้นที่ผิว (cm^{-3})
- x คือ ระยะลึกของการแพร่สารเจือจากผิว (cm)
- D_p คือ ความสามารถในการแพร่ที่อุณหภูมิการแพร่ขึ้นต้น (cm^2/sec)
- t_p คือ เวลาที่ใช้ในการแพร่ขึ้นต้น (sec)

การหาค่าความเข้มข้น $N(x,t)$ ที่ความลึก x ภายหลังจากแพร่ขึ้นต้นเป็นเวลา t_p ต้องแทนค่าตัวแปรต่าง ๆ ลงในสมการ (3.3) สิ่งที่สำคัญ 2 ประการในการแพร่ขึ้นต้น คือ ความลึกรอยต่อพี-เอ็น (X_j) ที่ได้จากการแพร่ขึ้นต้น และจำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด (Q) ภายหลังจากแพร่ ซึ่ง

$$Q = N_s \sqrt{4D_p t_p} / \pi \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (3.4)$$

ขั้นที่ 2 เรียกว่า กระบวนการ drive in

ในขั้นนี้จำนวนอะตอมสารเจือที่ผิวจะถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด (คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน) เนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1 การแพร่ขั้นนี้ทำที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรกราว 1200°C และสามารถควบคุมการกระจาย และความลึกในการแพร่ของสาร โดยควบคุมเวลาในการแพร่ นอกจากนี้ขณะที่ทำการแพร่ก็จะทำการออกซิเดชันไปพร้อมๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดชั้นของออกไซด์เคลือบที่ผิวนอกสุดของแผ่นผลึก ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือแพร่ออกมาจากแผ่นผลึก (out diffusion) ความหนาแน่นอะตอมสารเจือที่แพร่เข้าไปในแผ่นผลึกซิลิคอน แสดงได้ดังสมการ

$$N(x,t) = (Q / \sqrt{\pi D_d t_d}) \exp(-x^2 / 4D_d t_d) \quad (\text{ions/cm}^3) \quad (3.5)$$

ซึ่ง Q คือ จำนวนปริมาณสารเจือทั้งหมด (cm^{-2})
 D_d คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ในการจับลึก
 t_d คือ เวลาที่ใช้ในการจับลึก

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

$$X_j = \sqrt{4D_d t_d} \ln \left[Q / (N_B \sqrt{\pi D_d t_d}) \right] \quad (\text{cm}) \quad (3.4)$$

การคำนวณโดยอาศัยสมการการแพร่ จำเป็นต้องพิจารณา และเลือกใช้ให้ถูกกรณี ในกรณีการแพร่ขั้นที่ 1 เจือไนซขอบเขตต่างๆ เป็นไปตาม the complementary error function distribution การคำนวณหาการกระจายของอะตอมสารเจือ และในกรณีการแพร่ขั้นที่ 2 เจือไนซขอบเขตเป็นไปตามลักษณะของ gaussian distribution

3.1.4 กระบวนการเมทัลไลเซชัน

ภายหลังจากการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการแพร่สารเจือด้วยความร้อนตามลำดับขั้นตอนต่าง ๆ จนกระทั่งได้ชิ้นส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ แต่ส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์เหล่านี้จะยังคงแยกกันอยู่ในสภาพที่ยังไม่สามารถใช้งานทางไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเชื่อมต่อส่วนต่างๆ ของอุปกรณ์เข้าด้วยกันตามรูปแบบโครงสร้างที่ได้ออกแบบไว้ ซึ่งจะทำให้อุปกรณ์ทำงานตามหน้าที่ได้อย่างสมบูรณ์ ขั้นตอนการเชื่อมต่อส่วนต่าง ๆ ของอุปกรณ์ด้วยโลหะเรียกว่า กระบวนการเมทัลไลเซชัน ซึ่งกระบวนการนี้สามารถสร้างรอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ซึ่งเป็นแถบโลหะที่ใช้ในการต่อขั้วไฟฟ้า

สำหรับการเลือกโลหะที่ใช้เคลือบบนแผ่นซิลิคอน เพื่อให้เป็นรอยสัมผัสโอห์มิกหรือแถบความนำต่อเชื่อมภายใน (Interconnector) ของวงจรรวมควรมีคุณสมบัติ เช่น ทำให้รอยสัมผัสกับซิลิคอนมีค่าความต้านทานต่ำ มีความนำไฟฟ้าสูง ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์ และสามารถต่อเข้ากับลวดความนำภายนอกได้ดี ซึ่งโลหะที่นิยมใช้ ได้แก่ อะลูมิเนียม (Al) ทอง (Au) และเงิน (Ag) เป็นต้น



รูปที่ 3.7 โครงสร้างเครื่อง Filament Evaporation

เทคนิคในกระบวนการการเมทัลไลเซชัน ใช้เทคนิคการเคลือบสารในระบบสุญญากาศ ซึ่งมีเทคนิคหลายอย่างด้วยกัน แต่ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้เทคนิคการระเหยด้วยไส้ความร้อน (filament evaporation) ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย สิ้นเปลืองน้อย ไม่มีผลของการแพร่กระจายไอออน

กระบวนการเมทัลไลเซชันในระบบสุญญากาศ แสดงไว้ในรูปที่ 3.7 chamber ที่ได้แสดงไว้เป็นกรอบแก้วรูปทรงระฆังคว่ำ (bell jar) การเคลือบโลหะในระบบสุญญากาศ โดยใช้ filament evaporation เมื่อไส้ถูกทำให้ร้อนโดยการจ่ายกระแสไฟฟ้าค่าสูงไหลผ่านไส้ โดยในขณะที่ทำการเคลือบโลหะจะควบคุมให้กระแสไหลผ่านไส้ เพิ่มขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งโลหะที่วางอยู่ที่ไส้หลอมตัวเป็นของเหลวติดอยู่กับไส้ก็จะระเหยเป็นไอฟุ้งกระจายเคลือบแผ่นผลึกซิลิคอนที่วางใน chamber

3.1.5 กระบวนการซินเตอร์ริง

หลังจากทำการเคลือบโลหะอะลูมิเนียม และทำการโฟโตลิโธกราฟีแล้วอะลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นแถบตัวนำ และก่อให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มิกแต่รอยสัมผัสนี้อาจจะไม่สมบูรณ์เพียงพอ ดังนั้นกระบวนการอัลลอยจะช่วยให้อายุต่อสัมผัสระหว่างโลหะอะลูมิเนียม และซิลิคอนเป็นรอยต่อที่สมบูรณ์ การอัลลอยจะทำในเตาแพร่สารที่ตั้งอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 450-550 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน โดยใช้เวลาประมาณ 10-30 นาที ถ้าในขณะที่อัลลอยปล่อยก๊าซซึ่งมีไฮโดรเจนรวมอยู่ด้วยเข้าไปเรียกว่า การซินเตอร์ริง เป็นเพื่อช่วยให้คุณสมบัติของสิ่งประดิษฐ์ที่สร้างขึ้นมีคุณสมบัติที่ดี และไม่เปลี่ยนแปลงตามสภาพแวดล้อม

3.2 การออกแบบลวดลายโฟโตมาส์ค

การออกแบบลวดลาย ถือเป็นขั้นตอนแรกในการสร้างโฟโตมาส์ค เพื่อจัดวางตำแหน่งของลวดลายให้ถูกต้อง และลวดลายที่ได้มีความเหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ ที่มีอยู่อย่างจำกัด ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม CorelDRAW Graphics suit 14 เมื่อนำไฟล์ข้อมูลที่ออกแบบไว้ไปสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนฟิล์มแล้วนำไปติดลงบนกระจกใสจะทำให้ได้กระจกโฟโตมาส์คสำหรับการทดลอง

การออกแบบในการทดลองนี้ มีการทดลอง คือ การศึกษาพื้นฐานลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ การศึกษาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้าง PIN และ NIP ผลของระยะชั้นอินทรีนซิก ผลของพื้นที่เส้นรอบรูปต่อพื้นที่รับแสง และการศึกษาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย

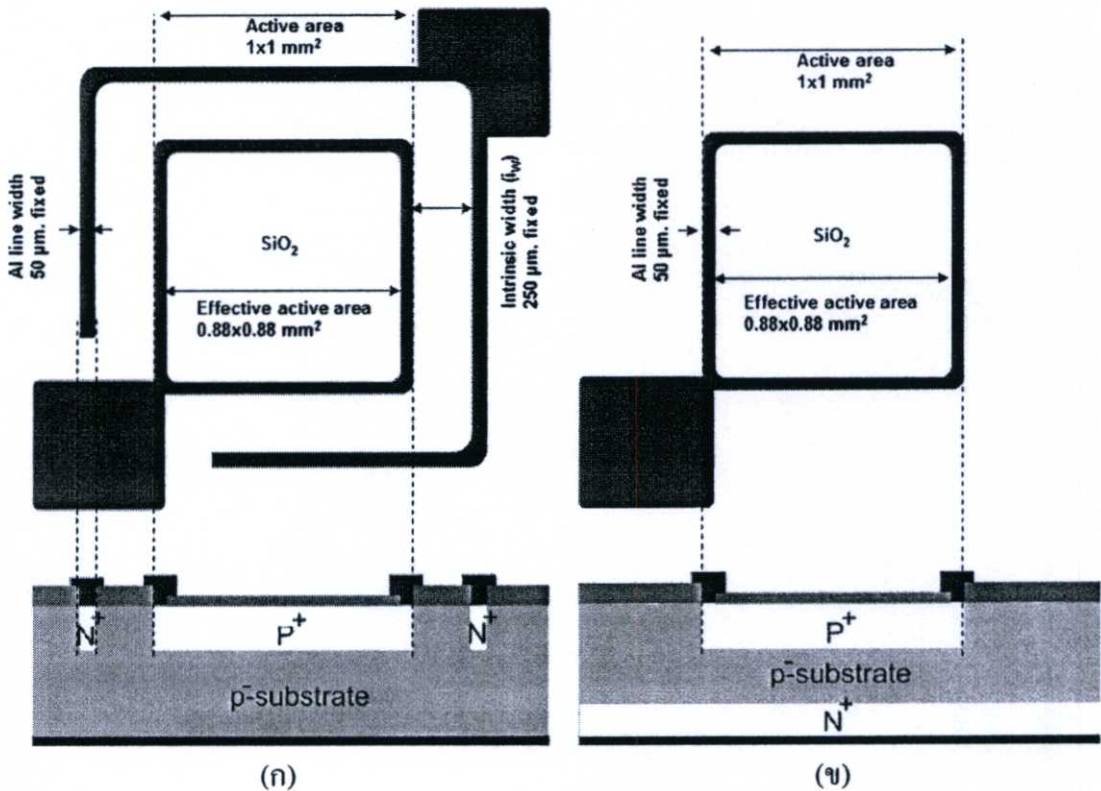
การศึกษาทั้งหมดที่กล่าวมา ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สร้างอยู่บนชั้นรับแสง ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ให้สูงขึ้น จึงได้มีการทดลองตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนบนชั้นรับรังสี เนื่องจากพอร์ซซิลิคอนมีคุณสมบัติในการดูดกลืนโฟตอนสูง ซึ่งส่งผลให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์สามารถจ่ายกระแสแสงสูงขึ้น

การเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ให้สูงขึ้นนั้น นอกจากจะสามารถทำได้โดยการเพิ่มกระแสแสงแล้ว การลดกระแสรั่วก็เป็นอีกวิธีหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสามารถทำได้โดยการสร้างชั้นกักรังสีชนิดพีเข้มข้น (P⁺ guard ring) ล้อมรอบพื้นที่รับแสง เนื่องจากโครงสร้างกักรังสีนี้ สามารถช่วยลดกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO₂ และในเนื้อสาร ซึ่งถือว่าเป็นการลดกระแสรั่วได้เป็นอย่างดี อย่างไรก็ตามแม้ว่าการสร้างชั้นกักรังสี จะสามารถช่วยลดกระแสรั่วได้ดี แต่ตำแหน่งที่จะสร้างชั้นกักรังสีนั้น ก็เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญอย่างหนึ่ง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพของกักรังสีในการลดกระแสรั่วให้สูงขึ้น

3.2.1 การออกแบบตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

กระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งออกได้เป็น 2 โครงสร้างคือ แบบแรกเป็นตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และแบบที่ 2 คือ ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง เพื่อศึกษาเพื่อศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของซิลิคอนโฟโตไดโอด เช่น ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และรังสีเอ็กซ์ ความจุไฟฟ้า การตอบสนองทางความถี่ สภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพทางควอนตัมของซิลิคอนโฟโตไดโอด เพื่อประยุกต์การใช้งานซิลิคอนโฟโตไดโอดเป็นตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ ในด้านต่างๆ

ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และโครงสร้างแนวตั้งถูกสร้างให้มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน และมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน มีระยะชั้นอินทรีนซิกคองที่ $250 \text{ }\mu\text{m}$. โดยชั้นเอ็นเข้มข้นจะมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบชั้นพีเข้มข้น ซึ่งภาคตัดขวาง และมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และโครงสร้างแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 3.8

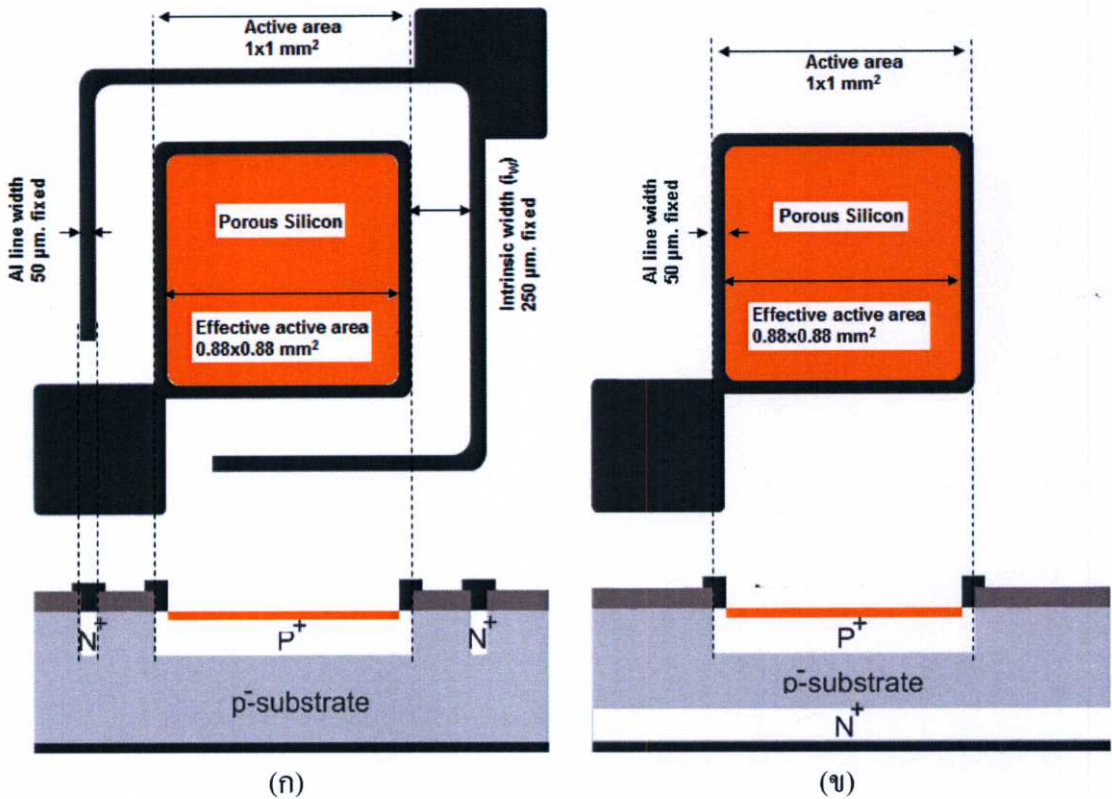


รูปที่ 3.8 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง (ก) โครงสร้างแนวนอน (ข) โครงสร้างแนวตั้ง

3.2.2 การออกแบบตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับรังสี

พอร์ซิลิคอนเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถเพิ่มกระแสแสง ทำให้ประสิทธิภาพของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์สูงขึ้น จึงได้ศึกษาผลของพอร์ซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ที่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบโครงสร้างแวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง

ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอน และโครงสร้างแนวตั้งถูกสร้างให้มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน และมีชั้นพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสง ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอน มีระยะชั้นอินทรินซิกคองที่ $250 \text{ }\mu\text{m}$. โดยชั้นเอ็นเข้มข้นจะมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบชั้นพีเข้มข้น ซึ่งภาคตัดขวาง และมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอน และโครงสร้างแนวตั้งแสดงดังรูปที่ 3.9

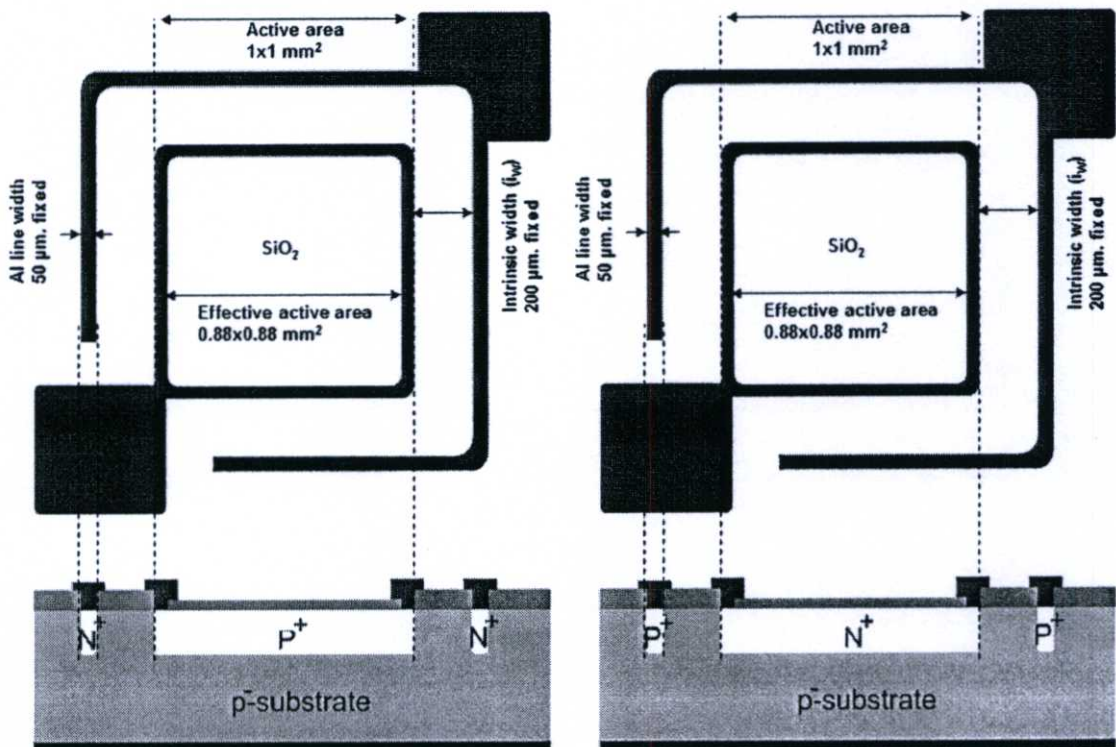


รูปที่ 3.9 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสง (ก) โครงสร้างแวนอน (ข) โครงสร้างแนวตั้ง

3.2.3 การออกแบบตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ชนิด PIN และ NIP

การออกแบบในหน้านี้ เพื่อศึกษาผลของโครงสร้าง PIN และ NIP ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า และความไวต่อการตอบสนองทางแสง และรังสีเอ็กซ์ ของซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบกับโครงสร้างแนวนอนด้วยกัน

ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP ถูกสร้างให้มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง และมีระยะชั้นอินทรินซิกคงที่ 200 μm . ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มชั้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. โดยชั้นเอ็นเข้มชั้นจะมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบชั้นพีเข้มชั้น และตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด NIP มีพื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มชั้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. โดยชั้นพีเข้มชั้นจะมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบชั้นเอ็นเข้มชั้น ซึ่งภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP แสดงดังรูปที่ 3.10

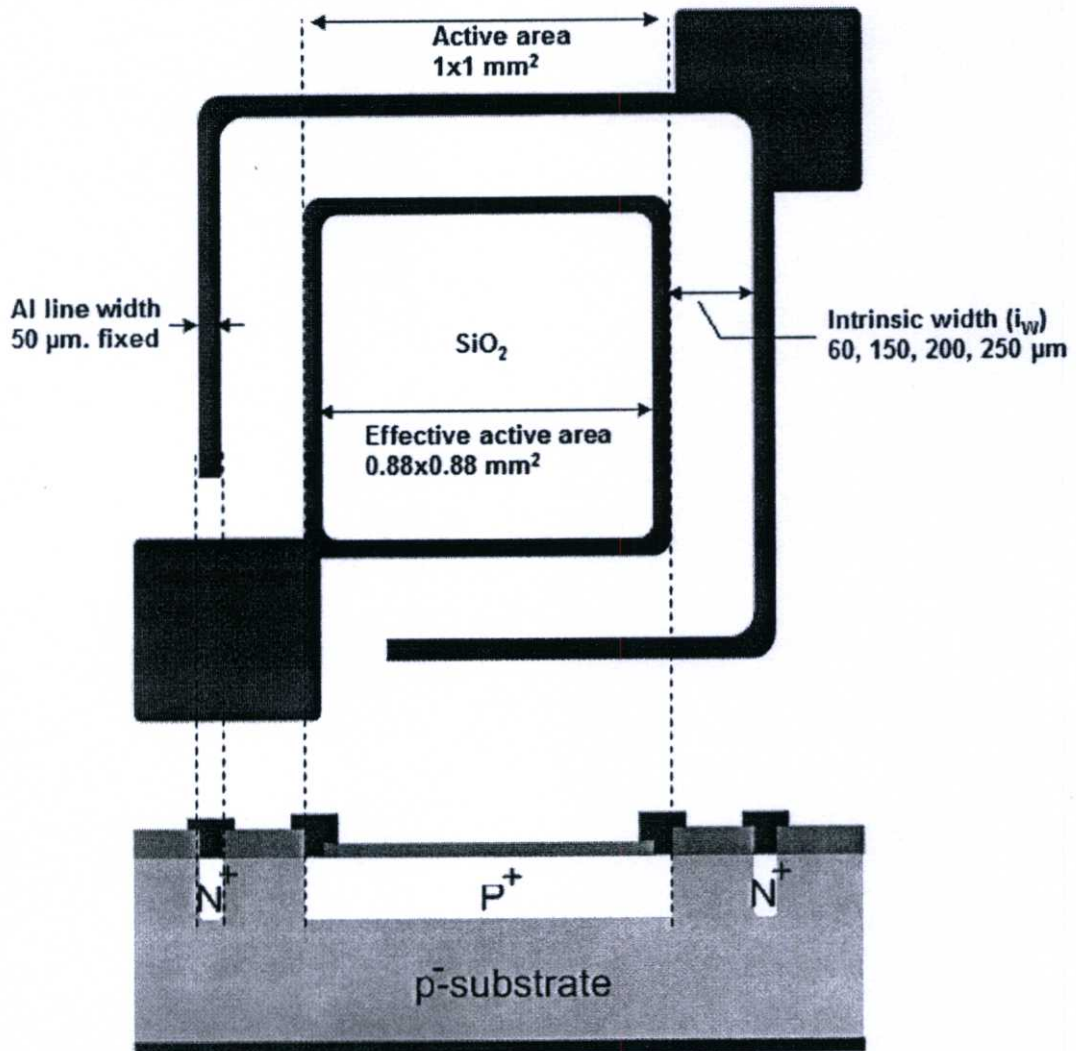


รูปที่ 3.10 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอน (ก) ชนิด PIN (ข) ชนิด NIP

3.2.4 การออกแบบตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ที่มีระยะอินทรีนซิกค่าต่างๆ

การออกแบบในหน้านี้ เพื่อศึกษาผลของระยะอินทรีนซิก ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และรังสีเอ็กซ์ ของซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบกับ โครงสร้างแนวนอนด้วยกัน

ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN ถูกสร้างให้มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มชั้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน โดยชั้นเอ็นเข้มชั้นจะมีลักษณะเป็นวงแหวนล้อมรอบชั้นพีเข้มชั้น และมีการเปลี่ยนแปลงระยะชั้นอินทรีนซิก (ระยะห่างระหว่างพื้นที่พีเข้มชั้น และเอ็นเข้มชั้น : I_w) โดยมีการเปลี่ยนแปลงระยะชั้นอินทรีนซิก (I_w) ค่าต่างๆ กัน คือ 60, 150, 200, 250 μm . ซึ่งภาคตัดขวาง และมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN ที่ระยะอินทรีนซิกค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 3.11

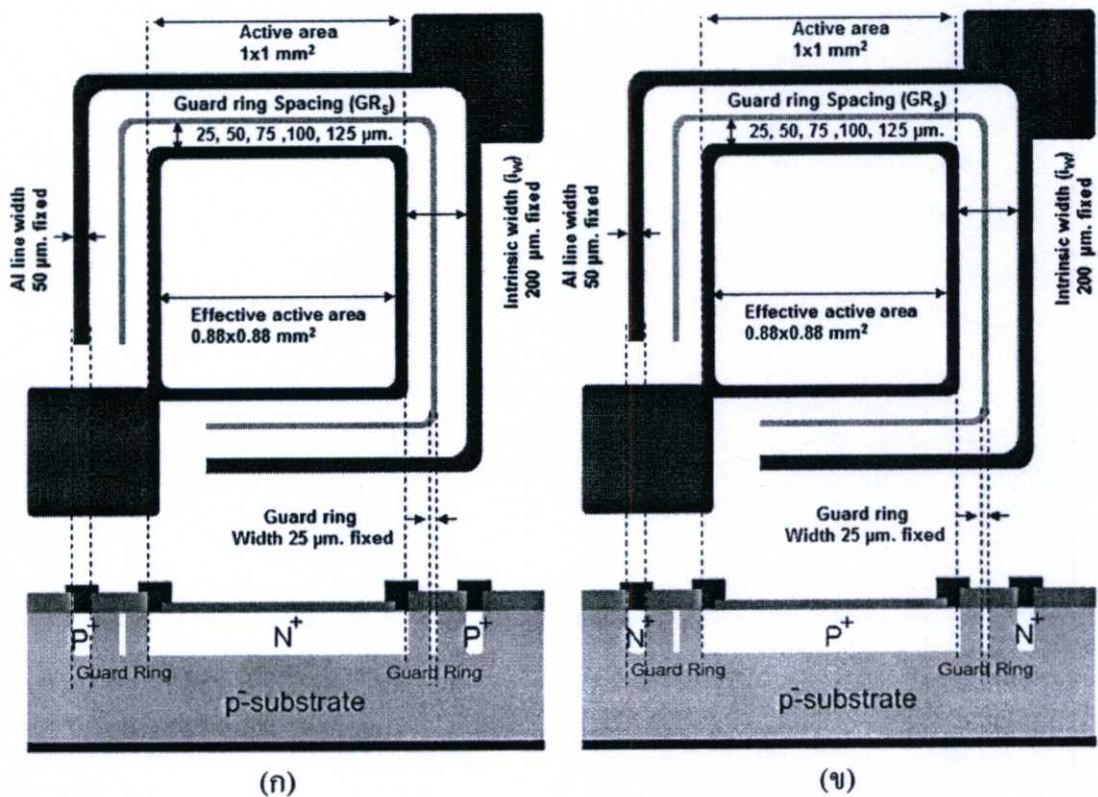


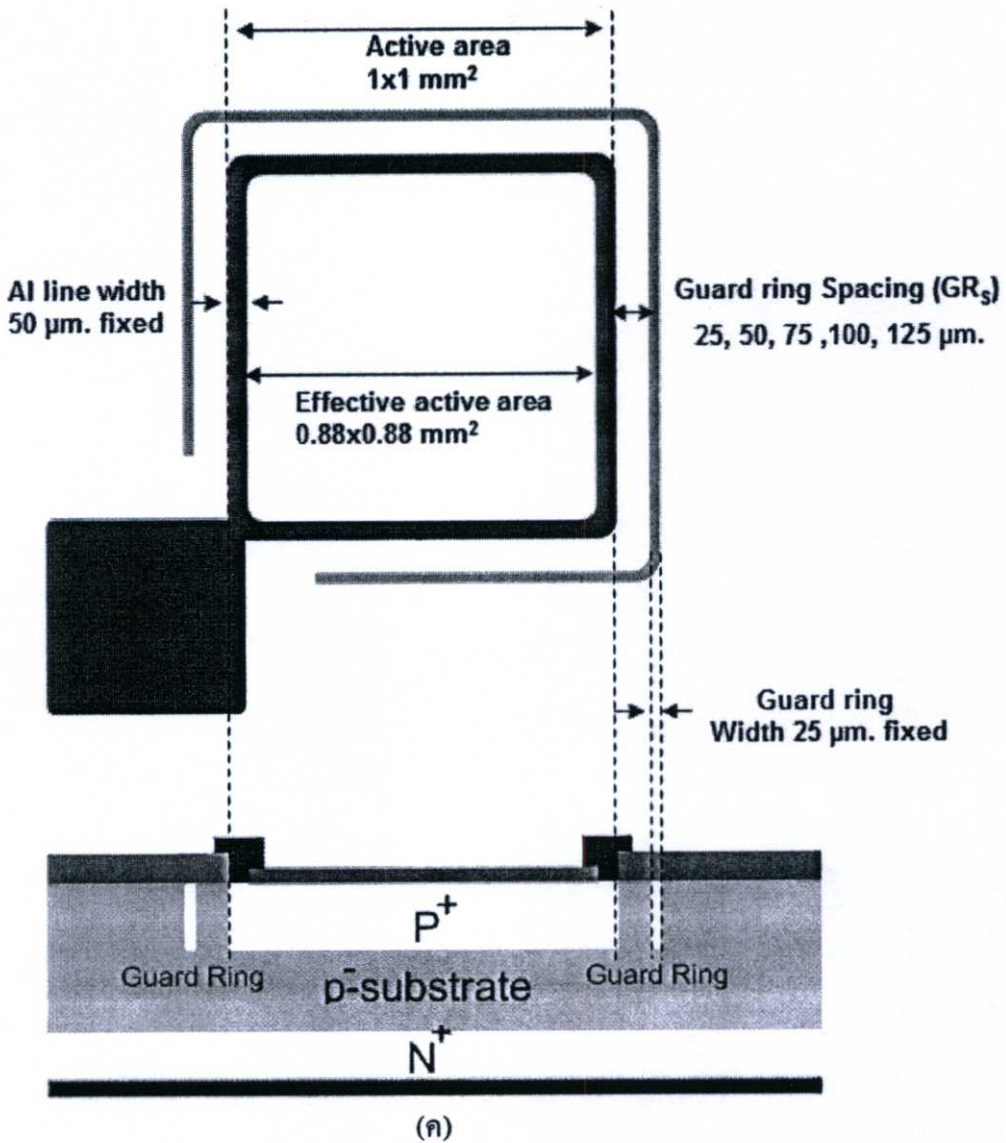
รูปที่ 3.11 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนที่มีระยะชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ

3.2.5 การออกแบบตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ที่มีชั้น P⁺ guard ring

การสร้างการ์ดริง เป็นการลดกระแสมืดเป็นอีกวิธีหนึ่ง ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ได้ จึงได้ศึกษาผลของชั้นการ์ดริงชนิดพีเข้มข้น (P⁺ guard ring) ซึ่งสร้างล้อมรอบพื้นที่รับแสง ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ทางแสง และรังสีเอ็กซ์ ของซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบ โครงสร้างแนวนอนชนิดPIN ชนิด NIP และ โครงสร้างแนวตั้งชนิด PIN

ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN ถูกสร้างให้มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้น ขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ และมีชั้นเอ็นเข้มข้นเป็นวงแหวนล้อมรอบพื้นที่รับแสงซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนชนิด NIP มีพื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มข้น ขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ และมีชั้นพีเข้มข้นเป็นวงแหวนล้อมรอบพื้นที่รับแสง ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ทั้งชนิด PIN และ NIP มีระยะชั้นอินทรินซิกคอง $200 \mu\text{m}$. และมีการ์ดริงอยู่ระหว่างพื้นที่รับแสงและวงแหวน ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้ง ชนิด PIN มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. และมีการ์ดริงล้อมรอบพื้นที่รับแสง ซึ่ง ความกว้างของการ์ดริง (GR_w) คงที่ $25 \mu\text{m}$. และตำแหน่งของการ์ดริง จะมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริง (GR_s) ค่า ต่างๆ กัน คือ $25, 50, 75, 100$ และ $125 \mu\text{m}$. ตามลำดับ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอด แบบที่มีการ์ดริง แสดงดังรูปที่ 3.12





รูปที่ 3.12 ภาคตัดขวางและมุมมองด้านบนของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด

(ก) โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN (ข) โครงสร้างแนวนอนชนิด NIP

(ค) โครงสร้างแนวตั้งชนิด PIN

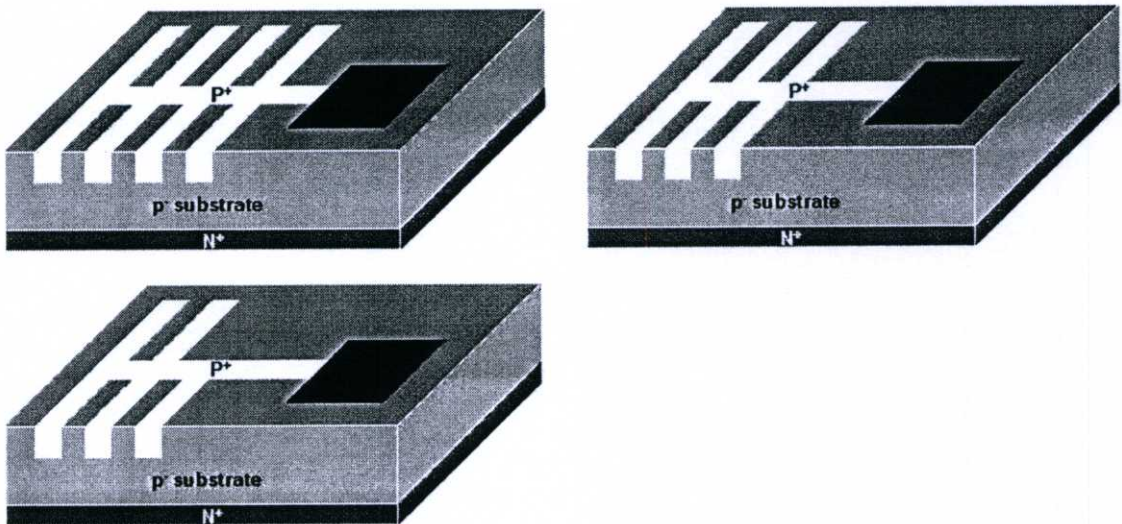
3.2.6 การออกแบบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพื้นที่รับแสงและเส้นรอบรูปค่าต่างๆ

ค่า S/N เป็นพารามิเตอร์หนึ่งที่สามารถบอกถึงประสิทธิภาพของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ ดังนั้น จึงได้ศึกษาผลของพื้นที่รับรังสีและเส้นรอบรูปค่าต่างๆที่มีต่อความหนาแน่นกระแสมืด และกระแสแสง เพื่อหาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปที่เหมาะสม ที่ทำให้ค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืด หรือค่า S/N มีค่าสูง ของซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบโครงสร้างแนวตั้งที่มีพื้นที่รับรังสีและเส้นรอบรูปค่าต่างๆกัน

ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้งชนิด PIN ถูกสร้างให้มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้น และความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงค่าต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3.1 และโครงสร้าง 3 มิติของซิลิคอน โฟโตไดโอด แสดงดังรูปที่ 3.13

ตารางที่ 3.1 ขนาดพื้นที่รับแสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง

รูปแบบที่	พื้นที่รับแสง (cm ²)	ความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง (cm)
1	2.68×10^{-3}	1.084
2	2.18×10^{-3}	0.884
3	1.93×10^{-3}	0.784

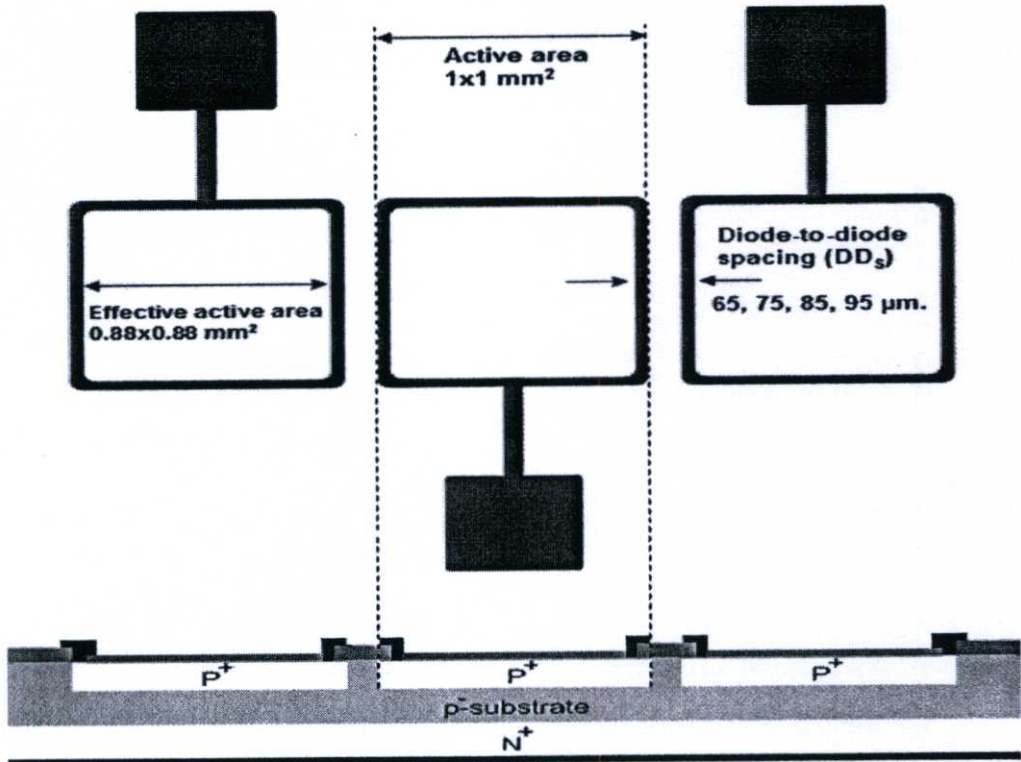


รูปที่ 3.13 โครงสร้าง 3 มิติของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ที่มีพื้นที่รับแสงและเส้นรอบรูปค่าต่างๆ

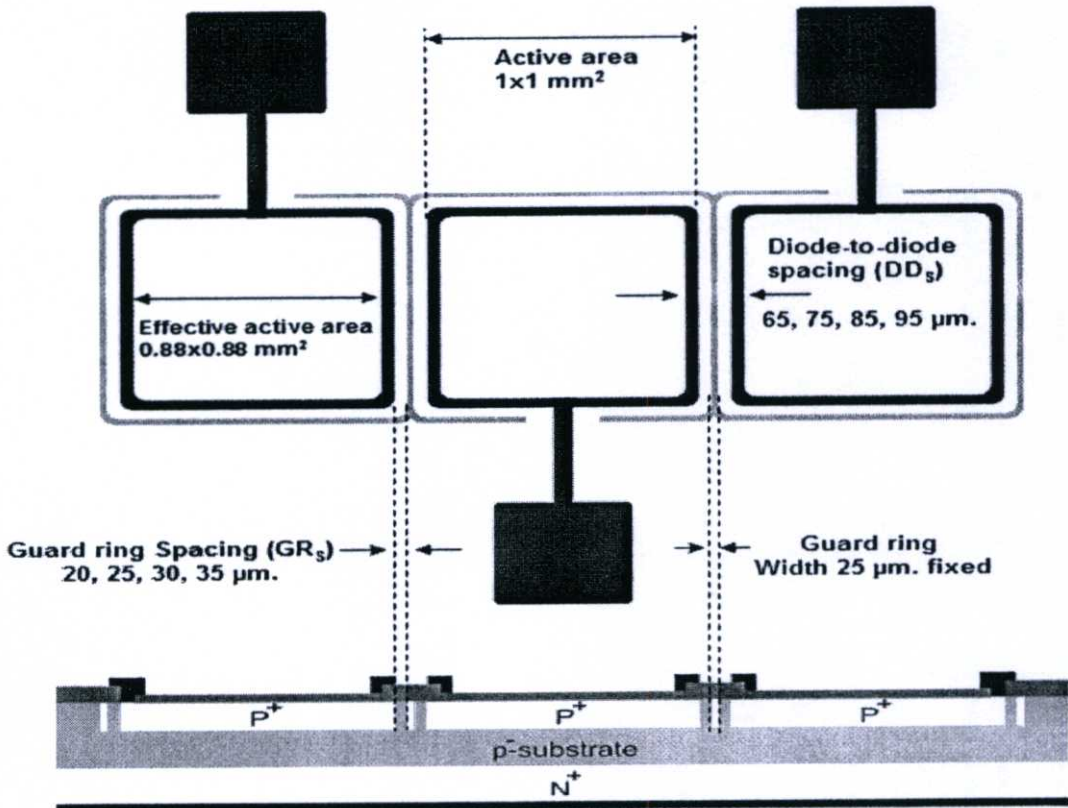
3.2.7 การออกแบบตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย

ในการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์เพื่อสร้างภาพนั้น ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์จะถูกสร้างให้อยู่เรียงกันเป็นแถวเดียว ดังนั้นการออกแบบในหัวข้อนี้เพื่อศึกษาโครงสร้างโฟโตไดโอดอเรียทางด้านระยะห่างระหว่างไดโอด และการลดกระแสมืด โดยใช้โครงสร้างกักรัง

ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN ตัวเดียวถูกสร้างให้เรียงติดกันเป็นแถวเดียวในลักษณะโครงสร้างอเรีย โดยแบ่งเป็น 2 แบบคือ โครงสร้างอเรียที่ไม่มีกักรัง และโครงสร้างอเรียที่มีกักรัง ภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย แสดงดังรูปที่



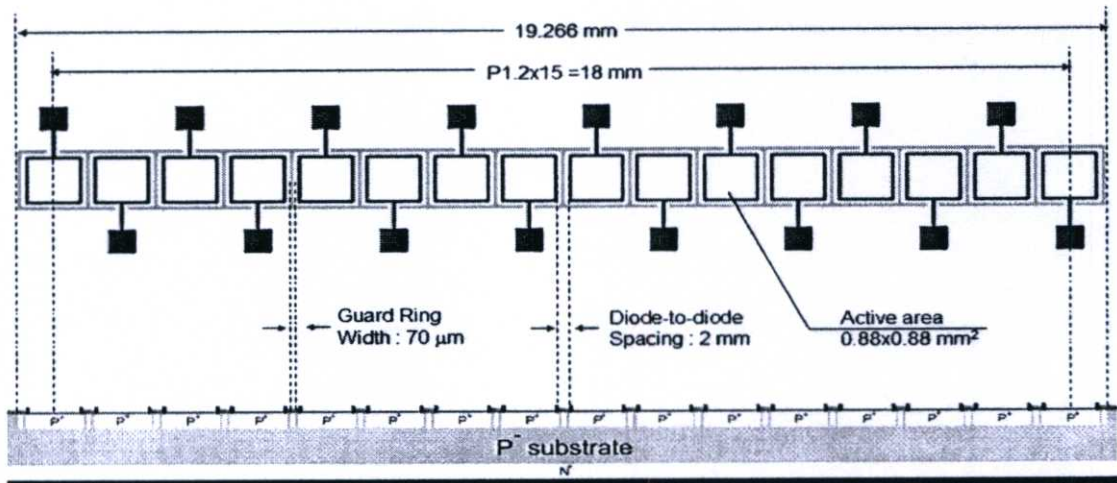
(ก)



(ข)

รูปที่ 3.14 ภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย (ก) โครงสร้างอเรียที่ไม่มีการ์ดริง (ข) โครงสร้างอเรียที่มีการ์ดริง

ในการประยุกต์ใช้งานตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์เพื่อสร้างภาพนั้น ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์จะถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์ ซึ่งรังสีเอ็กซ์นี้จะทะลุผ่านวัตถุที่มีความหนาต่างที่แตกต่างกัน เช่น กระจก อวัยวะต่างๆ หรือเนื้อเยื่อ ดังนั้นเพื่อทดสอบความสามารถในการแยกแยะความแตกต่างของความหนาวัตถุ ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์จึงถูกออกแบบให้มีโครงสร้างอเรีย่จำนวนทั้งหมด 16 ตัวเรียงติดกันเป็นแถวเดียว โดยมีคาร์ดริงล้อมรอบตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แต่ละตัว ภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย่ที่ประกอบด้วยตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ 16 ตัว แสดงดังรูปที่ 3.15



รูปที่ 3.15 ภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย่ที่ประกอบด้วยตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ 16 ตัว

3.2.8 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน

หลังการออกแบบตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน แล้วจากนั้นทำการออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบ ซึ่งในลวดลายตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนแสดงดังรูป 3.16 และหลังจากสแกนข้อมูลการออกแบบด้วยเลเซอร์แล้ว จะทำให้ได้กระจกต้นแบบจำนวน 4 แผ่น แสดงดังรูป 3.17 คือ

แผ่นที่ 1 boron mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพีที่รับแสง P⁺ ของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนโดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน

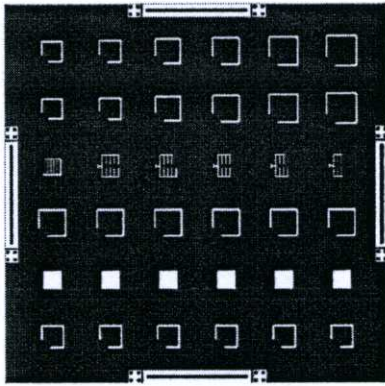
แผ่นที่ 2 phosphorus mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพีที่รับแสง N⁺ ของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน โดยการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

แผ่นที่ 3 contact mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องออกไซด์ เพื่อสร้างช่องสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ และโลหะ

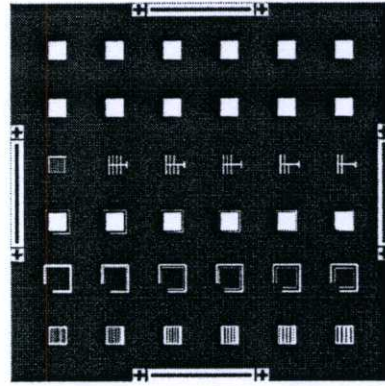
แผ่นที่ 4 metal mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างลวดลายอะลูมิเนียม สำหรับเป็น ขั้วไฟฟ้า ของอุปกรณ์

สำหรับตัวตรวจจับสนิวเคลียร์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มี ชั้นรับรังสีแบบพอร์ซซิลิคอน จะมีกระจกต้นแบบเพิ่มขึ้นไปอีก 1 แผ่นคือ

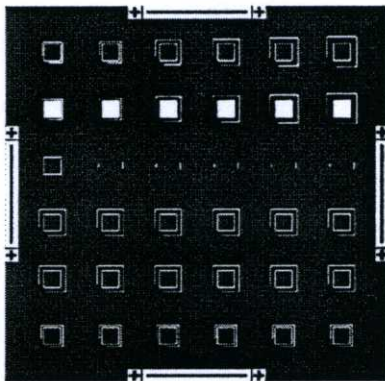
แผ่นที่ 5 porous mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน



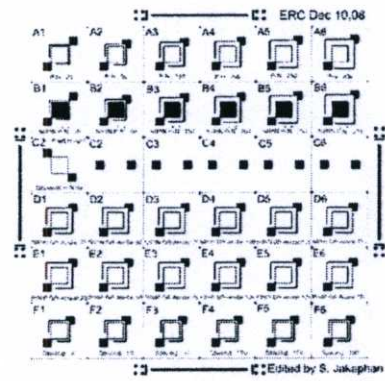
(ก)



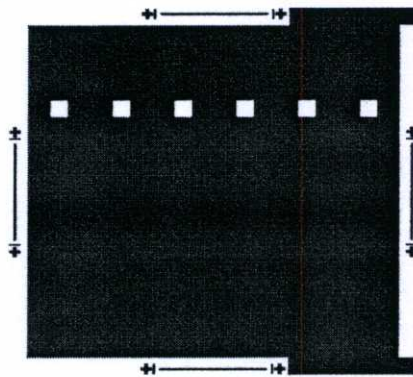
(ข)



(ค)



(ง)

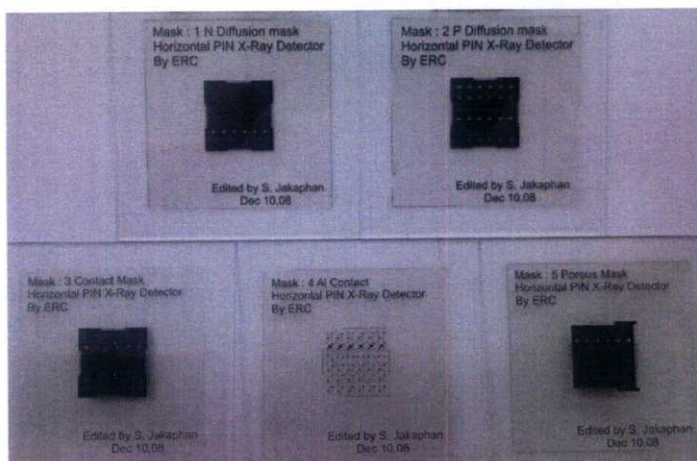


(จ)

รูปที่ 3.16 ลวดลายต้นแบบการสร้างตัวตรวจจับสนิวเคลียร์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

โครงสร้างแนวนอน (ก) แผ่นที่ 1 boron mask (ข) แผ่นที่ 2 phosphorus mask

(ค) แผ่นที่ 3 contact mask (ง) แผ่นที่ 4 metal mask (จ) แผ่นที่ 5 porous mask



รูปที่ 3.17 กระดาษแบบการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน

3.2.9 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

หลังการออกแบบตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน แล้วจากนั้นทำการออกแบบลวดลายกระดาษแบบ ซึ่งในลวดลายตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนแสดงดังรูป 3.18 และหลังจากสแกนข้อมูลการออกแบบด้วยเลเซอร์แล้ว จะทำให้ได้กระดาษแบบจำนวน 4 แผ่น แสดงดังรูป 3.19 คือ

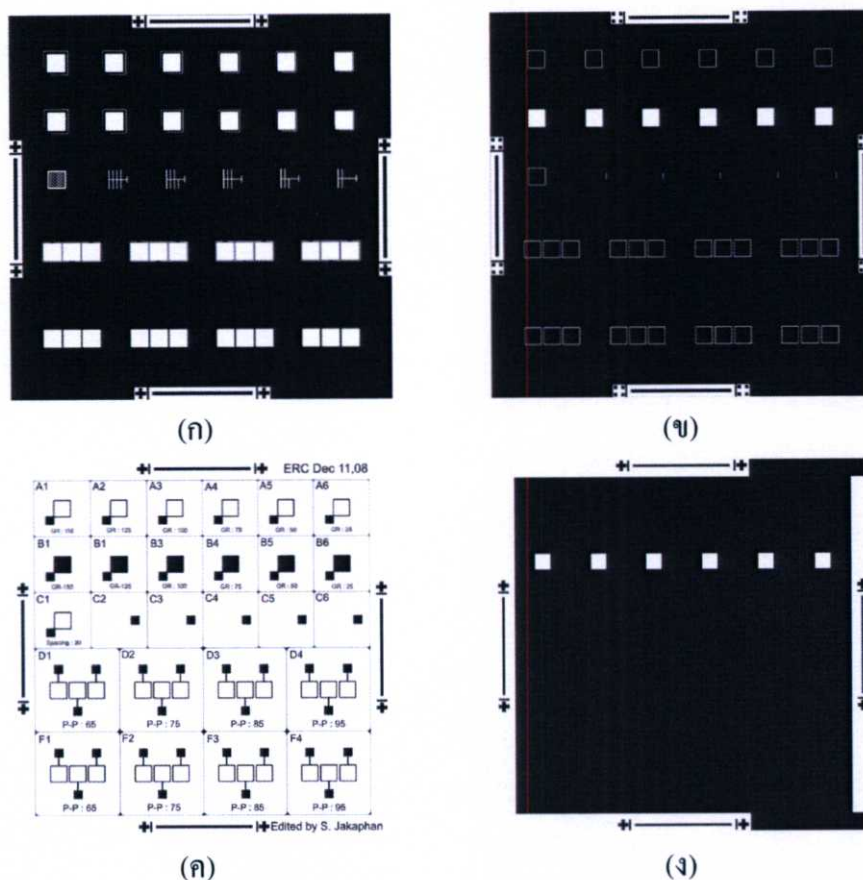
แผ่นที่ 1 boron mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพีที่รับแสง P^+ ของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน

แผ่นที่ 2 contact mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องออกไซด์ เพื่อสร้างช่องสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ และโลหะ

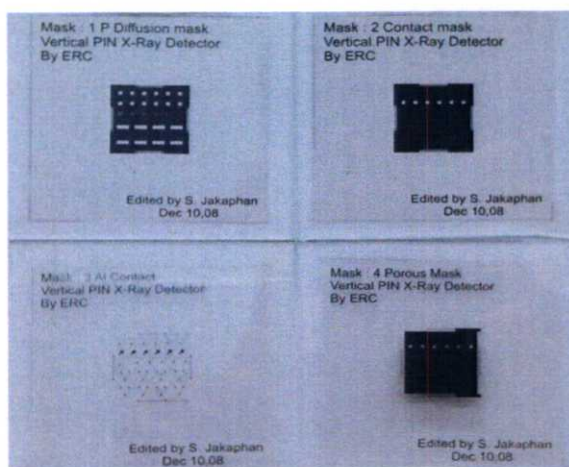
แผ่นที่ 3 metal mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างลวดลายอะลูมิเนียม สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้า ของอุปกรณ์

สำหรับตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นรับรังสีแบบพอร์ซิลิคอน จะมีกระดาษแบบเพิ่มขึ้นมาอีก 1 แผ่นคือ

แผ่นที่ 4 porous mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพอร์ซิลิคอน



รูปที่ 3.18 ลวดลายต้นแบบการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง (ก) แผ่นที่ 1 boron mask (ข) contact mask (ค) แผ่นที่ 3 metal mask (ง) แผ่นที่ 4 porous mask



รูปที่ 3.19 กระดาษต้นแบบการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง

3.2.10 ลวดลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย

หลังการออกแบบตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างอเรีย แล้วจากนั้นทำการออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบ ซึ่งในลวดลายตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งโครงสร้างอเรีย สามารถสร้างร่วมกับตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งได้ ซึ่งแสดงดังรูป 3.16 และหลังจากสแกนข้อมูลการออกแบบด้วยเลเซอร์แล้ว จะทำให้ได้กระจกต้นแบบจำนวน 3 แผ่น แสดงดังรูป 3.17 คือ

แผ่นที่ 1 boron mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างชั้นพีที่รับแสง P^+ ของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน โดยการแพร่อะตอมสารเจือโบรอน

แผ่นที่ 2 contact mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้เปิดช่องออกไซด์ เพื่อสร้างช่องสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำ และโลหะ

แผ่นที่ 3 metal mask เป็นลวดลายต้นแบบที่ใช้สร้างลวดลายอะลูมิเนียม สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์

3.3 ขั้นตอนกระบวนการสร้าง

หลังจากการออกแบบตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์โครงสร้างต่างๆ และเตรียมโฟโตมาสก์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปคือกระบวนการสร้างตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ โดยใช้โฟโตมาสก์ที่ได้เตรียมไว้ ซึ่งกระบวนการสร้างจะใช้เทคโนโลยีในการสร้างดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1

3.3.1 การสร้างตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบแนวตั้ง ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

3.3.1.1 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นเอ็นแซมชั้น (N^+ layer)

แผ่นผลึกฐานรองของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์เป็นแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (intrinsic) ที่มีสภาพต้านทาน $2,000 \Omega \cdot \text{cm}$ ระบาย (111) และมีความหนา $275 \mu\text{m}$.

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อุลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำ DI (de-ionization) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดัมในกรดไนตริก (HNO_3) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 5 นาที
- ดัมในกรดไนตริก (HNO_3) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 5 นาที
- ดัมในน้ำ DI แก้วที่ 1 เป็นเวลา 5 นาที
- ดัมในน้ำ DI แก้วที่ 2 เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1

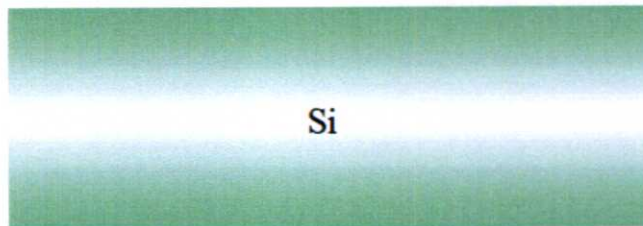
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

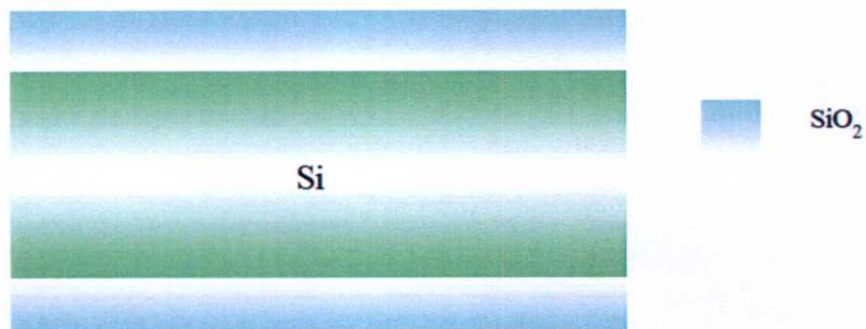
การลอกออกไซด์ (slice etching) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย HF for oxidation 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



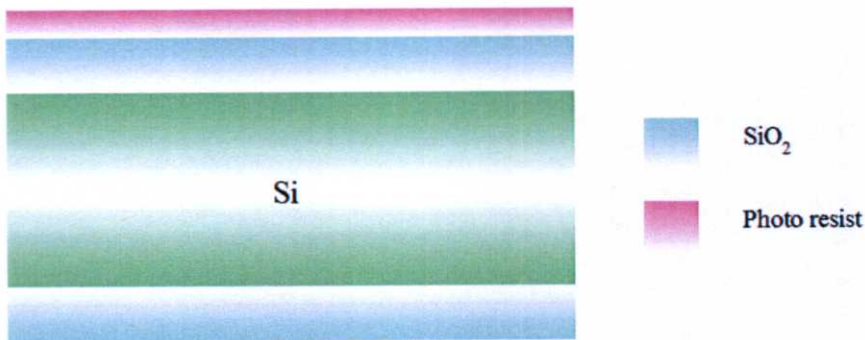
1. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้อุณหภูมิเตา 1,000 °C และ อุณหภูมิน้ำ 95 °C ซึ่งจะได้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 6,800 Å

- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O_2 flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- wet oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O_2 flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O_2 flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



2. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะด้านล่างฐานรองสำหรับเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาหน้ายาไวแสง (AZ1350) ด้านบน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที



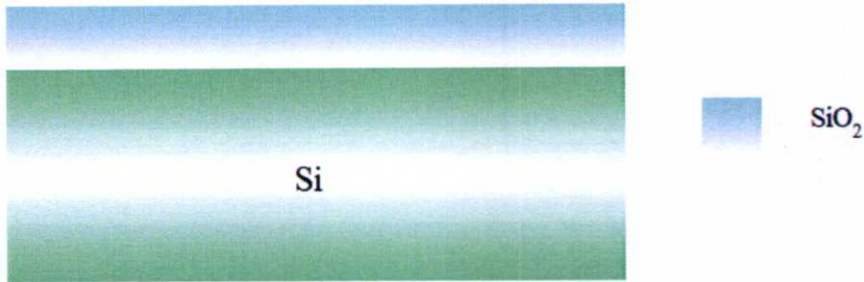
การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for oxidation (HF 47% : 6NH₄F) เป็นเวลา 7 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การลอกหน้ายาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อุตตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย HF for oxidation 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเติมอะตอมสารเจือ (deposition) เป็นการแพร่เติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้านล่าง

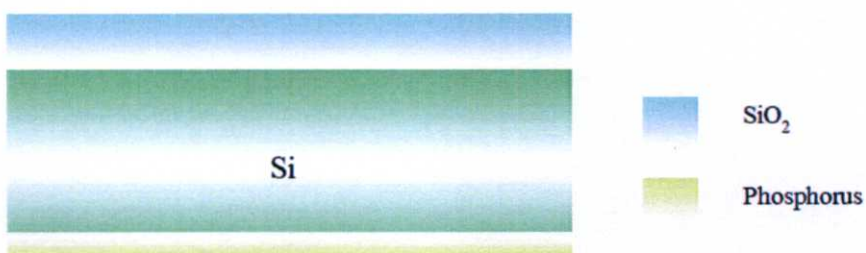
ฐานรอง

pre-deposition

- แพร่อะตอมฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, N_2 flow rate $1,000\text{ cc/min}$ เป็นเวลา 20 นาที และ O_2 flow rate $1,2000\text{ cc/min}$ เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ

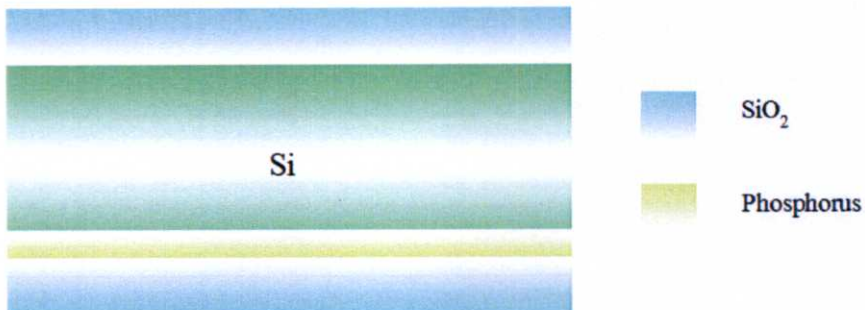
การลอกออกไซด์ เพื่อลอกซิลิคอน ไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการ pre-deposition

- จุ่มในสารละลาย HF for phosphorus 10% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



4. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เพื่อเป็นหน้าฉากป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือโบรอนและเป็นการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ อุณหภูมิเตา 1,000 °C และ อุณหภูมิน้ำ 95 °C ซึ่งจะได้ซิลิคอน ไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 6,800 Å

- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- wet oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

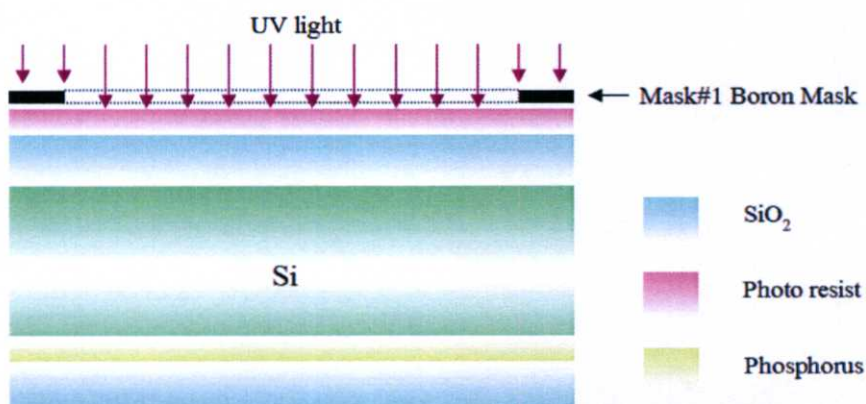


3.3.1.2 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นพีเข้มชั้น (P⁺ layer)

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอน ไดออกไซด์เฉพาะพื้นที่ เพื่อเติมอะตอมสารเจือโบรอน ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 1 boron mask

photolithography mask#1 boron mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



Develop น้ำยาไวแสง

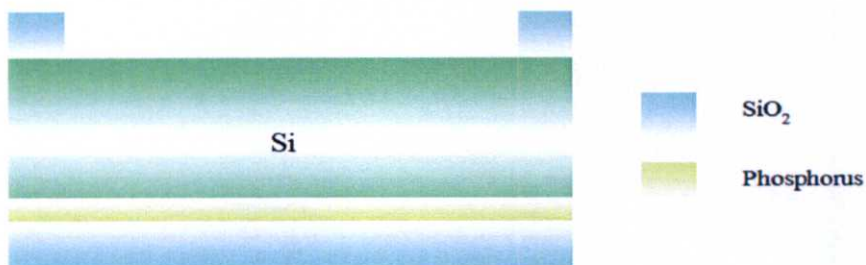
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 10 นาที
- ทาน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านล่าง
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับแพร่อะตอมสารเจือโบรอน

- จุ่มในสารละลาย buffer for phosphorus (HF 47% : 6NH₄F) เป็นเวลา 14 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C₂HCl₃) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH₃COCH₃) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการเติมอะตอมสารเจือโบรอน

- จุ่มในสารละลาย HF for oxidation 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. การเติมอะตอมสารเจือ (deposition) เป็นการแพร่เติมอะตอมสารเจือโบรอนด้านบน
ฐานรอง โดยมีความลึกรอยต่อประมาณ 1 μm .

pre-deposition

- แพร่อะตอมโบรอน ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, N_2 flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 20 นาที และ O_2 flow rate 1,2000 cc/min เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการ pre-deposition

- จุ่มในสารละลาย HF for boron 10% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



3. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อน (anti reflect) และเป็นการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือโบรอน โดยใช้อุณหภูมิเตา 1,000 $^{\circ}\text{C}$ และ อุณหภูมิน้ำ 95 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะได้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 1,000 \AA

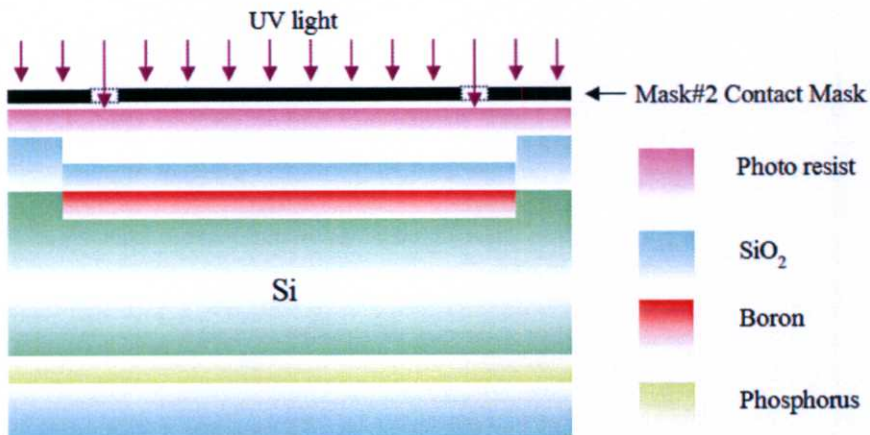
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, O_2 flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 5 นาที
- wet oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, O_2 flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 5 นาที
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, O_2 flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 5 นาที



3.3.1.3 กระบวนการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส (contact)

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะพื้นที่บริเวณรับรังสีเพื่อเป็นขั้วสัมผัส ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 2 contact mask photolithography mask#2 contact mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนด้วยความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับขั้วสัมผัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for boron (HF 47% : 6NH₄F) เป็นเวลา 15 นาที

- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการสร้างชั้นโลหะ

- จุ่มในสารละลาย HF for boron 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

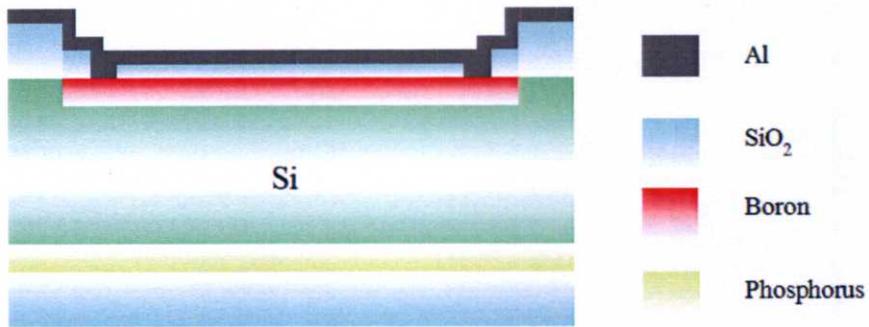


3.3.1.4 กระบวนการสร้างลวดลายอลูมิเนียมและขั้วโลหะ

1. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ด้วยกระบวนการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) โดยชั้นโลหะอลูมิเนียมนี้ มีความหนาประมาณ 1 μm .

Al-vapor evaporation

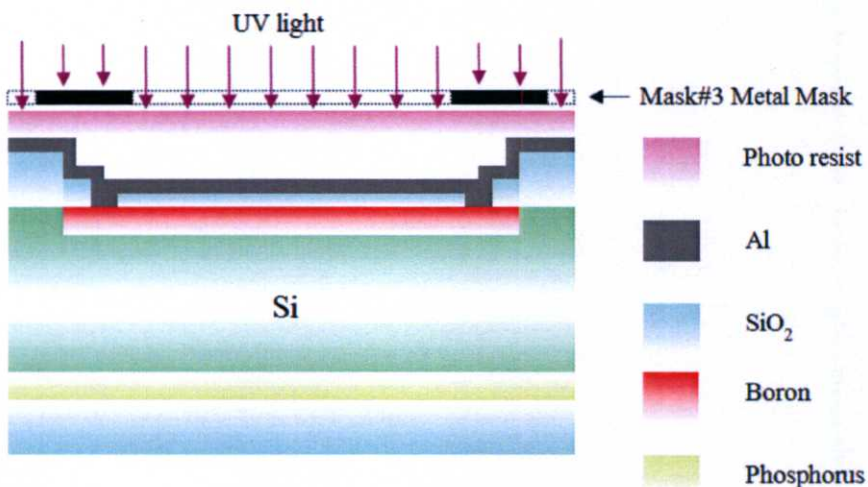
สร้างชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



2. การสร้างลวดลายอลูมิเนียม เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 3 metal mask

photolithography mask#3 metal mask

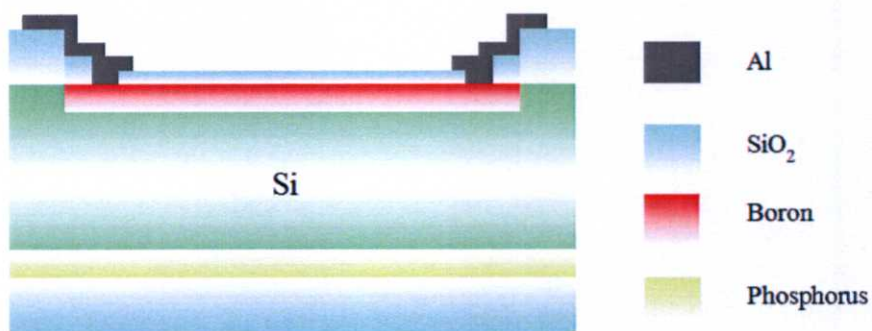
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนด้วยความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

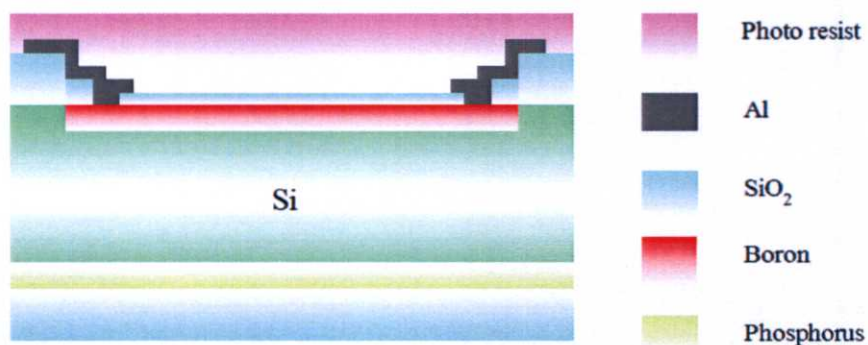
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
 - อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- การกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching)
- จุ่มในสารละลาย Al etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที
 - ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
 - ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- การล่อน้ำยาไวแสง
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
 - ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
 - ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
 - ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
 - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



photolithography เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะด้านล่างฐานรองสำหรับสร้างขั้วสัมผัสด้านล่าง

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

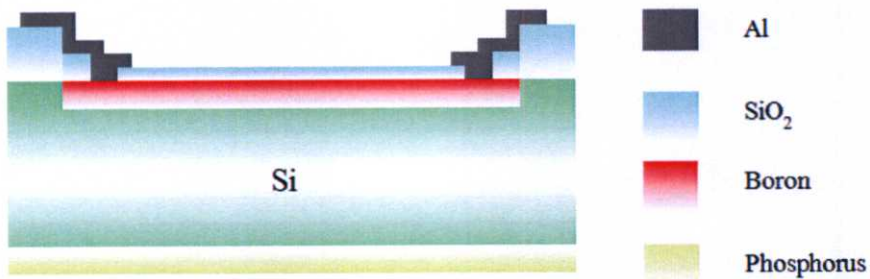


การกัดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ด้านล่าง เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับสร้างขั้วสัมผัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for phosphorus (HF 47% : $6\text{NH}_4\text{F}$) เป็นเวลา 15 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

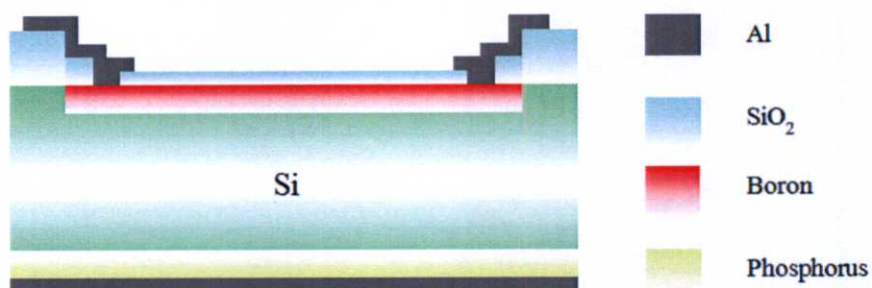
การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



3. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) เป็นการสร้างชั้น โลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านล่างของแผ่นซิลิคอน

สร้างชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



4. การซินเตอร์ริง (sintering) เป็นการทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมและซิลิคอนเกิดเป็นอัลลอย (alloy) เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ที่ดีและเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

sintering ที่ อุณหภูมิ 500 °C , N₂ flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 12 นาที

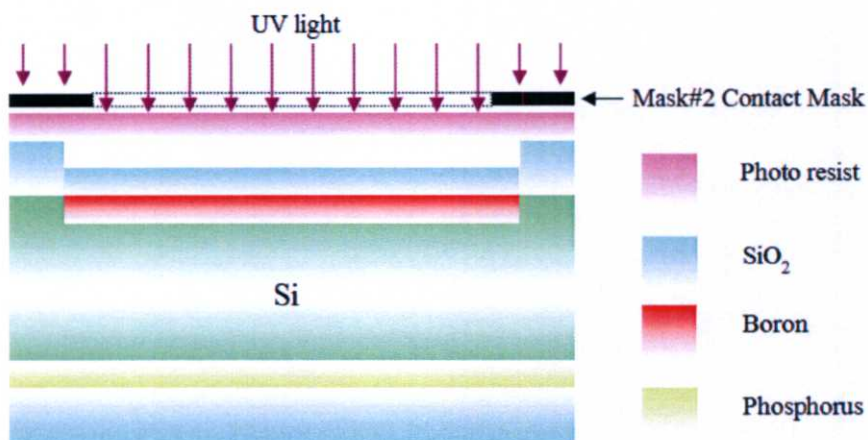
3.3.2 การสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบแนวตั้ง ที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี

กรณีนี้ จะมีกระบวนการสร้างคล้ายกับการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบแนวตั้ง ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นรับรังสีแต่ มาส์คที่ 2 และ 3 จะมีการเปลี่ยนแปลงลดทอนและมีมาส์ค porous mask เพิ่มขึ้นอีก 1 มาส์ค โดยกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นเอ็นเข้มข้น (N^+ layer) และ กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นพีเข้มข้น (P^+ layer) ยังคงขั้นตอนเดิมดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.3.2.1 กระบวนการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส (contact)

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะพื้นที่บริเวณรับรังสีเพื่อเป็นขั้วสัมผัส ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาส์คที่ 2 contact mask photolithography mask#2 contact mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นซิลิกอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับขั้วสัมผัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for boron (HF 47% : $6\text{NH}_4\text{F}$) เป็นเวลา 15 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการสร้างชั้นโลหะ

- จุ่มในสารละลาย HF for boron 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



3.3.2.2 กระบวนการสร้างลวดลายอลูมิเนียมและขั้วโลหะ

1. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิกอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ ด้วยกระบวนการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) โดยชั้นโลหะอลูมิเนียมนี้ มีความหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$.

Al-vapor evaporation

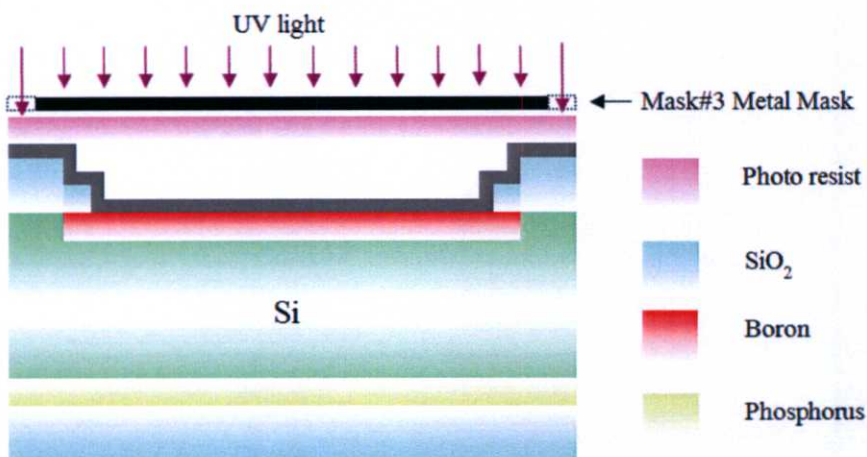
สร้างชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



2. การสร้างลวดลายอลูมิเนียม เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 3 metal mask

photolithography mask#3 metal mask

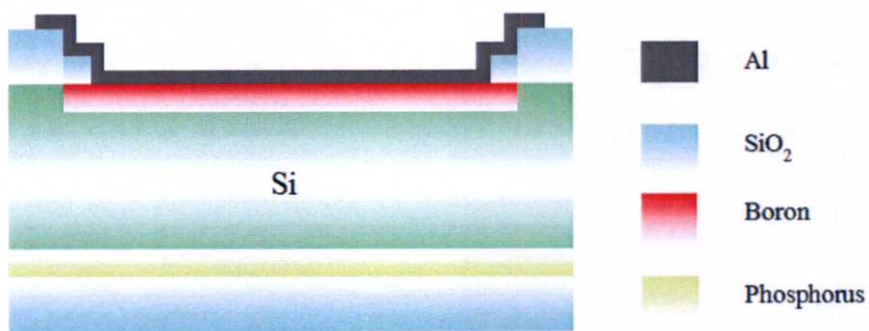
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

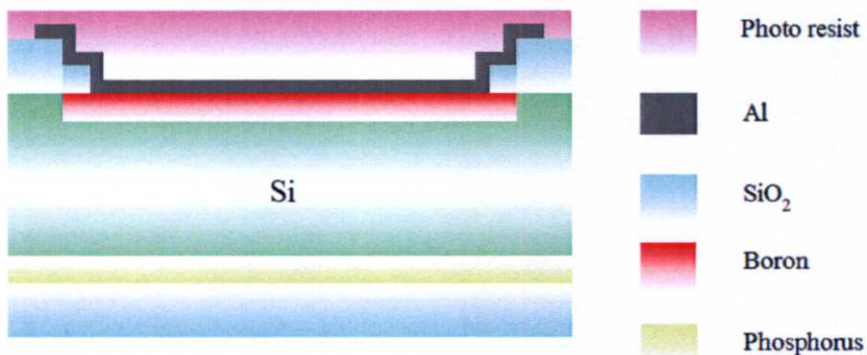
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- การกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching)
- จุ่มในสารละลาย Al etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- การลอกน้ำยาไวแสง
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



photolithography เป็นการเลือกกัดซิลิคอน ไดออกไซด์เฉพาะด้านล่างฐานรองสำหรับสร้าง ขั้วสัมผัสด้านล่าง

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ทาน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

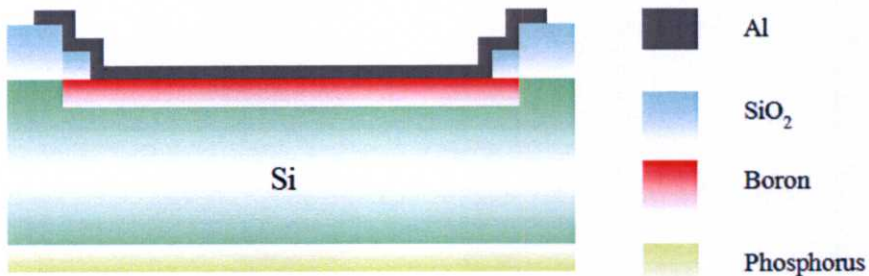


การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้านล่าง เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับสร้างขั้วสัมผัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for phosphorus (HF 47% : $6\text{NH}_4\text{F}$) เป็นเวลา 15 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

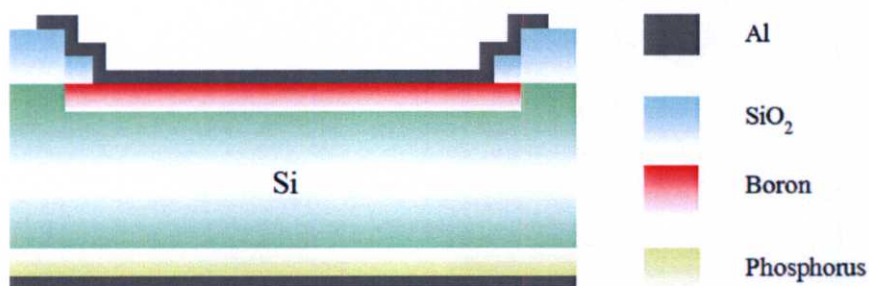
การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



3. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านล่างของแผ่นซิลิคอน

สร้างชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



4. การซินเตอร์ริง (sintering) เป็นการทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมและซิลิคอนเกิดเป็นอัลลอย (alloy) เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ที่ดีและเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

Sintering ที่ อุณหภูมิ 500 °C , N₂ flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 12 นาที

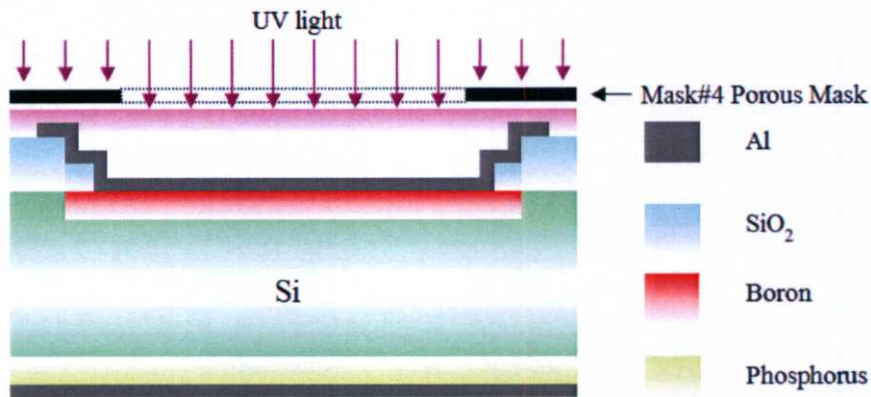
3.3.2.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอนถูกสร้างด้วยวิธีการกัดข้อมสี (Stain Etching) โดยใช้สารละลายซึ่งประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ 60 wt.%) และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการกัด 45 วินาที

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนเฉพาะพื้นที่เพื่อสร้างพอร์สซิลิคอนเป็นขั้วสัมผัส ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 4 porous mask

photolithography mask#4 porous mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



Develop น้ำยาไวแสง

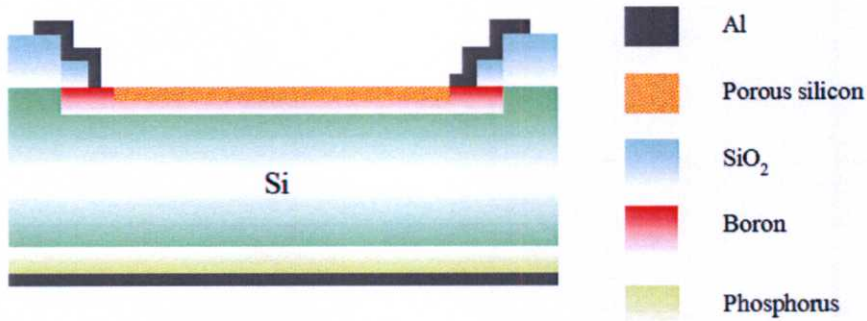
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน

- จุ่มในสารละลายข้อมสี porous etching (1HF: 6HNO₃: 5DI) เป็นเวลา 45 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



3.3.3 การสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบแวนอน ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

3.3.3.1 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นเอ็นเข้มชั้น (N⁺ layer)

แผ่นผลึกฐานรองของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์เป็นแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (intrinsic) ที่มีสภาพต้านทาน 2,000 Ω.cm ระบาย (111) และมีความหนา 250 μm.

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนครั้งแรก

- อุลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำ DI (de-ionization) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ดมในกรดไนตริก (HNO₃) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 5 นาที
- ดมในกรดไนตริก (HNO₃) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 5 นาที
- ดมในน้ำ DI แก้วที่ 1 เป็นเวลา 5 นาที
- ดมในน้ำ DI แก้วที่ 2 เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

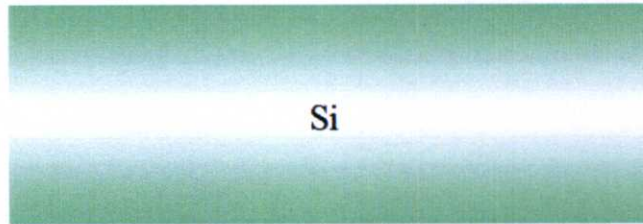
การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ดมในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C₂HCl₃) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH₃COCH₃) เป็นเวลา 5 นาที

- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

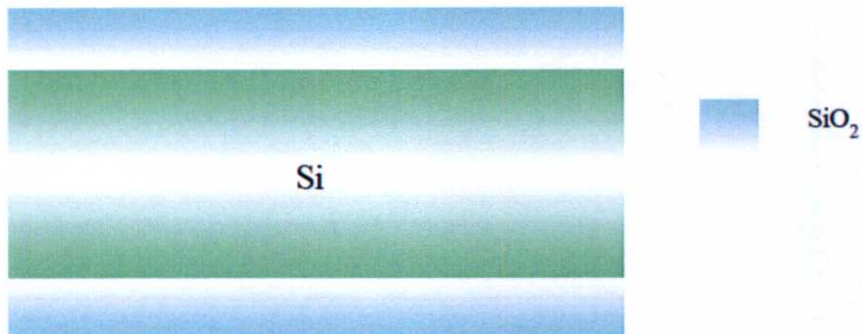
การลอกออกไซด์ (slice etching) ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (native oxide) ก่อนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย HF for oxidation 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



1. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นหน้ากปกป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้อุณหภูมิ 1,000 °C และ อุณหภูมิ 95 °C ซึ่งจะได้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 6,800 Å

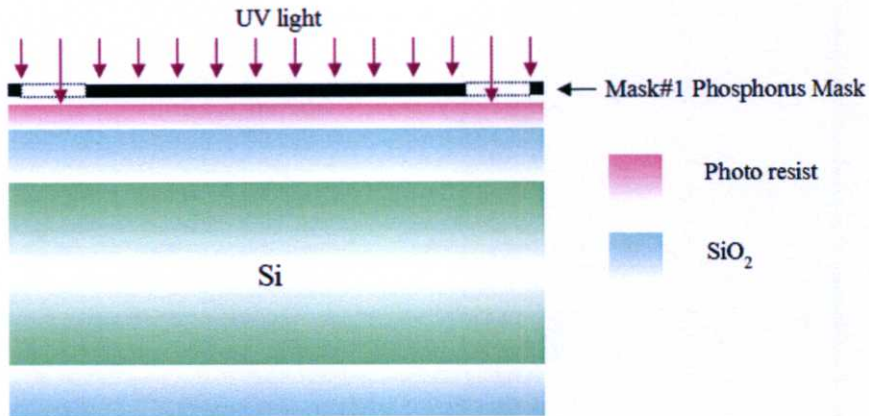
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- wet oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



2. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะพื้นที่สำหรับเติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัส ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 1 phosphorus mask

photolithography mask#1 phosphorus mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV

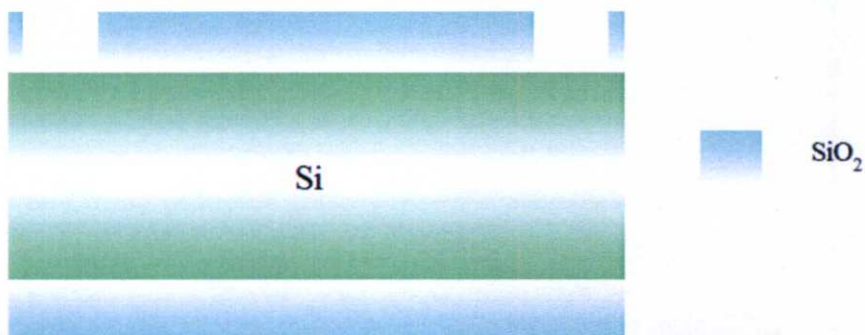


การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for oxidation ($\text{HF } 47\% : 6\text{NH}_4\text{F}$) เป็นเวลา 7 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะดวกผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการสร้างซิลิคอนไดออกไซด์

- จุ่มในสารละลาย HF for oxidation 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเติมอะตอมสารเจือ (deposition) เป็นการแพร่เติมอะตอมสารเจือฟอสฟอรัสด้านล่าง
ฐานรอง

pre-deposition

- แพร่อะตอมฟอสฟอรัส ที่อุณหภูมิ $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, N_2 flow rate $1,000\text{ cc/min}$ เป็นเวลา 20 นาที และ O_2 flow rate $1,2000\text{ cc/min}$ เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการ pre-deposition

- จุ่มในสารละลาย HF for phosphorus 10% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



4. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นหน้ากักป้องกันการแพร่ของอะตอมสารเจือโบรอนและเป็นการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือฟอสฟอรัส โดยใช้ อุณหภูมิเตา $1,000\text{ }^{\circ}\text{C}$ และ อุณหภูมิน้ำ $95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะได้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ $2,300\text{ \AA}$

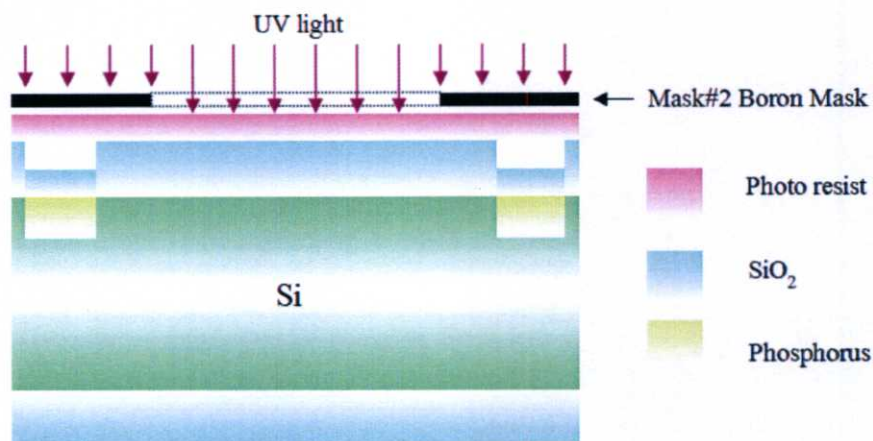
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 10 นาที
- wet oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 20 นาที
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 °C , O₂ flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 10 นาที



3.3.3.2 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นพีเข้มข้น (P⁺ layer)

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะพื้นที่ เพื่อเติมอะตอมสารเจือโบรอน ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 2 boron mask photolithography mask#1 boron mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 10 นาที
- ทาหน้ายาไวแสง (AZ1350) ด้านล่าง
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับแพะอะตอมสารเจือโบรอน

- จุ่มในสารละลาย buffer for phosphorus (HF 47% : 6NH₄F) เป็นเวลา 14 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกหน้ายาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ดั้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C₂HCl₃) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH₃COCH₃) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการเติมอะตอมสารเจือโบรอน

- จุ่มในสารละลาย HF for oxidation 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3. การเติมอะตอมสารเจือ (Deposition) เป็นการแพร่เติมอะตอมสารเจือโบรอนด้านบนบนฐานรอง โดยมีความลึกรอยต่อประมาณ 1 μm .

pre-deposition

- แพร่อะตอมโบรอน ที่อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, N_2 flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 20 นาที และ O_2 flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 10 นาที ตามลำดับ

การลอกออกไซด์ เพื่อลอกซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดจากกระบวนการ pre-deposition

- จุ่มในสารละลาย HF for boron 10% เป็นเวลา 2 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



4. ออกซิเดชัน (oxidation) เป็นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อน (anti reflect) และเป็นการขับลึก (drive-in) อะตอมสารเจือโบรอน โดยใช้อุณหภูมิเตา 1,000 $^{\circ}\text{C}$ และ อุณหภูมิน้ำ 95 $^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะได้ซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนาประมาณ 1,000 \AA

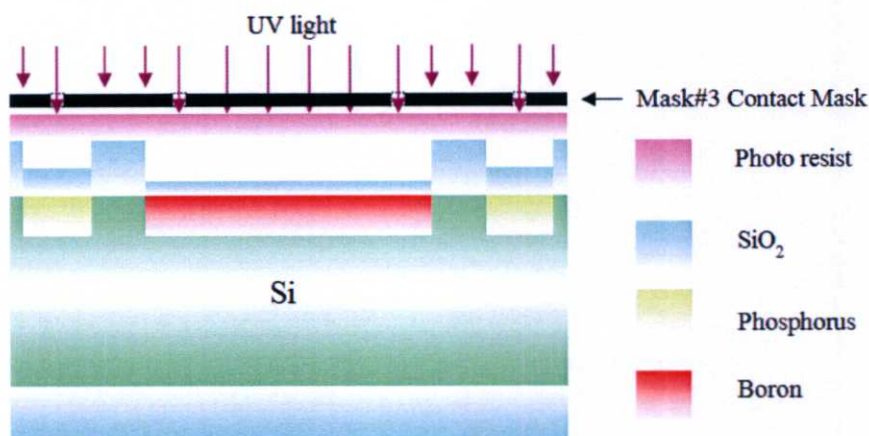
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, O_2 flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 5 นาที
- wet oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, O_2 flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 5 นาที
- dry oxidation ที่ อุณหภูมิ 1,000 $^{\circ}\text{C}$, O_2 flow rate 1,200 cc/min เป็นเวลา 5 นาที



3.3.3.3 กระบวนการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส (contact)

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะพื้นที่บริเวณรับรังสีเพื่อเป็นขั้วสัมผัส ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 3 contact mask photolithography mask#3 contact mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับขั้วสัมผัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for boron (HF 47% : 6NH₄F) เป็นเวลา 20 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การล่อน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที

- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการสร้างชั้นโลหะ

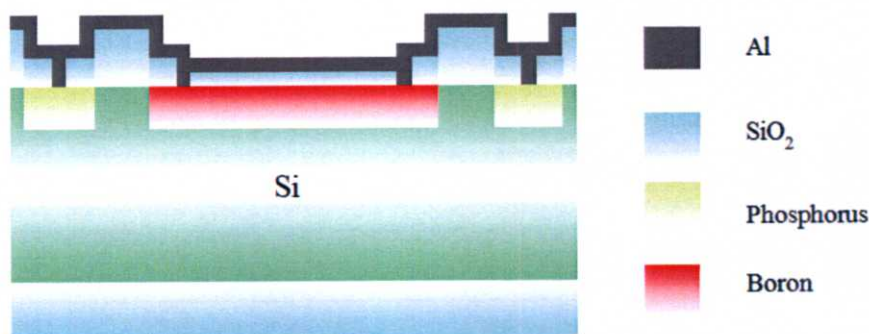
- จุ่มในสารละลาย HF for boron 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.3.3.4 กระบวนการสร้างลวดลายอลูมิเนียมและขั้วโลหะ

1. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับสนิวส์ด้วยกระบวนการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) โดยชั้นโลหะอลูมิเนียมนี้ มีความหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$.

Al-vapor evaporation

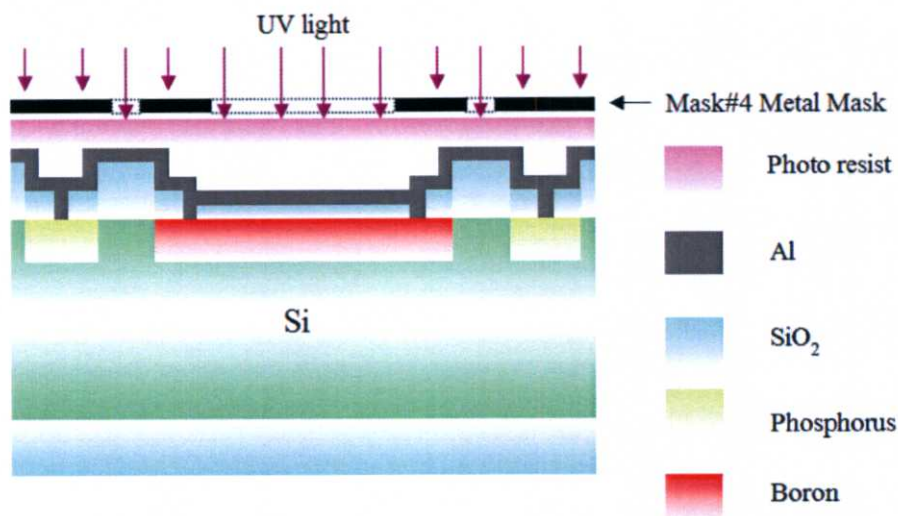
สร้างชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



2. การสร้างลวดลายอลูมิเนียม เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 4 metal Mask

photolithography mask#4 metal mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching)

- จุ่มในสารละลาย Al etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



3. การซินเตอร์ริง (sintering) เป็นการทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมและซิลิคอนเกิดเป็นอัลลอย (alloy) เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ที่ดีและเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

Sintering ที่ อุณหภูมิ 500 °C , N₂ flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 12 นาที

3.3.4 การสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบแวนอน ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสี

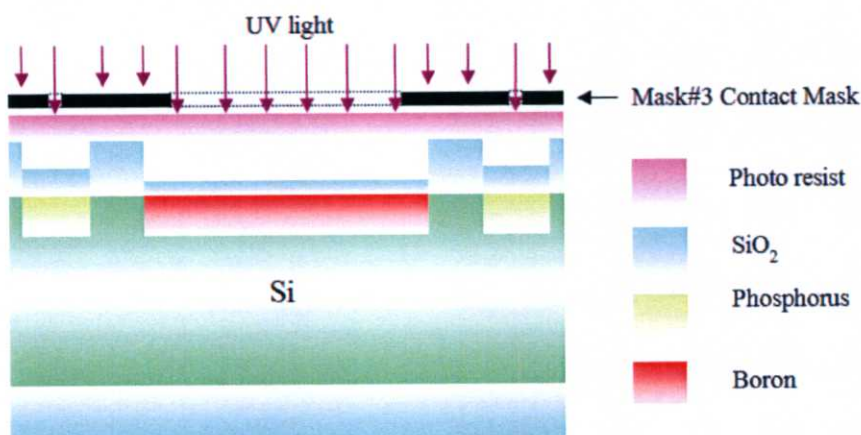
กรณีนี้ จะมีกระบวนการสร้างคล้ายกับการสร้างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบแวนอน ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นรับรังสีแต่ มาส์คที่ 2 และ 3 จะมีการเปลี่ยนแปลงลดทอนและมีมาส์ค Porous mask เพิ่มขึ้นอีก 1 มาส์ค โดยกระบวนการแพร่อะตอมสารเจือฟอสฟอรัสเพื่อสร้างชั้นเอ็นเข้มชั้น (N⁺ layer) และ กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือโบรอนเพื่อสร้างชั้นพีเข้มชั้น (P⁺ layer) ยังคงขั้นตอนเดิมดังที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

3.3.4.1 กระบวนการเปิดช่องซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อสร้างขั้วสัมผัส (contact)

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนไดออกไซด์เฉพาะพื้นที่ บริเวณรับรังสีเพื่อเป็นขั้วสัมผัส ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 3 contact mask

photolithography mask#3 contact mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลื่อนย้ายไอแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไอแสง

- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับขั้วสัมผัส

- จุ่มในสารละลาย buffer for boron (HF 47% : 6NH₄F) เป็นเวลา 15 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไอแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นแบบมาตรฐาน

- คั้มไนไตรคลอโรเอทิลีน (trichloroethylene : C_2HCl_3) เป็นเวลา 5 นาที
- อุลตราโซนิคในอะซิโตน (acetone : CH_3COCH_3) เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติก่อนการสร้างชั้นโลหะ

- จุ่มในสารละลาย HF for boron 10% เป็นเวลา 10 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

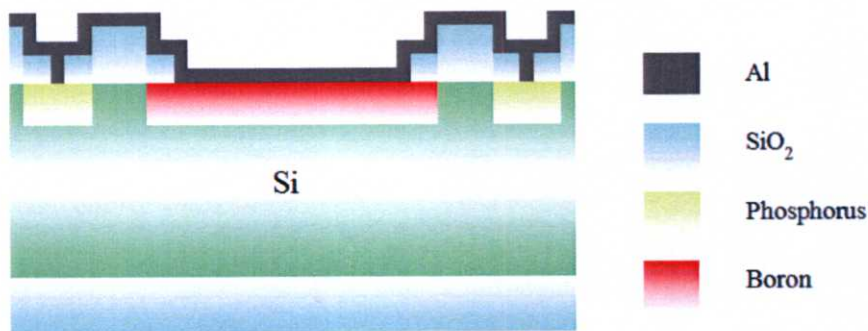


3.3.4.2 กระบวนการสร้างสวดลายอลูมิเนียมและข้าวโลหะ

1. การสร้างชั้นโลหะ (metallization) เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ ด้วยกระบวนการระเหยอลูมิเนียมในสุญญากาศ (Al-vapor evaporation) โดยชั้นโลหะอลูมิเนียมนี้ มีความหนาประมาณ $1 \mu\text{m}$.

Al-vapor evaporation

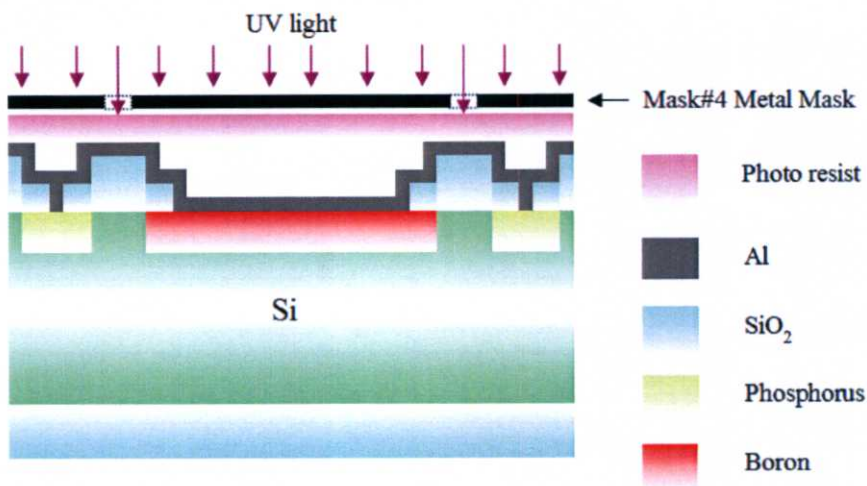
สร้างชั้นอลูมิเนียมในสุญญากาศด้วยเครื่อง evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} Torr.



2. การสร้างลวดลายอลูมิเนียม เป็นการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ผิวด้านบนของแผ่นซิลิคอนเพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นตัวนำของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 4 metal mask

photolithography mask#4 metal mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



develop น้ำยาไวแสง

- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching)

- จุ่มในสารละลาย Al etching ที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C เป็นเวลาประมาณ 20 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



3. การซินเตอร์ริง (sintering) เป็นการทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะอลูมิเนียมและซิลิคอนเกิดเป็นอัลลอย (alloy) เพื่อให้มีคุณสมบัติเป็นรอยต่อโอห์มมิก (ohmic contact) ที่ดีและเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์

Sintering ที่ อุณหภูมิ 500 °C , N₂ flow rate 1,000 cc/min เป็นเวลา 12 นาที

3.3.4.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน

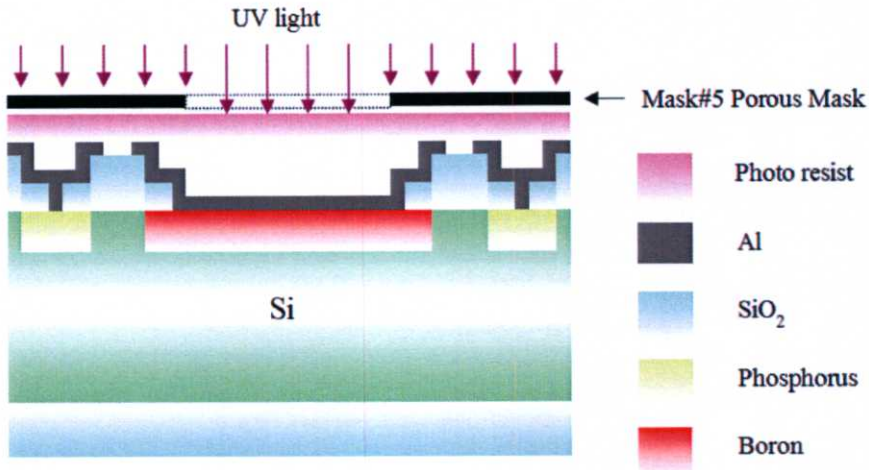
พอร์สซิลิคอนถูกสร้างด้วยวิธีการกัดข้อมสี (Stain Etching) โดยใช้สารละลายซึ่งประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก (HF 47 wt.%) กรดไนตริก (HNO₃ 60 wt.%) และน้ำ DI ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ โดยใช้เวลาในการกัด 45 วินาที

1. โฟโตลิโธกราฟี (photolithography) เป็นการเลือกกัดซิลิคอนเฉพาะพื้นที่เพื่อสร้างพอร์สซิลิคอนเป็นขั้วสัมผัส ด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยใช้มาสก์ที่ 5 porous mask

photolithography mask#4 porous mask

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสง (AZ1350) ด้านบนที่ความเร็ว 3,000 rpm เป็นเวลา 30 วินาที

- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 15 นาที
- ฉายแสง UV



Develop น้ำยาไวแสง

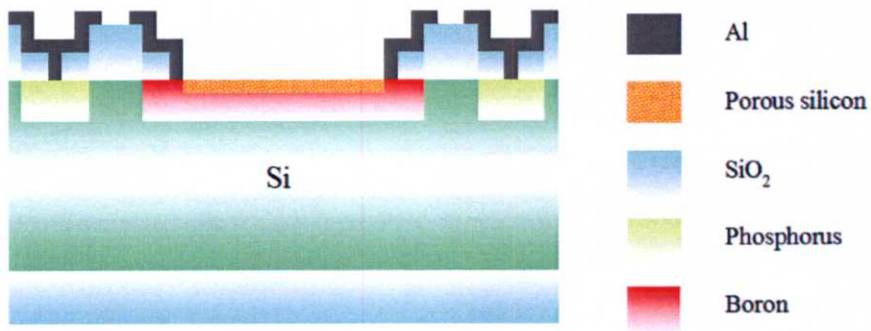
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 1 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างใน AZ Developer (AZ 300 MIF) แก้วที่ 2 เป็นเวลา 15 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนที่อุณหภูมิ 95 °C เป็นเวลา 30 นาที

การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอน

- จุ่มในสารละลายย porous etching (1HF: 6HNO₃: 5DI) เป็นเวลา 45 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

การลอกน้ำยาไวแสง

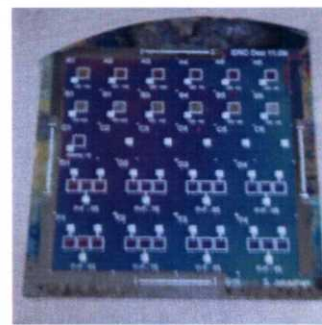
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในอะซิโตน แก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



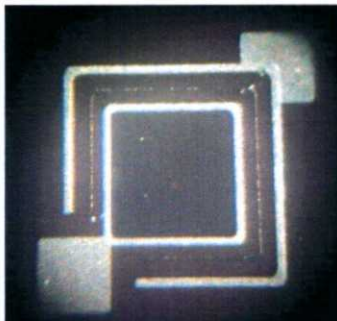
ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่สร้างเสร็จแล้ว แสดงดังรูปที่ 3.20



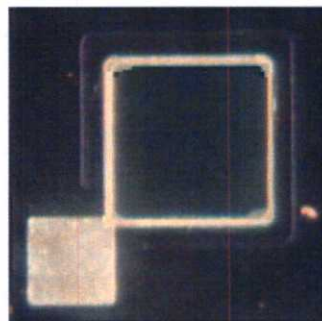
(ก)



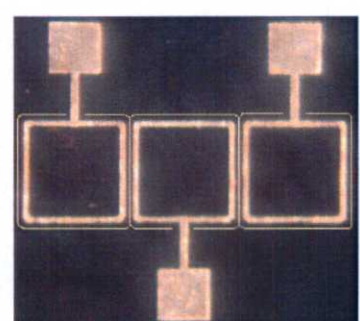
(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

รูปที่ 3.20 ภาพถ่ายตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่สร้างเสร็จ (ก) โครงสร้างแนวนอนบนแผ่นผลึกซิลิคอน (ข) โครงสร้างแนวนอนบนแผ่นผลึกซิลิคอน (ค) ภาพขยายโครงสร้างแนวนอน (ง) ภาพขยายโครงสร้างแนวตั้ง (จ) ภาพขยายโครงสร้างอเรีย

หลังจากนั้น ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN บนแผ่นผลึกซิลิคอน จะถูกตัดแบ่งเป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แต่ละตัว และนำไปติดตั้งลงบนตัวถังแบบกระป๋องโลหะ (can case TO-8) ดังรูปที่ 3.21



รูปที่ 3.21 ภาพถ่ายตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN ที่ถูกบรรจุบนตัวถังแบบ ครอบป้องกันโลหะ

3.4 การทดลอง

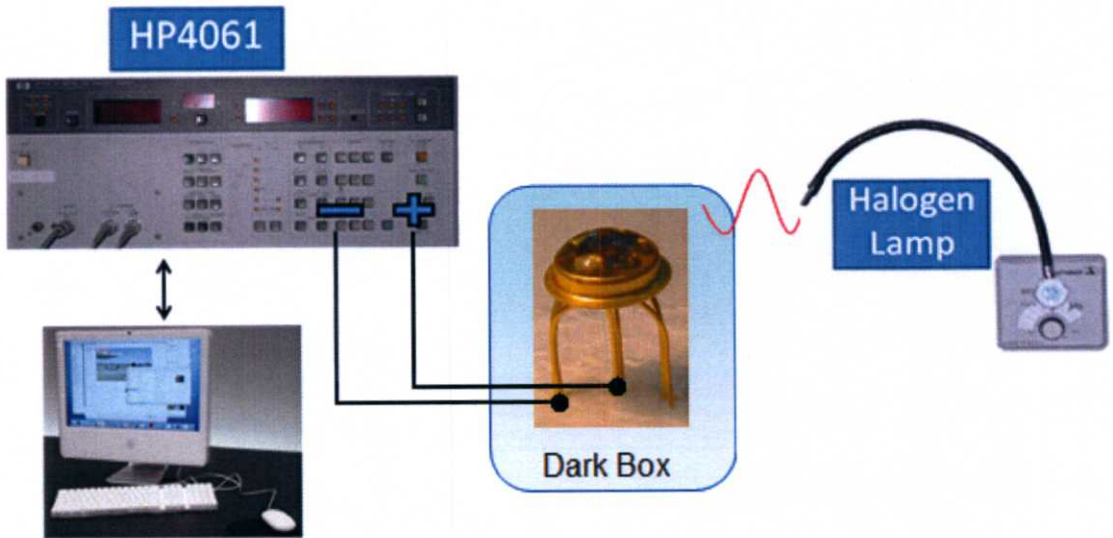
ตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ตัวตรวจับ รังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง และตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์แบบ ซิลิคอน โฟโตไดโอดออร์เรย์ โดยการวัดคุณสมบัติทางแสง และรังสีเอ็กซ์ ซึ่งสามารถแบ่งรูปแบบการ ทดลองดังนี้

3.4.1 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง

ตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะถูกวัดวัดคุณสมบัติการตอบสนองทาง แสง โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้จากหลอดฮาโลเจน ซึ่งมีรายละเอียดต่างๆ ดังนี้

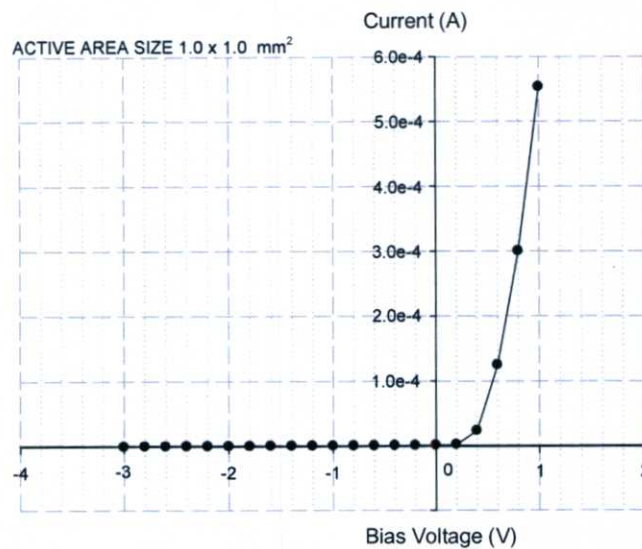
3.4.1.1 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น คือการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า ของตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และโครงสร้าง แนวตั้ง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แลไบอัสย้อนกลับ ทั้งในขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง เพื่อ หาค่ากระแสมืด กระแสแสงของ ตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหา ลักษณะสมบัติ กระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์ ทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำ HP รุ่น 4061A ซึ่งสามารถจ่ายแรงดัน ไฟฟ้า ให้กับตัวตรวจับรังสี เอ็กซ์ และวัดกระแสไฟฟ้าที่ตัวตรวจับรังสีเอ็กซ์จ่ายออกมา หลังจากนั้นข้อมูลต่างๆจะถูกส่งผ่านเข้า สู่ออมพิวเตอร์โดยผ่าน GPIB การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าแสดงตามไดอะแกรมใน รูปที่ 3.22



รูปที่ 3.22 โดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า

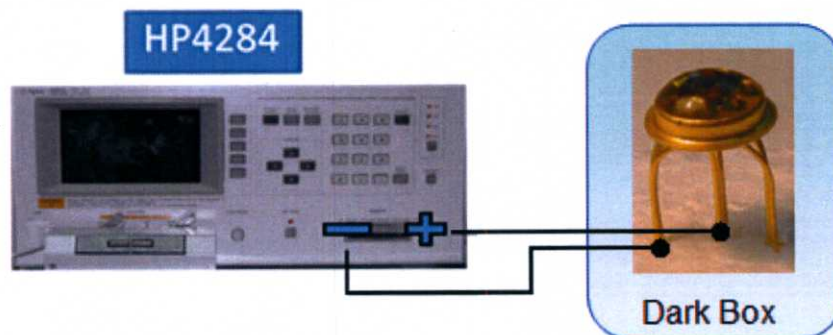
เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จากคอมพิวเตอร์มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้า จะได้ดังรูปที่ 3.23 ซึ่งการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆที่มีต่อคุณสมบัติทางแสงต่างๆ ในวิทยานิพนธ์นี้ สามารถวิเคราะห์ได้จากจากรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไฟฟ้างดังกล่าว



รูปที่ 3.23 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด

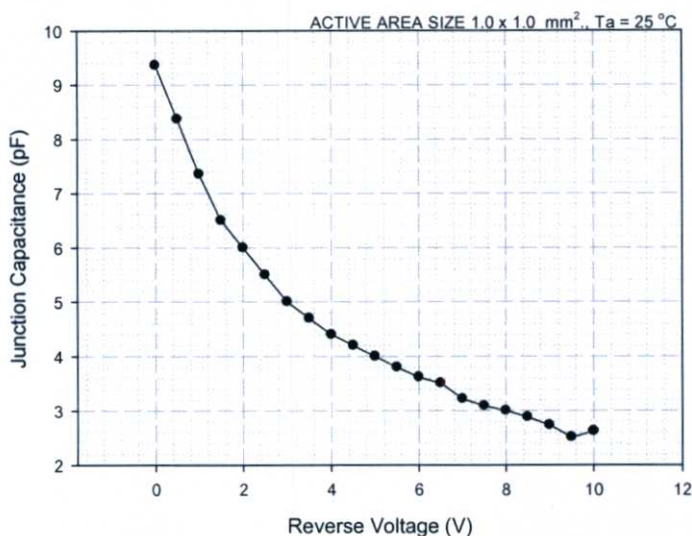
3.4.1.2 การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า

การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ทำได้โดยใช้เครื่อง LCR Meter Agilent รุ่น 4284A โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้ง การวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าแสดงตามโดอะแกรมในรูปที่ 3.24



รูปที่ 3.24 ไดอะแกรมการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า

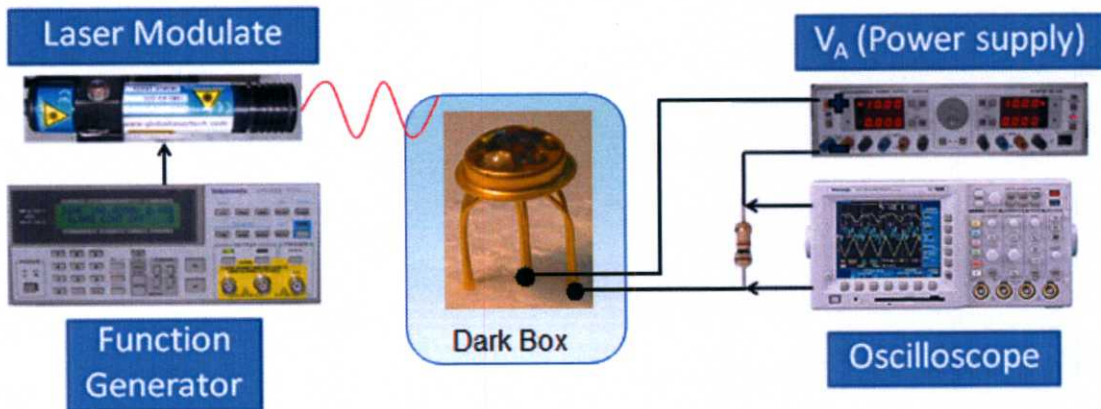
เมื่อนำค่าแรงดันไฟฟ้า และความจุไฟฟ้าที่ความถี่ 100 kHz ซึ่งวัดได้จาก LCR meter มาเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้า จะได้ดังรูปที่ 3.25



รูปที่ 3.25 ความสัมพันธ์ระหว่างความจุ-แรงดันไฟฟ้า

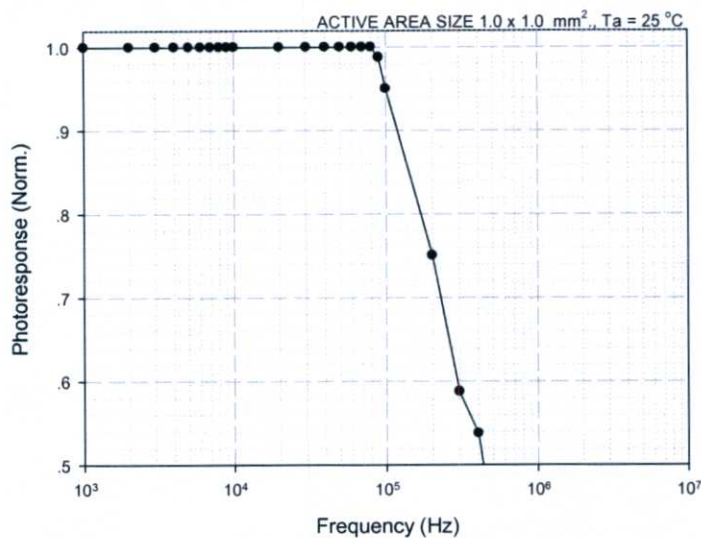
3.4.1.3 การหาความเร็วในการตอบสนอง

การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์การใช้งานตัวตรวจรับรังสีเอ็กซ์ในส่วนของความเร็วในการทำงาน และเชื่อมโยงไปถึงแบนด์วิธของอุปกรณ์ ดังนั้นหัวข้อนี้จะศึกษาผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจรับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยการป้อนความถี่ค่าต่างๆเข้ากับแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 3 mW ส่งผ่านไปยังตัวตรวจรับรังสีเอ็กซ์ ตัวตรวจรับรังสีเอ็กซ์ที่ถูกต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับไว้ และวัดสัญญาณเอาท์พุทจากออสซิลอสโคป จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุทที่ถูกนอร์มอไลซ์เพื่อเขียนกราฟการตอบสนองเชิงความถี่ การหาความเร็วในการตอบสนองแสดงตามบล็อกไดอะแกรมในรูปที่ 3.26



รูปที่ 3.26 ไดอะแกรมการหาความเร็วในการตอบสนอง

เมื่อนำจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของออสซิลโลสโคป ที่ถูกนอร์มอลไลซ์เพื่อเขียนกราฟการตอบสนองเชิงความถี่จะได้ดังรูปที่ 3.27

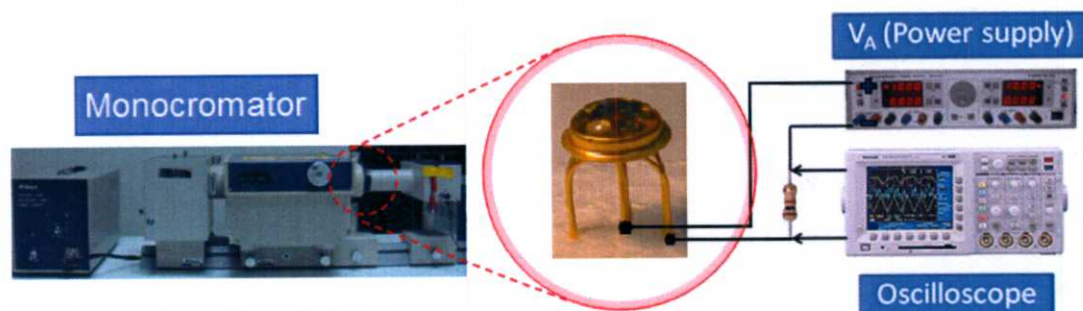


รูปที่ 3.27 การตอบสนองทางความถี่

3.4.1.4 การหาสภาพการตอบสนอง

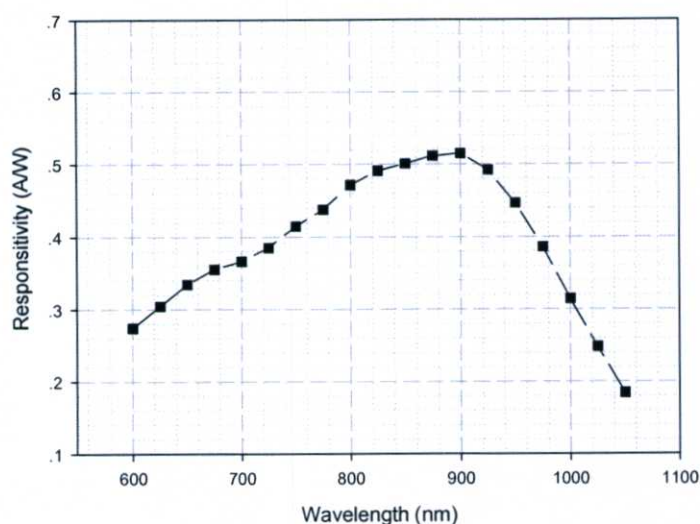
เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะถูกนำไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน $1 \text{ k}\Omega$ และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ กระแสแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์หาด้วยวิธีโดยอ้อมจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จากนั้นนำไปหาค่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ต่อไป แหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้อุปกรณ์ ใช้หลอดทังสเตน ส่งผ่าน monochromator ของ Nikon รุ่น G250 เพื่อเปลี่ยนความยาว

คลื่นแสง โดยความยาวคลื่นแสงที่ให้อยู่ในช่วง 600-1,050 nm ตามไดอะแกรมในรูปที่ 3.32 และชุดการทดลองการหาสภาพสนองแสดงดังรูปที่ 3.28



รูปที่ 3.28 ไดอะแกรมการหาสภาพการตอบสนอง

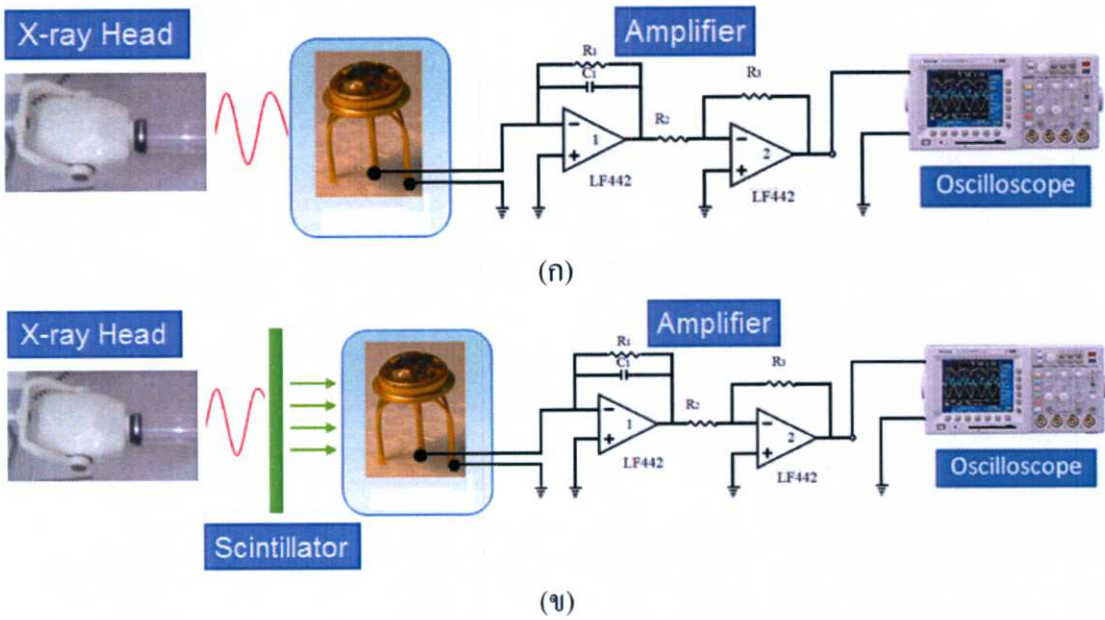
เมื่อนำจากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจาก source meter ที่ถูกนอร์มอลไลซ์เพื่อเขียนกราฟการหาสภาพการตอบสนองจะได้ดังรูปที่ 3.29



รูปที่ 3.29 สภาพตอบสนองเชิงสเปคตรัม

3.4.2 การวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

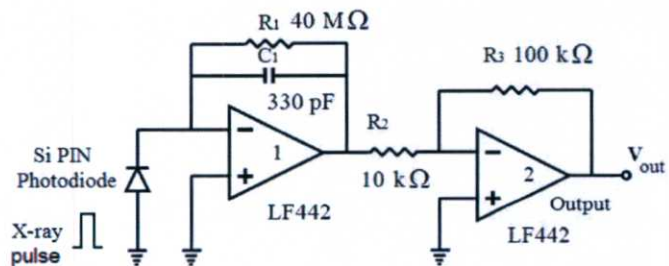
การทดสอบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่วัดกับรังสีเอ็กซ์จะมีการฉายรังสีเอ็กซ์ 2 วิธีคือ (1) การฉายวิธีตรง คือการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โดยตรง (2) การฉายรังสีเอ็กซ์โดยอ้อม คือการฉายรังสีเอ็กซ์ลงบนชั้นสารเรืองแสงไดอะแกรมการวัดการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ทั้งกรณีการฉายโดยตรงและโดยอ้อมแสดงดังรูปที่ 3.30



รูปที่ 3.30 โค้ดอะแกรมการฉาย และการวัดการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ (ก) การฉายวิธีตรง (ข) การฉายวิธีอ้อม

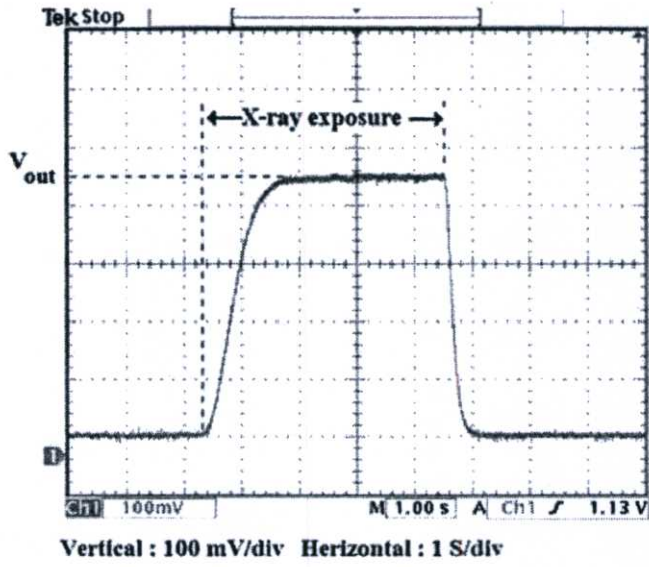
ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่สร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วจะถูกวัดวัดคุณสมบัติการตอบสนองทางแสง โดยแหล่งกำเนิดรังสีที่ใช้ได้จากหัวฉายรังสีเอ็กซ์ Asahi รุ่น G610S ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้า 10 mA และแรงดันหลอดรังสีเอ็กซ์คงที่ 60 kV

ในการทดสอบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่วัดกับรังสีเอ็กซ์ โดยตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ ในลักษณะแบบ Photovoltaic mode คือไม่มีการไบอัสย้อนกลับให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ โดยวงจรขยายภาคแรกจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสแสงที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยวงจรขยายสัญญาณมีอัตราขยาย 40mV/nA วงจรขยายภาคที่สองเป็นวงจรขยายแรงดันเพื่อขับออกที่เอาท์พุทโดยมีอัตราขยายเป็น 10 เท่า ในการทดลองใช้แหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์คือ หัวฉายรังสีเอ็กซ์ Asahi รุ่น G610S ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้า 10 mA และแรงดันหลอดรังสีเอ็กซ์คงที่ 60 kV



รูปที่ 3.31 การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

สุดท้ายเอาร์ทพุทจะถูกวัดด้วยออสซิลโคป ดังรูปที่ 3.32

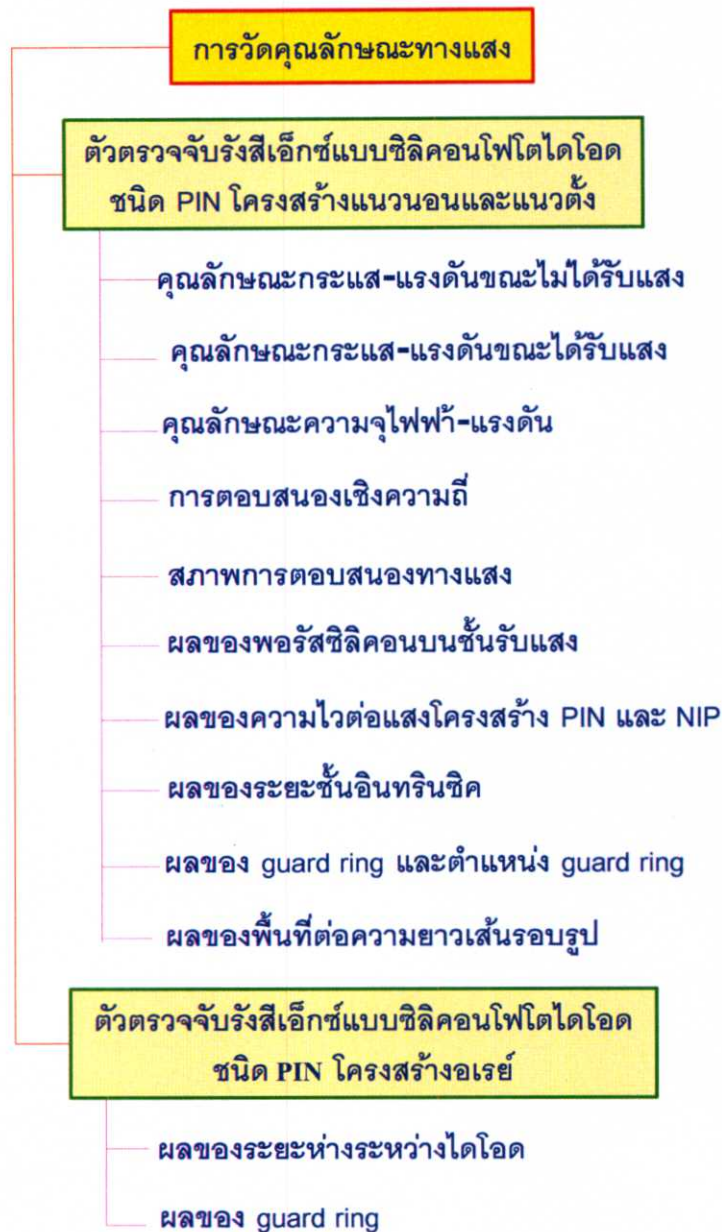


รูปที่ 3.32 รูปคลื่นสัญญาณแรงดันไฟฟ้าเอาร์ทพุท

บทที่ 4

ผลการทดลองทางแสงและการอภิปราย

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งและแนวนอน และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย โดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกดังแผนผังการทดลองรูปที่ 4.1 ดังนี้



รูปที่ 4.1 แผนผังการทดลองตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

การทดลองทางแสงในบทนี้กล่าวถึงการศึกษาดัชนีหักเหของวัสดุตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอนที่วัดกับแสงจากหลอดฮาโลเจน โดยผลการทดลองนำเสนอ (1) ผลการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า (2) ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า (3) การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอด (4) สภาพการตอบสนองทางแสง (5) ผลของพอร์ตซิลิคอนบนชั้นรับแสง (6) ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP (7) ผลของระยะชั้นอินทรีนซิก (8) ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง (9) ผลของพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงที่มีต่อความหนาแน่นกระแส (10) ผลของการ์ดริงที่มีต่อระยะห่างระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างเอช

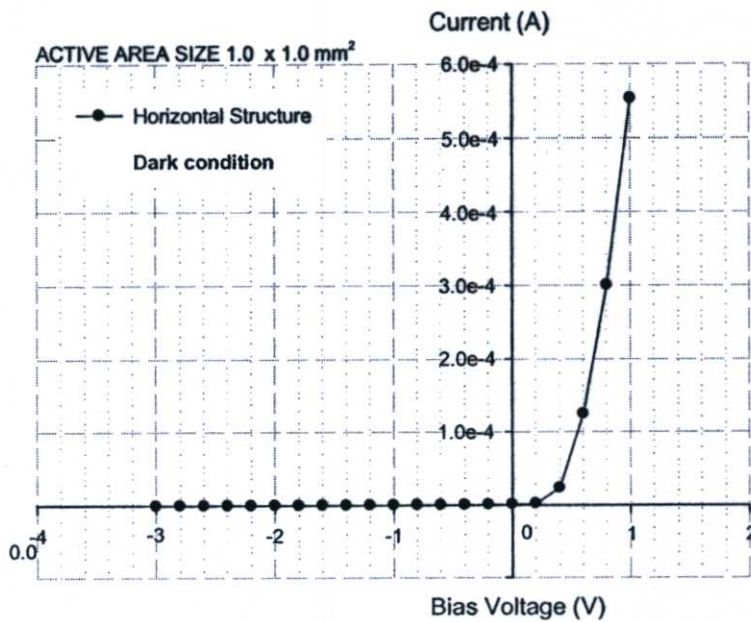
การศึกษาดัชนีหักเหของวัสดุตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอนโดยการวัดกับแสงนั้นถือเป็นพื้นฐานในการทดสอบว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นนั้นสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานกับรังสีเอ็กซ์ได้ โดยนำเสนอลักษณะสมบัติต่างๆที่สำคัญของซิลิคอนโฟโตไดโอด ดังนี้

4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง

การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น คือ การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งและแนวนอน ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและย้อนกลับ ทั้งในขณะที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสง เพื่อหาค่ากระแสแสงและกระแสมืดของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็ก โดยแหล่งกำเนิดแสงที่ใช้ได้จากแสงจากหลอดฮาโลเจน

4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนขณะที่ไม่ได้รับแสง

ผลการการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 4.2 จากกราฟจะเห็นได้ว่าตัวอุปกรณ์มีคุณสมบัติเรกติไฟร์ (rectifier) ซึ่งสามารถนำตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กไปใช้งานได้

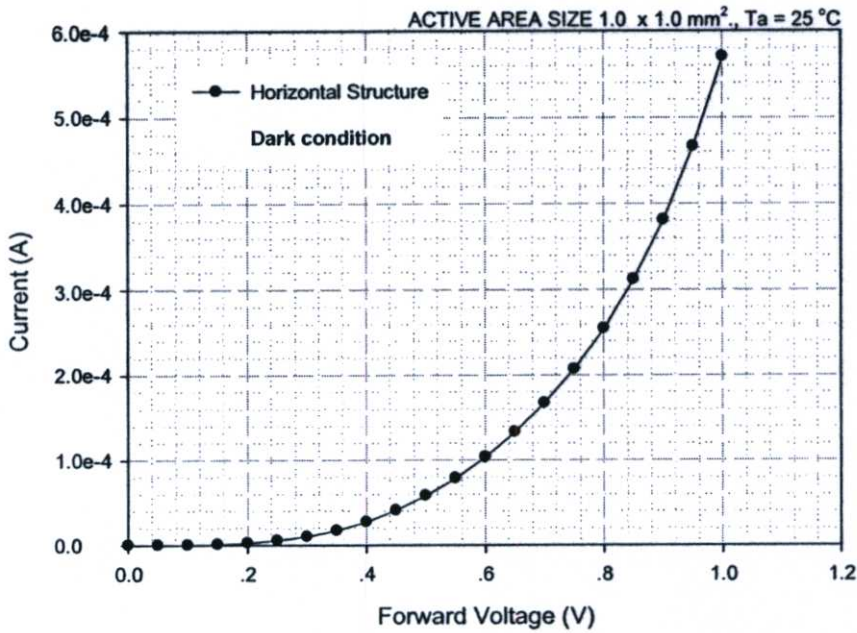


รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับ แรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ

ผลการการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำคั้งในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงแสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าเมื่อตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ได้รับแรงดันไบอัสตรง (forward bias) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในประมาณ 0.68 V ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน โดยการคำนวณด้วยสมการ (4.1) [30] ได้ดังนี้

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln \left[\frac{N_A N_D}{n_i^2} \right] \quad (4.1)$$

- โดยที่ k คือ ค่าคงที่โบสตันส์
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์
 q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
 N_A คือ ค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ
 N_D คือ ค่าความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้
 n_i คือ ค่าความหนาแน่นอินทรินซิก



รูปที่ 4.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวอนขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

เนื่องจากกรณีไดโอดเป็นรอยต่อ P⁺-N แบบชั้นบันได ซึ่ง $N_A \gg N_D$

ดังนั้นแทนค่า $\frac{kT}{q} = 0.0259$ โวลต์ $N_A = 10^{19}$ อะตอม/ลบ.ซม. $N_D = 2.5 \times 10^{12}$ อะตอม/ลบ.ซม.

และ $n_i = 1 \times 10^{10}$ อะตอม/ลบ.ซม. ในสมการ (4.1) จะได้

$$V_{bi} = (0.0259) \ln \left[\frac{(10^{19})(2.5 \times 10^{12})}{10^{20}} \right] = 0.68 \text{ โวลต์}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเท่ากับ 0.68 โวลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.3

นอกจากนี้แล้ว กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง สามารถใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวที่ไหลผ่านโฟโตไดโอด โดยเขียนกราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.4 โดยอาศัยสมการของช็อกเคิลีย์ (Shockley's equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไบอัสของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ได้ดังนี้

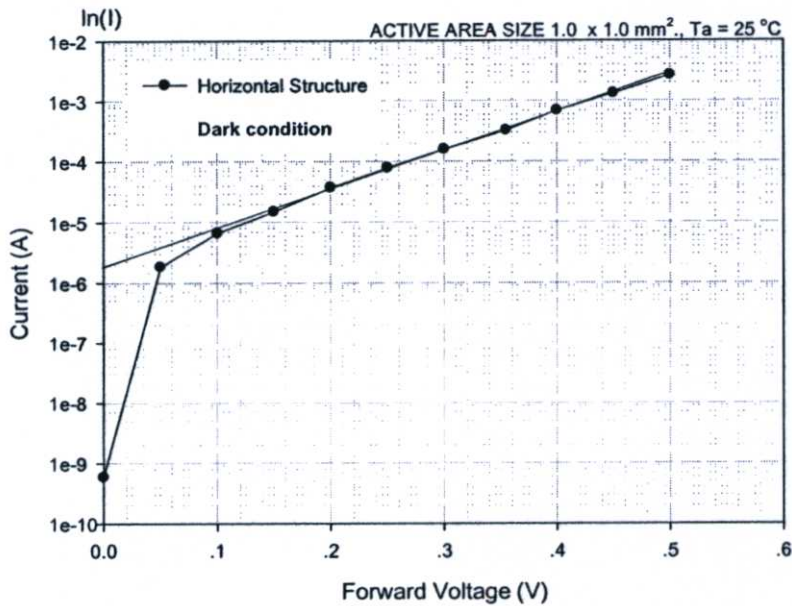
$$I = I_0 (e^{qV_A / kT} - 1) \quad (4.2)$$

จากสมการ (4.2) ในกรณีที่ $V_A > \frac{kT}{q}$ เช่นที่อุณหภูมิห้อง $T = 300 \text{ K}$ จะได้ว่า $\frac{kT}{q} = 0.0259$ โวลต์ ซึ่งมีค่าน้อยมาก ดังนั้น สมการ (4.2) อาจเขียนโดยประมาณเป็น

$$I \approx I_0 e^{qV_A/kT} \quad (4.3)$$

และ

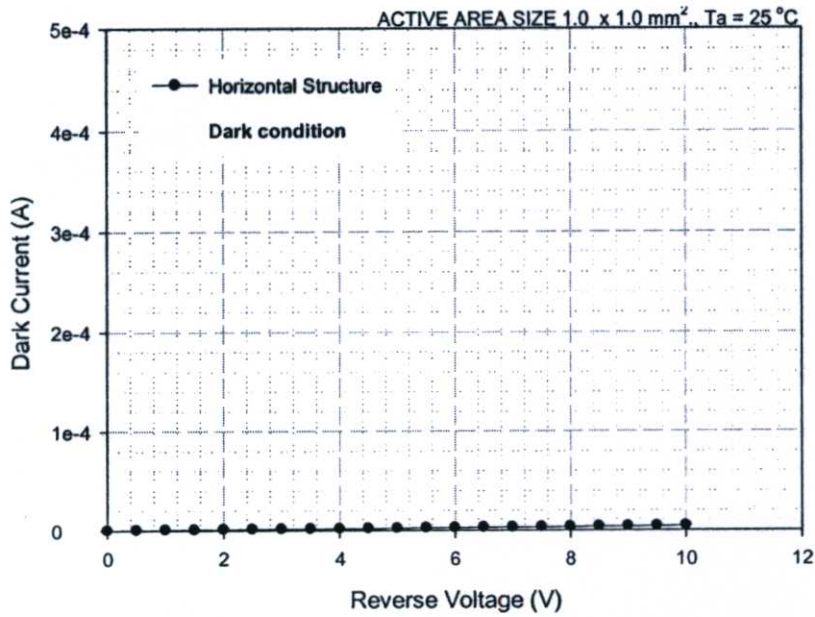
$$\ln(I) \approx \ln(I_0) + \frac{qV_A}{kT} \quad (4.4)$$



รูปที่ 4.4 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดัน ไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวอนขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

จากสมการ (4.4) จะเห็นว่าที่ $V_A > 0$ บนกราฟกึ่งล็อก (semi-log) ระหว่าง $\ln(I)$ และ V_A จะปรากฏย่านที่เป็นช่วงเชิงเส้น โดยเส้นตรงนี้จะตัดแกนกระแส I ที่ I_0 ดังแสดงในรูปที่ 4.4 พบว่ากระแสอิ่มตัวที่อ่านได้ประมาณ $2 \mu\text{A}$

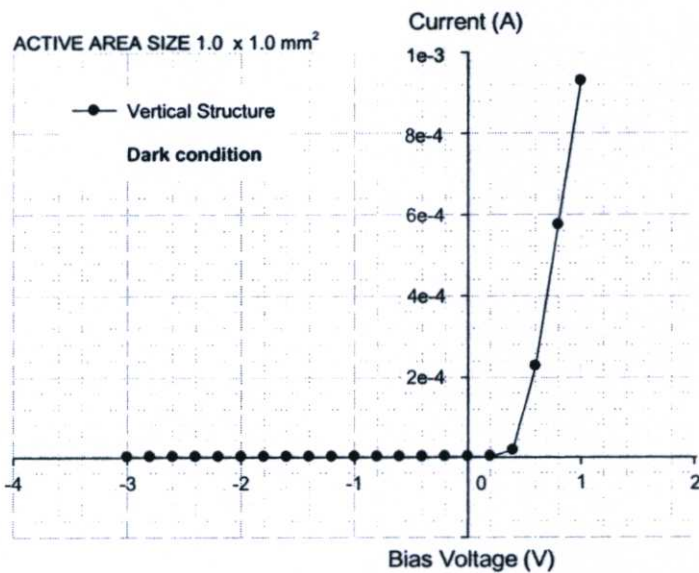
เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวอนที่สมบูรณ์ รูปที่ 4.5 แสดงกราฟสมบัติกระแส-แรงดัน ไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดขณะที่ไม่ได้รับแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) พบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 5 V และ 10 V มีค่ากระแสมืดเท่ากับ $2.23 \mu\text{A}$ และ $4.39 \mu\text{A}$ ตามลำดับ สังเกตเห็นว่ากระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสย้อนกลับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้โฟโตไดโอดมากขึ้น มีผลให้ความกว้างบริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กระแสมืดเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพราะกระแสมืดส่วนใหญ่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ



รูปที่ 4.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

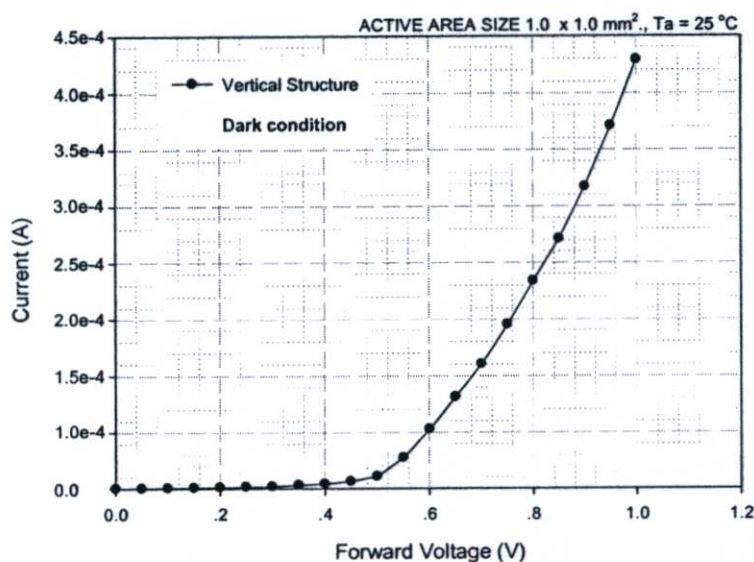
4.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งขณะที่ไม่ได้รับแสง

ผลการการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบแนวตั้ง ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดังแสดงในรูปที่ 4.6 จากกราฟจะเห็นได้ว่าตัวอุปกรณ์มีคุณสมบัติเรกติไฟร์ (rectifier) ซึ่งสามารถนำซิลิคอน โฟโตไดโอดไปใช้งานได้



รูปที่ 4.6 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับ แรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ

ผลการการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดังในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงแสดงดังรูปที่ 4.7 จะเห็นได้ว่าเมื่อชิลิกอนโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสตรง (forward bias) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเท่ากับ 6.2 V ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน โดยการคำนวณด้วยสมการที่ 4.1 ได้ดังนี้



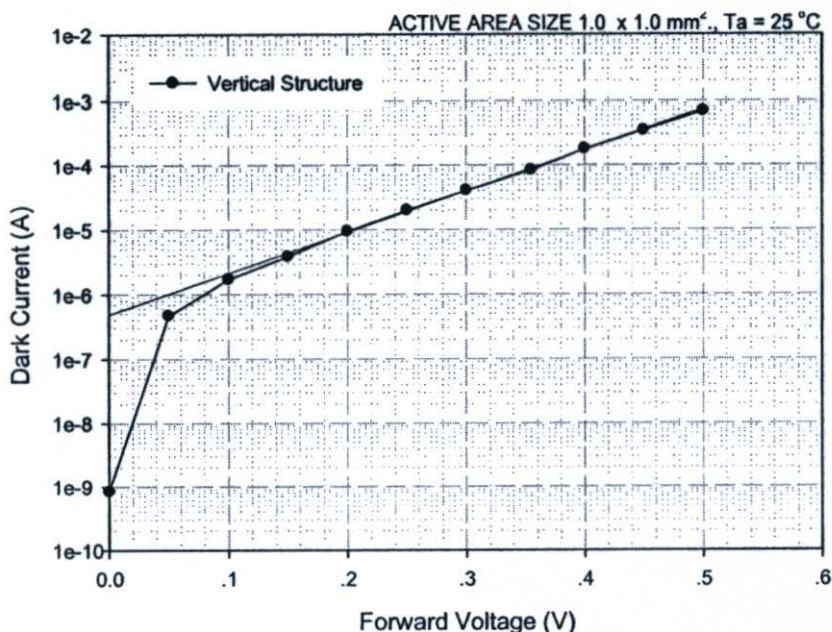
รูปที่ 4.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

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 $n_i = 1 \times 10^{10}$ อะตอม/ลบ.ซม. ในสมการ (4.1) จะได้

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

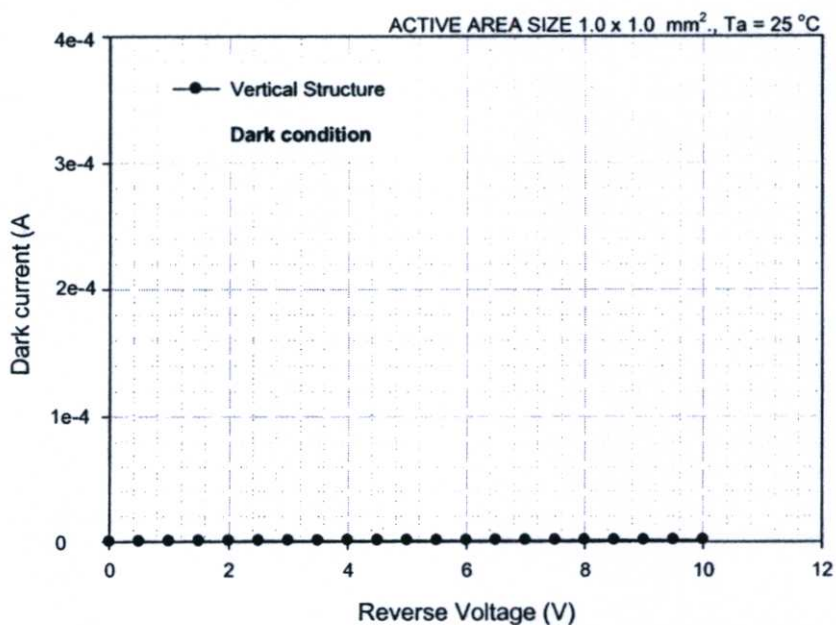
จากการคำนวณพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเท่ากับ 0.62 โวลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.7

นอกจากนี้แล้ว กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง สามารถใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวที่ไหลผ่านโฟโตไดโอด โดยเขียนกราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้า โดยอาศัยสมการ (4.4) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไบอัสของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวอนขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

จากสมการ (4.4) จะเห็นว่าที่ $V_A > 0$ บนกราฟกึ่งล็อก (semi-log) ระหว่าง $\ln(I)$ และ V_A จะปรากฏย่านที่เป็นช่วงเชิงเส้น โดยเส้นตรงนี้จะตัดแกนกระแส I ที่ I_0 ดังแสดงในรูปที่ 4.8 พบว่ากระแสอิ่มตัวที่อ่านได้ประมาณ 0.55 μA

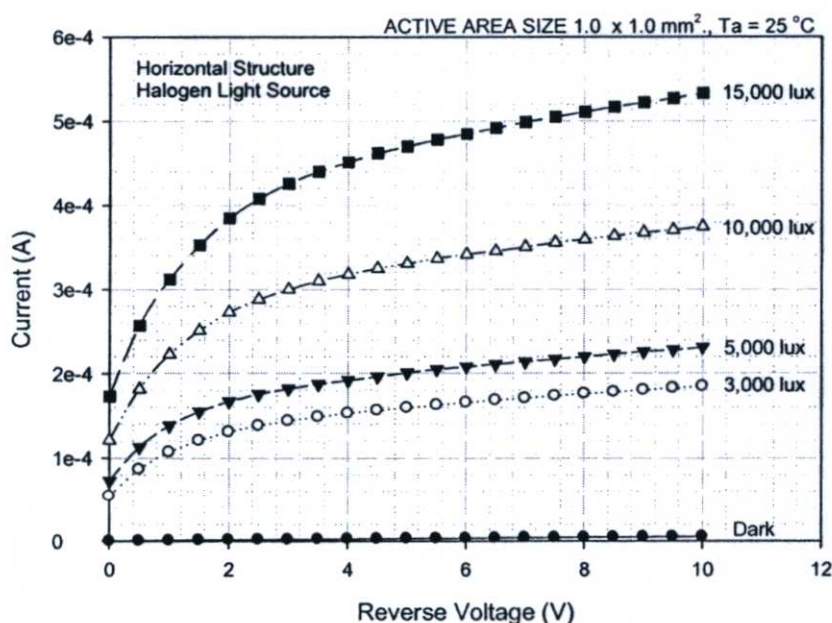


รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบ แนวตั้งที่สมบูรณ์ รูปที่ 4.9 แสดงกราฟสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดขณะ ไม่ได้รับแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) พบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 5 V และ 10 V มีค่ากระแสมืดเท่ากับ 1.03 μA และ 1.41 μA ตามลำดับ สังเกตเห็นว่ากระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสย้อนกลับ ด้วยเหตุผลที่กล่าวไปแล้วข้างต้น

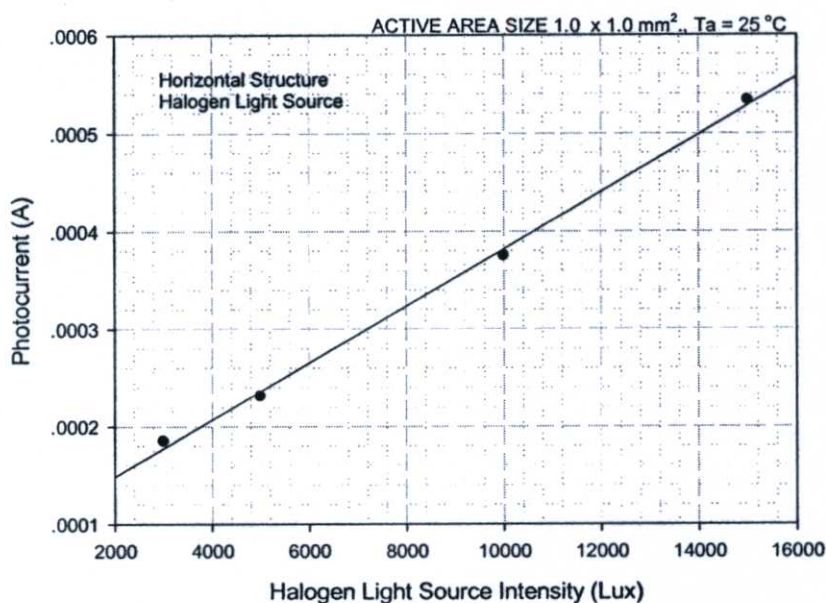
4.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน ขณะที่ได้รับแสง

การทดสอบคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดเพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสง โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณลักษณะสารกึ่งตัวนำ HP รุ่น 4061A และใช้หลอดฮาโลเจนที่สามารถเปลี่ยนความเข้มแสงค่าต่างๆ ได้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ สำหรับลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสงความเข้มค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.10 เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 10 V ความเข้มแสง 15,000 lux พบว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้ 530 μA และเมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากเมื่อความเข้มแสงที่ค่ามากขึ้น ปริมาณโฟตอนจะมากขึ้นตามไปด้วย ส่งผลให้อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล สูงขึ้น



รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอนขณะที่ได้รับแสง และไม่ได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

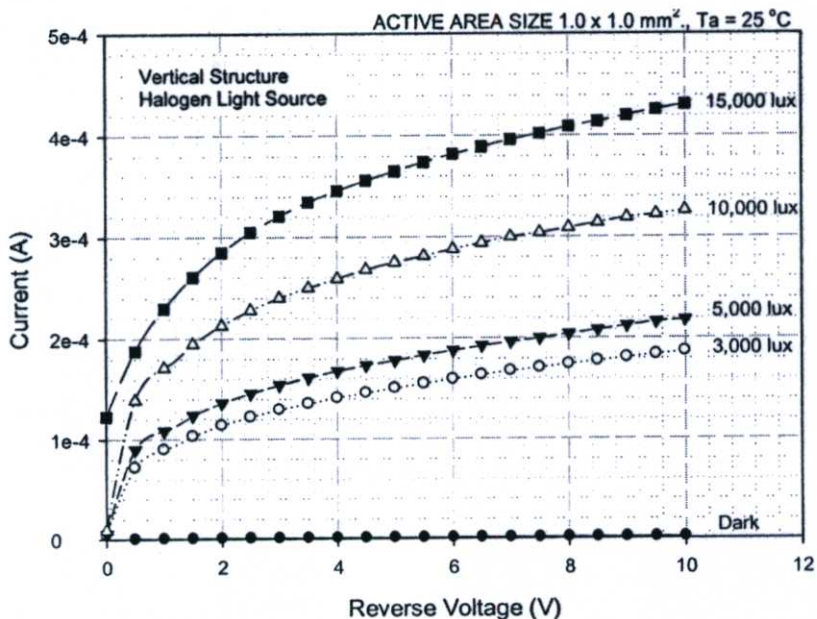
นอกจากนี้ยังพบว่าที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ กระแสแสงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มแสงดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสงที่ดี



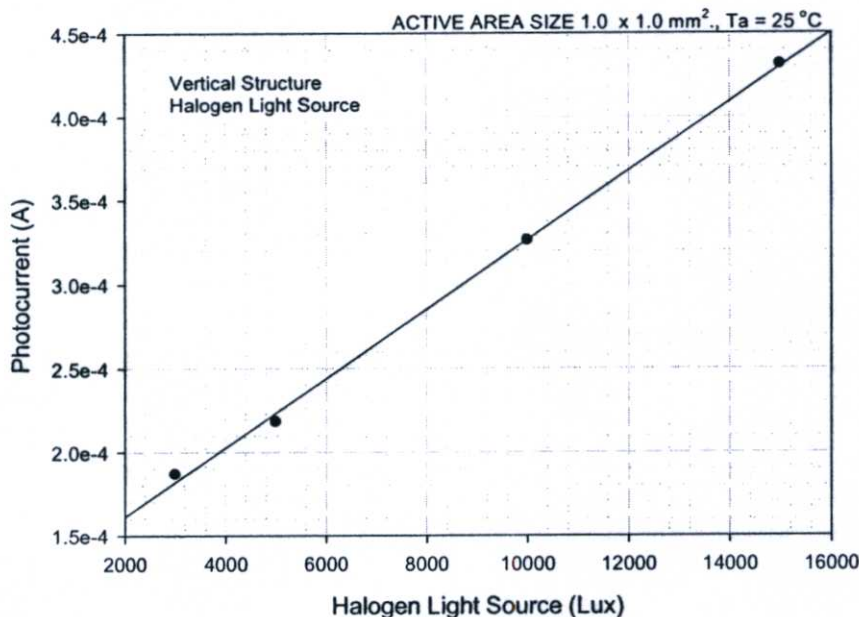
รูปที่ 4.11 การเปลี่ยนแปลงกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอน ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

4.1.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ได้รับแสง

การทดสอบคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดเพื่อหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสง โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์คุณลักษณะสารกึ่งตัวนำ HP รุ่น 4061A และใช้หลอดฮาโลเจนที่สามารถเปลี่ยนความเข้มแสงค่าต่างๆได้เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้แก่อุปกรณ์ สำหรับลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดขณะที่ได้รับแสงความเข้มค่าต่างๆแสดงดังรูปที่ 4.12 เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 10 V ความเข้มแสง 15,000 lux พบว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้ 430 μ A พบว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอน เมื่อได้รับแสงที่มีความเข้มแสงเพิ่มขึ้น ซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถจ่ายกระแสแสงได้สูงขึ้นตามไปด้วย จากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น นอกจากนี้ยังพบว่าที่การเปลี่ยนแปลงของกระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ กระแสแสงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มแสงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งเป็นคุณสมบัติของตัวตรวจจับแสงที่ดี



รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ได้รับแสง และไม่ได้รับแสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ



รูปที่ 4.13 การเปลี่ยนแปลงกระแสแสงซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ

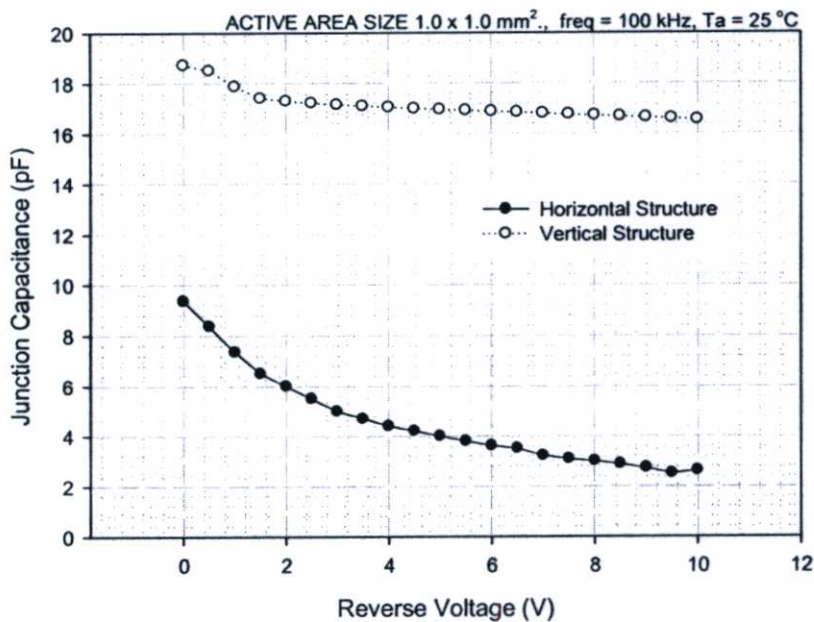
4.1.5 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนและแนวตั้ง

เปรียบเทียบกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้ง พบว่ากระแสแสงที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนมีค่ามากกว่ากระแสแสงที่

ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โดยโครงสร้างแนวนอนมีค่ากระแสแสง 530 μA ขณะที่โครงสร้างแนวตั้งมีค่า 430 μA ที่ความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ เนื่องจากแสงฮาโลเจนเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น ทำให้ชิ้นสารกึ่งตัวนำดูดกลืนแสงฮาโลเจนมากที่บริเวณผิว ส่งผลให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ซึ่งมีบริเวณปกคลุมผิวที่ผิวด้านบนมากกว่าโครงสร้างแนวตั้งสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่า อย่างไรก็ตาม กระแสมืดของโครงสร้างแนวนอนก็มีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวตั้งด้วยเช่นกัน โดยโครงสร้างแนวนอนมีค่ากระแสมืด 2 μA ขณะที่โครงสร้างแนวตั้งมีค่า 0.55 μA เนื่องจากกระแสมืดส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 ซึ่งที่ผิวด้านบนนั้นพื้นที่ผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO_2 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวตั้ง

4.2 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้งดังรูปที่ 4.14



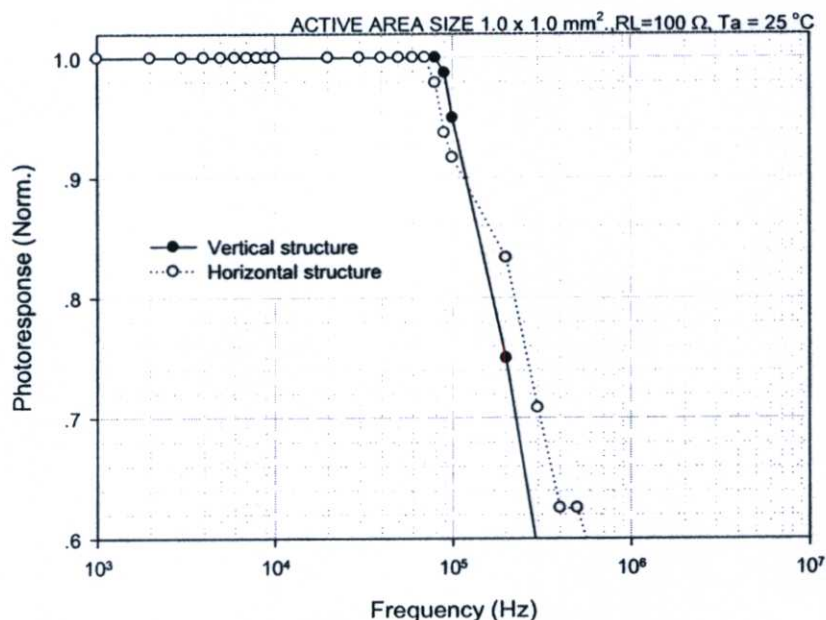
รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง

ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะลดลงเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น โดยที่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนมีค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อต่ำกว่าโครงสร้างแนวตั้ง ในกรณี PIN ทั้งโครงสร้างแนวนอนและแนวตั้งนั้น จะเกิดความจุไฟฟ้า 2

รอยต่อคือ รอยต่อ P^+i และรอยต่อ N^+i แต่เมื่อพิจารณา PIN โครงสร้างแนวนอนนั้น แม้ว่าพื้นที่ รอยต่อ P^+i จะเท่ากับ PIN โครงสร้างแนวตั้ง แต่พื้นที่รอยต่อ N^+i จะมีค่าน้อยกว่า PIN โครงสร้าง แนวตั้ง และจากสมการ (3.6) เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่รอยต่อ ดังนั้นตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้งซึ่งมีพื้นที่รอยต่อมากกว่า โครงสร้างแนวนอน มีผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนต่ำกว่าตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโต ไดโอด โครงสร้างแนวตั้ง

4.3 การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด

การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นดัชนีชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์การใช้งานตัว ตรวจจับสนธิเอ็กซ์ในส่วนของความเร็วในการทำงาน และเชื่อมโยงไปถึงแบนด์วิธของอุปกรณ์ ดังนั้นหัวข้อนี้จะศึกษาผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยการป้อนความถี่ค่าต่างๆเข้ากับแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm. กำลังงาน 3 mW ส่งผ่าน ไปยังตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่ถูกต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และป้อนแรงดัน ไบอัสย้อนกลับไว้ และวัดสัญญาณเอาท์พุทจากออสซิลอสโคป จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเอาท์พุท ที่ถูกนอร์มอลไลซ์เพื่อเขียนกราฟการตอบสนองเชิงความถี่



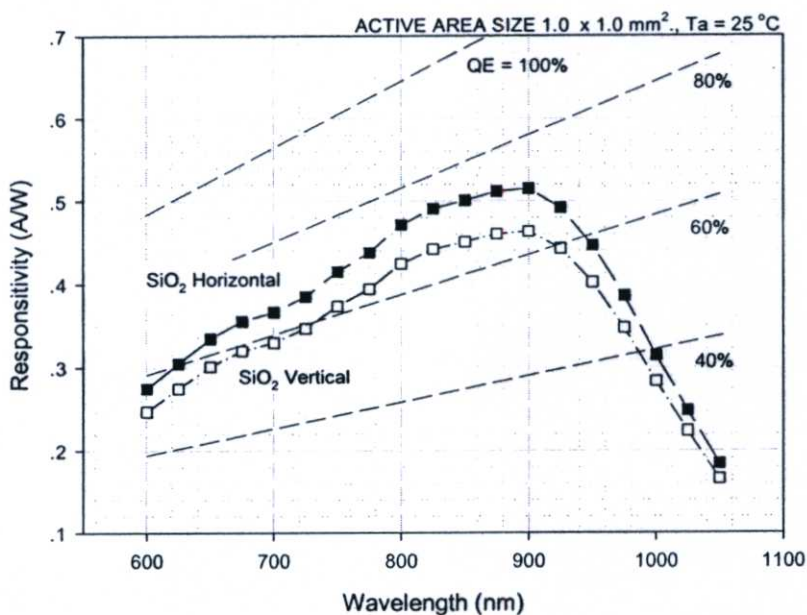
รูปที่ 4.15 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้าง แนวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง

รูปที่ 4.15 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโต ไดโอด เมื่อต่อ โหลดความต้านทานอนุกรม 100 Ω ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ เปรียบเทียบ

ระหว่างของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนและแนวตั้งพบว่าความถี่คัทออฟของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้งมีค่าประมาณ 220 kHz ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนซึ่งมีค่าประมาณ 300 kHz ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้ารอกต่อของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้งมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวนอนนั่นเอง

4.4 การวัดสภาพตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะถูกนำไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน $1\text{ k}\Omega$ และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ กระแสแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์หาด้วยวิธีโดยอ้อมจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จากนั้นนำไปหาค่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ต่อไป แหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้อุปกรณ์ ใช้หลอดทั้งสแตน ส่งผ่าน monochromator ของ Nikon รุ่น G250 เพื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นแสง โดยความยาวคลื่นแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 600-1,050 nm



รูปที่ 4.16 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และ โครงสร้างแนวตั้ง

รูปที่ 4.16 แสดงผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และ โครงสร้างแนวตั้ง ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ สภาพตอบสนองจะเพิ่มตามความยาวคลื่น และมีค่าสูงสุดที่ความยาวคลื่น 900 nm โดยที่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนจะมีสภาพการตอบสนองสูงกว่าโครงสร้างแนวตั้ง 5% ซึ่งตัว

ตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนมีประสิทธิภาพควอนตัม 71% และโครงสร้างแนวตั้งมีประสิทธิภาพควอนตัม 67.46% ที่ความยาวคลื่น 900 nm เนื่องจากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอน มีบริเวณปลอดพาหะบริเวณผิวมากกว่าโครงสร้างแนวตั้ง อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสภาพการตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และโครงสร้างแนวตั้ง จะพบว่า สภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมในความยาวช่วงคลื่น 900-1,050 nm มีการเพิ่มน้อยกว่าในความยาวคลื่นช่วง 600-900 nm เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนนั้นมีพื้นบริเวณพาหะบริเวณผิวมากกว่าโครงสร้างแนวตั้ง ทำให้โฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนสามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นสั้นได้ดีกว่าแสงที่มีความยาวคลื่นยาว

4.5 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิด PIN ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง

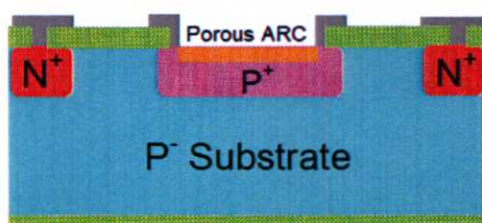
การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของพอร์สซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ที่บนชั้นรับแสง ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอน โฟโตไดโอด

4.5.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง

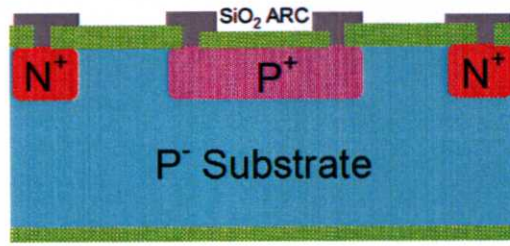
การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเบื้องต้น คือ การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งและแนวนอน ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงในขณะที่ได้ไม่ได้รับแสง เพื่อหาค่ากระแสกระแสอิ่มตัวของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

4.5.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงขณะที่ไม่ได้รับแสง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงชนิดพีที่เข้มข้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน ระยะชั้นอินทรีนซิคคองที่ $250 \text{ }\mu\text{m}$. และมีชั้นเอ็นเข้มข้นล้อมรอบพื้นที่รับแสงชนิดพี โดยมีชั้นลดการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสงแสดงดังรูปที่ 4.17



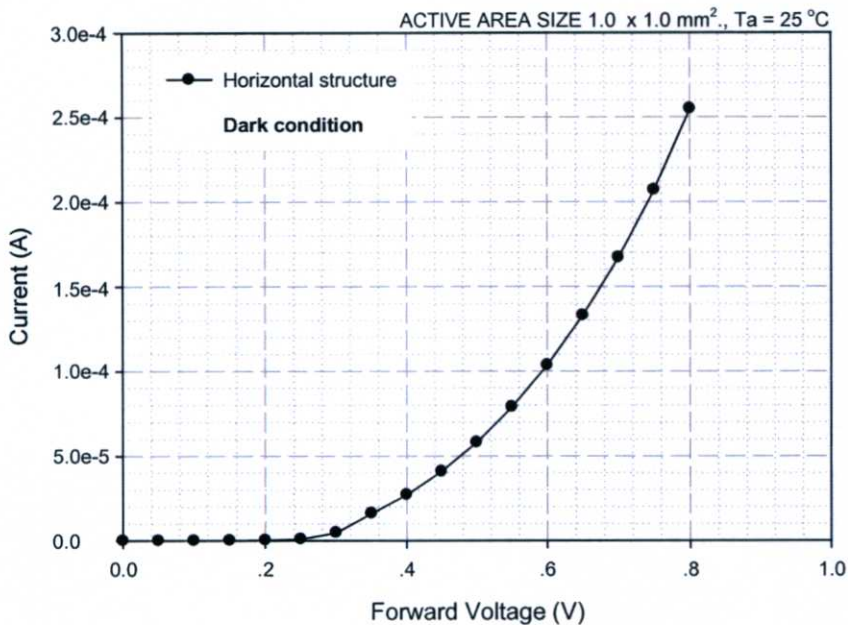
(ก)



(ก)

รูปที่ 4.17 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน (ก) พอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง (ข) ซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง

ผลการการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดังในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงแสดงดังรูปที่ 4.18 จะเห็นได้ว่าเมื่อตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้รับแรงดันไบอัสตรง (forward bias) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในประมาณ 0.6 V ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน โดยการคำนวณด้วยสมการ (4.1)



รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

เนื่องจากกรณีไดโอดเป็นรอยต่อ P⁺-N แบบชั้นบันได ซึ่ง $N_A \gg N_D$

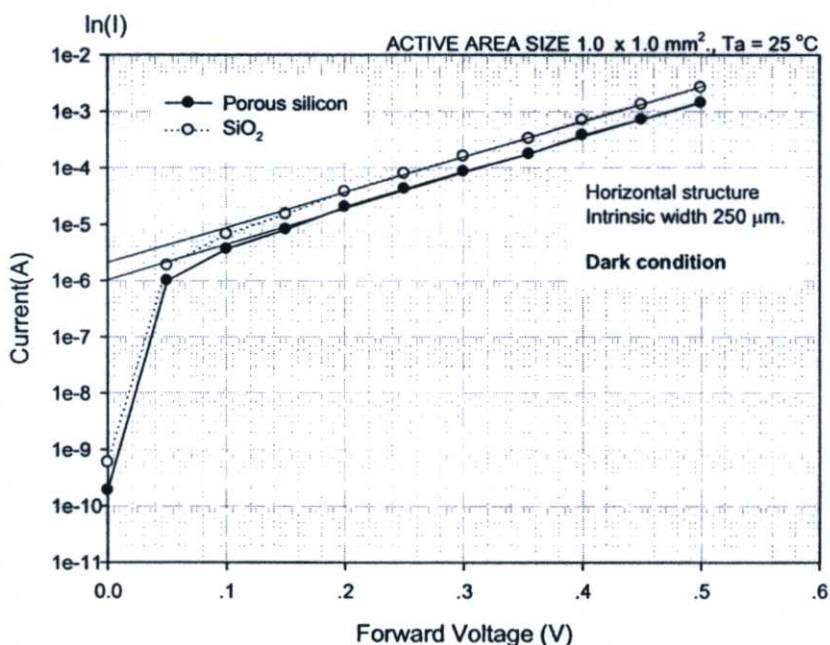
แทนค่า $\frac{kT}{q} = 0.0259$ โวลต์ $N_A = 10^{18}$ อะตอม/ลบ.ซม. $N_D = 2.5 \times 10^{12}$ อะตอม/ลบ.ซม. และ

$n_i = 1 \times 10^{10}$ อะตอม/ลบ.ซม. ในสมการ (4.1) จะได้

$$V_{bi} = (0.0259) \ln \left[\frac{(10^{19})(2.5 \times 10^{12})}{10^{20}} \right] = 0.68 \text{ โวลต์}$$

จากการคำนวณพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเท่ากับ 0.68 โวลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.18

นอกจากนี้แล้ว กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง สามารถใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวที่ไหลผ่านโฟโตไดโอด โดยเขียนกราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.19 โดยอาศัยสมการของช็อกเคิลีย์ (Shockley's equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไบอัสของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 4.19



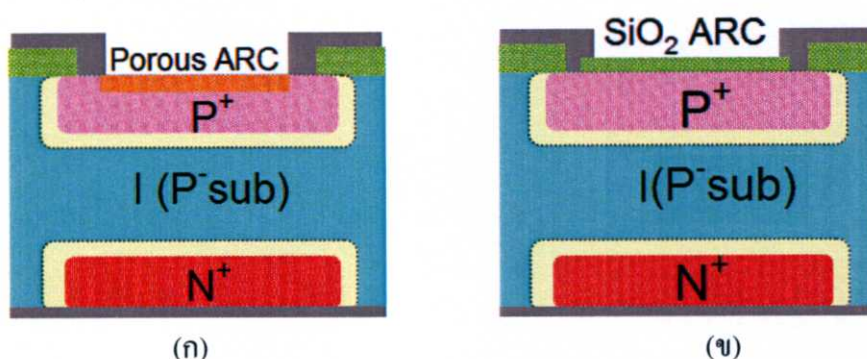
รูปที่ 4.19 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

จากสมการ (4.4) จะเห็นว่าที่ $V_A > 0$ บนกราฟกึ่งล็อก (semi-log) ระหว่าง $\ln(I)$ และ V_A จะปรากฏย่านที่เป็นช่วงเชิงเส้น โดยเส้นตรงนี้จะตัดแกนกระแส I ที่ I_0 เมื่อเปรียบเทียบกับกระแสอิ่มตัวของพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่ากระแสอิ่มตัวของพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอนมีค่า $1 \mu\text{A}$ ซึ่งน้อยกว่าพื้นที่รับแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากบริเวณพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอนไม่มีรอยสัมผัส Si/SiO₂ จึงทำให้

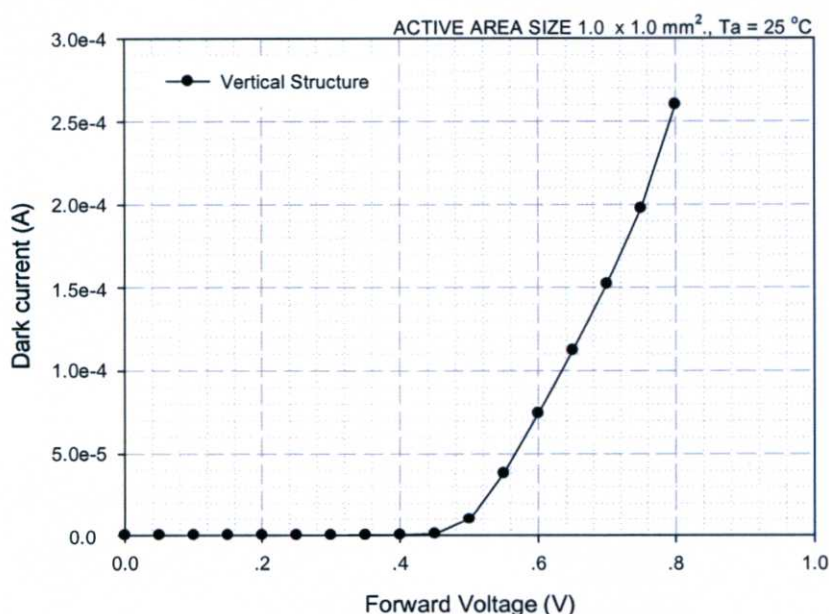
กระแสอิ่มตัวที่เกิดจากอะตอมแปลกปลอมลดลง นอกจากนี้พอร์สซิลิคอนยังมีแถบพลังงานที่กว้างกว่าซิลิคอนซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้กระแสอิ่มตัวมีค่าลดลง

4.5.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงขณะที่ไม่ได้รับแสง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากันทุกตัว โดยมีขั้นตอนการสะท้อนแสงแบบพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีชั้นรับแสงแบบพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์แสดงดังรูปที่ 4.20



รูปที่ 4.20 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีชั้นรับแสงแบบต่างๆ (ก) พอร์สซิลิคอน (ข) ซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

ผลการการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำดังในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงแสดงดังรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าเมื่อตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ได้รับแรงดันไบอัสตรง (forward bias) พบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในประมาณ 0.6 V ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณค่าศักย์ไฟฟ้าภายใน โดยการคำนวณด้วยสมการ (4.1)

เนื่องจากกรณีไดโอดเป็นรอยต่อ P⁺-N แบบชั้นบนโด ซึ่ง $N_A \gg N_D$

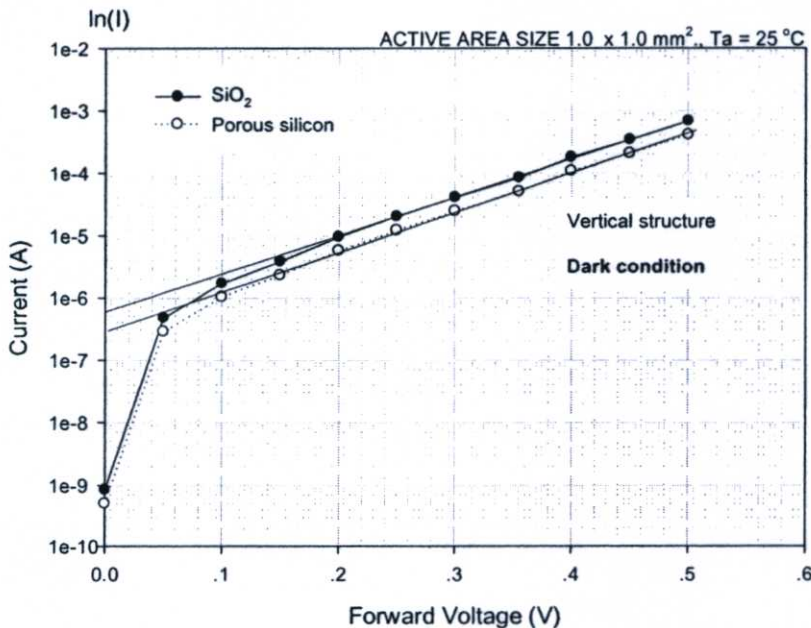
แทนค่า $\frac{kT}{q} = 0.0259$ โวลต์ $N_A = 10^{18}$ อะตอม/ลบ.ซม. $N_D = 2.5 \times 10^{12}$ อะตอม/ลบ.ซม. และ

$n_i = 1 \times 10^{10}$ อะตอม/ลบ.ซม. ในสมการ (4.1) จะได้

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

จากการคำนวณพบว่าค่าศักย์ไฟฟ้าภายในเท่ากับ 0.62 โวลต์ ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ในรูปที่ 4.21

นอกจากนี้แล้ว กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง สามารถใช้หาค่ากระแสอิ่มตัวที่ไหลผ่านโฟโตไดโอด โดยเขียนกราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 4.22 โดยอาศัยสมการของช็อกเคิลีย์ (Shockley's equation) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันไบอัสของไดโอดรอยต่อพี-เอ็น ดังรูปที่ 4.22

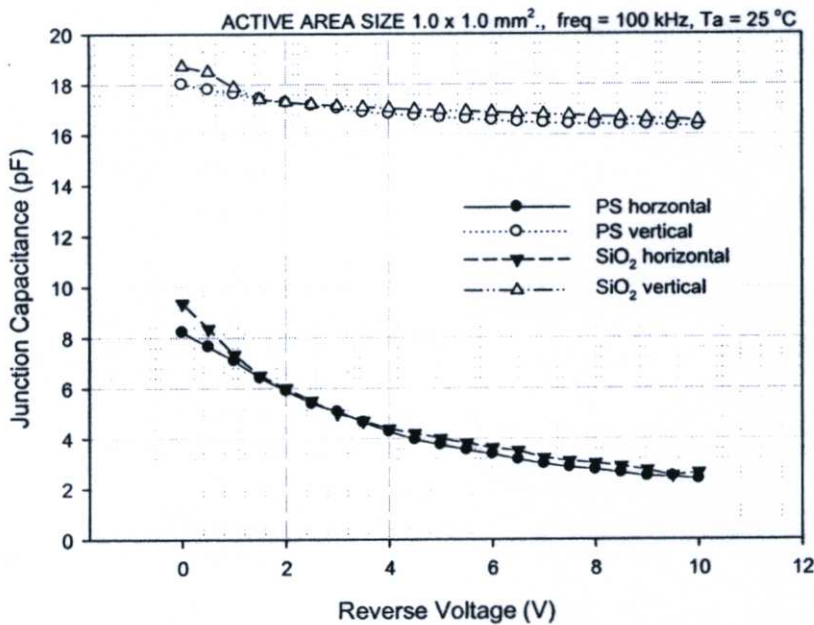


รูปที่ 4.22 กราฟลักษณะสมบัติกระแสแบบกึ่งล็อก-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ขณะที่ไม่ได้รับแสง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

จากสมการ (4.4) จะเห็นว่าที่ $V_A > 0$ บนกราฟกึ่งล็อก (semi-log) ระหว่าง $\ln(I)$ และ V_A จะปรากฏย่านที่เป็นช่วงเชิงเส้น โดยเส้นตรงนี้จะตัดแกนกระแส I ที่ I_0 เมื่อเปรียบเทียบกระแสอิ่มตัวของพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่ากระแสอิ่มตัวของพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอนมีค่า $0.2 \mu\text{A}$ ซึ่งน้อยกว่าพื้นที่รับแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากบริเวณพื้นที่รับแสงแบบพอร์สซิลิคอนไม่มีรอยสัมผัส Si/SiO_2 จึงทำให้กระแสอิ่มตัวที่เกิดจากอะตอมแปลกปลอมลดลง นอกจากนี้พอร์สซิลิคอนยังมีแถบพลังงานที่กว้างกว่าซิลิคอนซึ่งเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ทำให้กระแสอิ่มตัวมีค่าลดลง

4.5.2 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง

ในหัวข้อนี้นำเสนอผลการวัดลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ โดยเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงดังรูปที่ 4.23



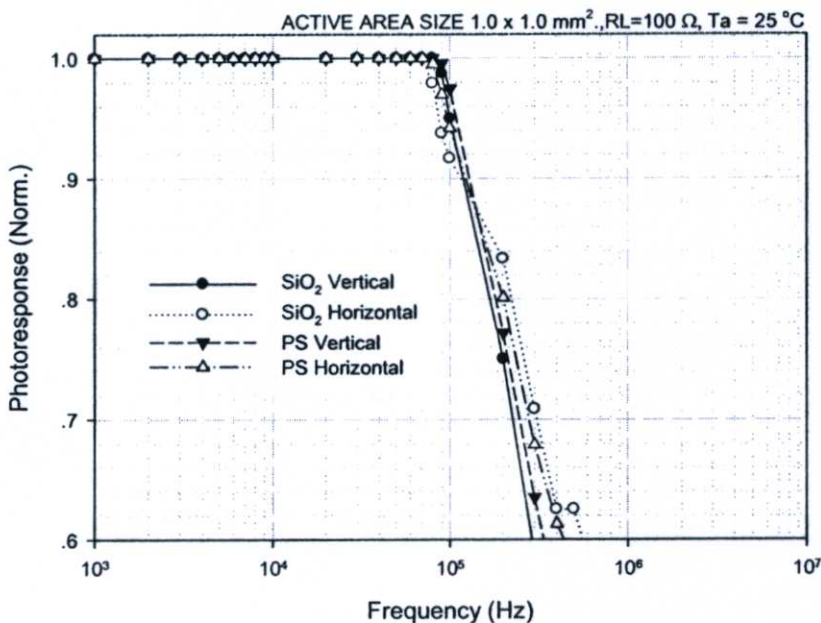
รูปที่ 4.23 ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนและ โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง

ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงจะลดลงเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง โดยที่ค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ทั้งสอง โครงสร้างนั้นมีค่าใกล้เคียงกัน

เนื่องจากค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าแปรผันตรงกับพื้นที่รอยต่อ ดังนั้นตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้งซึ่งมีพื้นที่รอยต่อมากกว่าโครงสร้างแนวนอน มีผลให้ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนต่ำกว่าตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้ง

4.5.3 การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง

การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นตัวบ่งชี้ถึงความสามารถในการประยุกต์การใช้งานตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในส่วนของความเร็วในการทำงาน และเชื่อมโยงไปถึงแบนด์วิธของอุปกรณ์ ดังนั้นหัวข้อนี้จะศึกษาผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยการป้อนความถี่ค่าต่างๆเข้ากับแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 670 nm กำลังงาน 3 mW ส่งผ่านไปยังตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ถูกค่ออนุกรมกับตัวต้านทาน และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับไว้ และวัดสัญญาณเอาต์พุตจากออสซิลอสโคป จากนั้นนำค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ถูกนอร์มอไลซ์เพื่อเขียนกราฟการตอบสนองเชิงความถี่



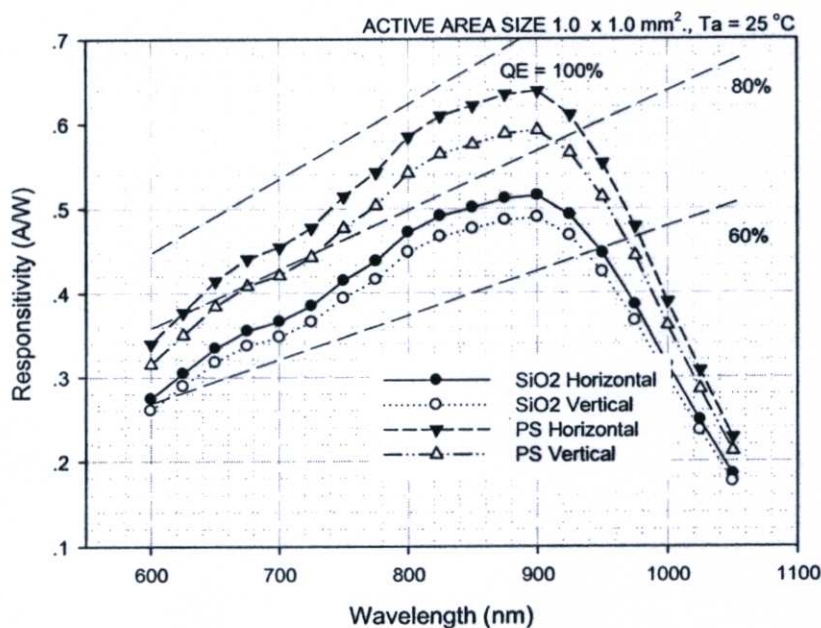
รูปที่ 4.24 ผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนและ โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง

รูปที่ 4.24 แสดงผลตอบสนองเชิงความถี่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด เมื่อต่อโหลดความต้านทานอนุกรม 100 Ω ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ เปรียบเทียบ

ระหว่างของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนและแนวตั้งพบว่าความถี่คutoffของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอน และโครงสร้างแนวตั้งนั้น มีค่าใกล้เคียงกันโดยตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงมีค่าประมาณ 240 kHz ซึ่งมีค่าน้อยกว่าตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงซึ่งมีค่าประมาณ 280 kHz ทั้งนี้เนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้ารอยต่อของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้งมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวนอนนั่นเอง

4.5.4 การวัดสภาพตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสง

เพื่อศึกษาผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์จะถูกนำไปต่ออนุกรมกับตัวต้านทาน 1 k Ω และป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ กระแสแสงของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์หาด้วยวิธีโดยอ้อมจากแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน จากนั้นนำไปหาค่าสภาพตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์ต่อไป แหล่งกำเนิดแสงที่ป้อนให้อุปกรณ์ ใช้หลอดทังสเตน ส่งผ่าน monochromator ของ Nikon รุ่น G250 เพื่อเปลี่ยนความยาวคลื่นแสง โดยความยาวคลื่นแสงที่ใช้อยู่ในช่วง 600-1,050 nm

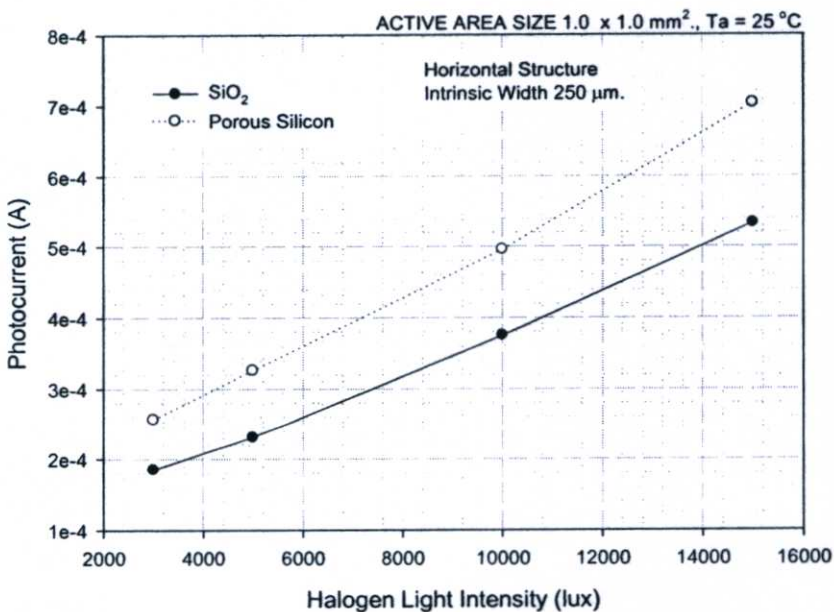


รูปที่ 4.25 ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับสนธิเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน และ โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสง

รูปที่ 4.25 แสดงผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ ที่ความยาวคลื่น 900 nm ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนจะมีสภาพการตอบสนองสูงกว่าโครงสร้างแนวตั้ง 7.2 % ซึ่งตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนมีประสิทธิภาพควอนตัม 88% และโครงสร้างแนวตั้งมีประสิทธิภาพควอนตัม 81.62% ผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงมีค่ามากกว่าแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์ 24% และผลตอบสนองเชิงสเปกตรัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงมีค่ามากกว่าแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์ 21% เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนแสงสูง นอกจากนี้ยังมีกระบวนการหักเหน้อยกว่าซิลิคอนไดออกไซด์

4.5.5 ผลของพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน

รูปที่ 4.26 เปรียบเทียบกระแสแสงที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง และแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V พบว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าชั้นลดการสะท้อนแสงแบบซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่าง 28 – 32% ที่ค่าความเข้มแสงจากหลอดฮาโลเจน 3,000 – 15,000 ลักซ์ ทั้งนี้เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้พอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ส่งผลให้แสงมีการสะท้อนน้อยลง อีกทั้งพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนหรือดักจับแสง (light trapping) ได้ดี [3] อีกด้วย

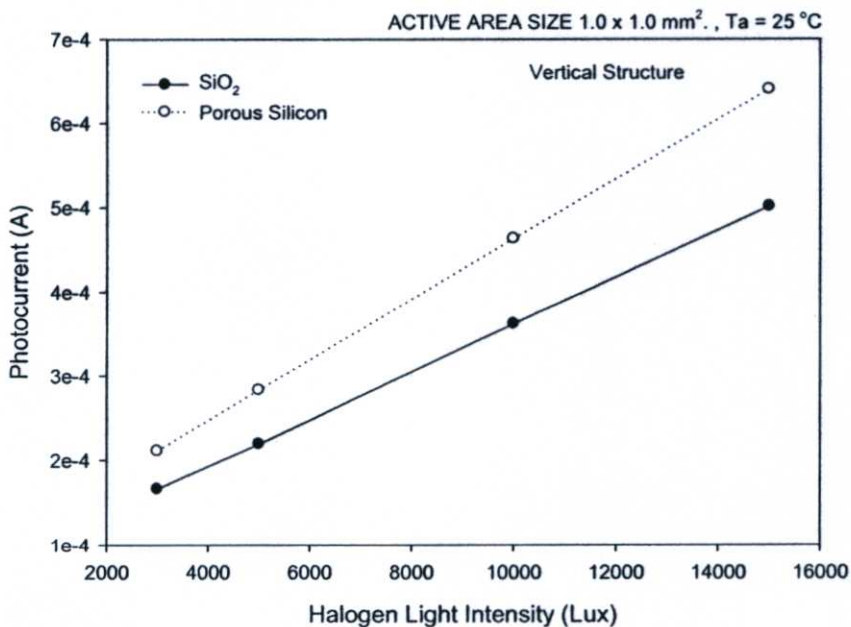


รูปที่ 4.26 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง

ถึงแม้ว่ากระแสแสงของซิลิคอน โฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนมีค่ามากกว่ากระแสแสงของซิลิคอน โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แต่สังเกตเห็นได้ว่ากระแสแสงของทั้งสองโครงสร้างนี้จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง

4.5.6 ผลของพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง

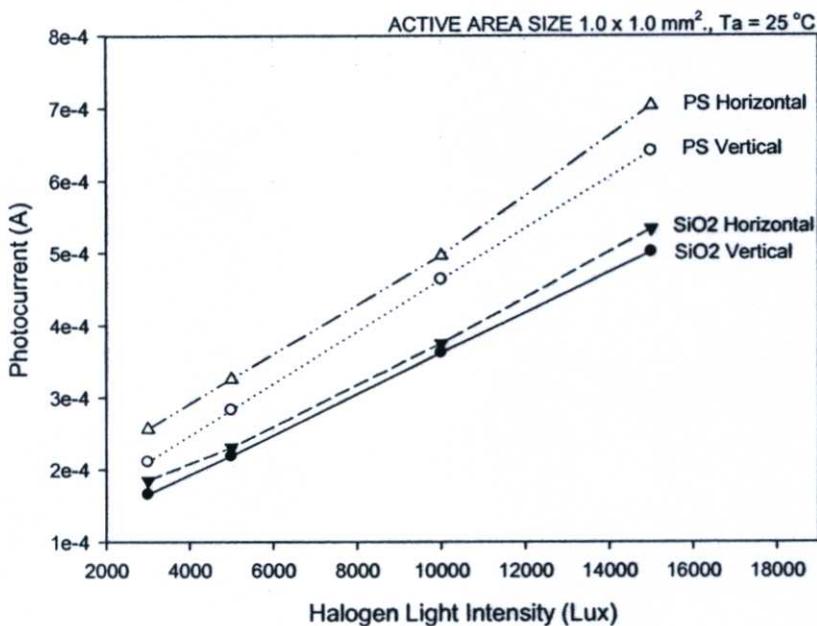
รูปที่ 4.27 เปรียบเทียบกระแสแสงที่มีพอร์ซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V พบว่าซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่าง 21–28% ที่ค่าความเข้มแสงจากหลอดฮาโลเจน 3,000–15,000 ลักซ์ ทั้งนี้เนื่องจากพอร์ซิลิคอนมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้พอร์ซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ส่งผลให้แสงมีการสะท้อนน้อยลง อีกทั้ง พอร์ซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนหรือดักจับแสง (light trapping) ได้ดีอีกด้วย ถึงแม้ว่ากระแสแสงของซิลิคอน โฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนมีค่ามากกว่ากระแสแสงของซิลิคอน โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แต่สังเกตเห็นได้ว่ากระแสแสงของทั้งสองโครงสร้างนี้จะมีค่าใกล้เคียงกันเมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง



รูปที่ 4.27 กระแสแสงของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง

4.5.7 การเปรียบเทียบผลของพอร์สซิลิคอนที่อยู่บนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและโครงสร้างแนวตั้ง

รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้ง พบว่ากระแสแสงที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนมีค่ามากกว่ากระแสแสงที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง กรณีพอร์สซิลิคอนที่อยู่บนชั้นรับแสง ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอนสามารถจ่ายกระแสได้มากกว่าแนวตั้ง 17.90 % และกรณีซิลิคอนไดออกไซด์ที่อยู่บนชั้นรับแสง ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอนสามารถจ่ายกระแสได้มากกว่าแนวตั้ง 10.23 %

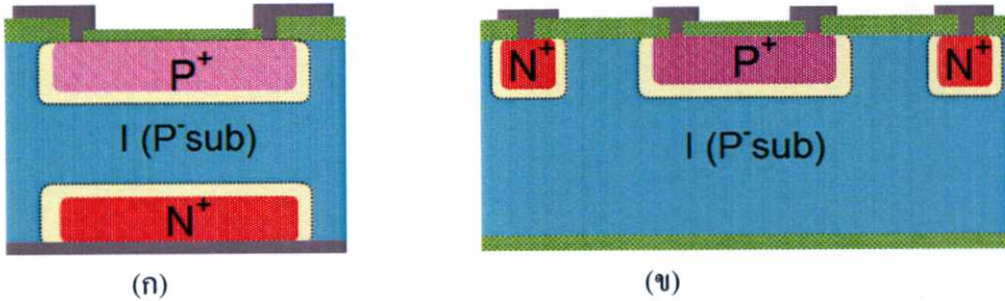


รูปที่ 4.28 เปรียบเทียบกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอนสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าแบบแนวตั้งทำให้ทราบผล 2 ประการ คือ

ประการแรก แสงจากหลอดฮาโลเจนเป็นแสงที่มีความยาวคลื่นสั้น (short wavelength) มีระยะการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนสั้น (ใกล้บริเวณผิว) และกระแสแสงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณเขตปลอดพาหะ ดังนั้นเมื่อบริเวณเขตปลอดพาหะที่ผิวเพิ่มมากขึ้น การดูดกลืนแสงในบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำเกิดมากขึ้น (อัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงมากขึ้น) ในกรณีโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอน ส่วนของชั้นพีเข้มข้น (P^+ region) และส่วนของชั้นเอ็นเข้มข้น (N^+ region) จะถูกสร้างอยู่ที่ผิวด้านบนของผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (i-type) ทำให้เกิดรอยต่อที่บริเวณผิวชั้น 2 รอยต่อคือ รอยต่อ P^+ -i และ

รอยต่อ $N^+ - i$ ส่งผลให้บริเวณปลอดพาหะที่ผิวเกิดขึ้นมาก เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้ง จะมีเฉพาะส่วนของชั้นที่เข้มข้นที่ถูกสร้างที่ผิวด้านบนของผลิตภัณฑ์ฐานรอง ในขณะที่ ส่วนของชั้นเอ็นเข้มข้นถูกสร้างที่ผิวด้านล่างฐานรอง ทำให้มีเฉพาะรอยต่อ $P^+ - i$ ที่บริเวณผิวด้านบนเพียงรอยต่อเดียว ดังรูปที่ 4.29 ทำให้บริเวณปลอดพาหะน้อยกว่าโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอน ส่งผลให้กระแสแสงที่ได้มีค่าน้อยลง



รูปที่ 4.29 ตำแหน่งบริเวณปลอดพาหะ (ก) โครงสร้างแนวนอน (ข) โครงสร้างแนวตั้ง

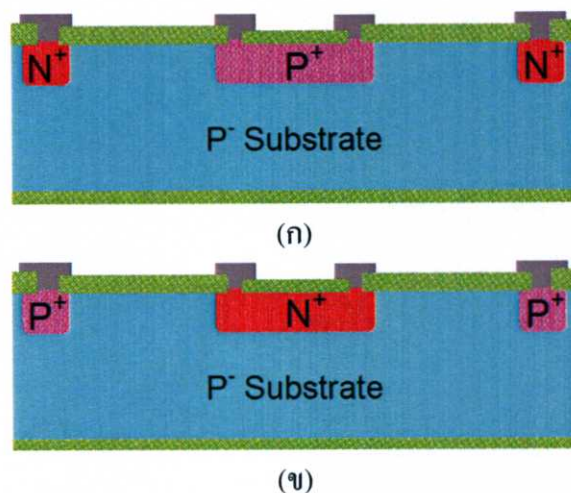
ประการที่สอง ในทางอุดมคติ แสงที่ตกกระทบโฟโตไดโอดทั้งหมดควรจะถูกดูดกลืนในบริเวณปลอดพาหะ และคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นทั้งหมดเคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า เกิดเป็นกระแสแสงไหลในวงจรแต่ในทางปฏิบัติ โฟตอนจากแสงที่เข้ามายังสารกึ่งตัวนำบางส่วนถูกดูดกลืนภายในบริเวณปลอดพาหะ และบางส่วนถูกดูดกลืนภายนอกบริเวณปลอดพาหะ เมื่อพิจารณาจากสมการที่ 2.10 พลังงานแสงนั้นลดลงอย่างรวดเร็วกับระยะความลึกของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น ที่บริเวณผิวด้านบนพลังงานแสงจะมีค่ามากกว่าบริเวณผิวด้านล่าง จากรูปที่ 4.29 เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนจะมีบริเวณปลอดพาหะที่ผิวด้านบนทั้งรอยต่อ $P^+ - i$ และ รอยต่อ $N^+ - i$ ในขณะที่โฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้ง รอยต่อ $P^+ - i$ จะอยู่ที่บริเวณผิวด้านบน และ รอยต่อ $N^+ - i$ จะอยู่ที่บริเวณผิวด้านล่าง จึงส่งผลให้โฟโตไดโอดโครงสร้างแนวตั้งจ่ายกระแสแสงได้น้อยกว่าโครงสร้างแนวนอน

นอกจากนี้ ขณะที่คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล เคลื่อนที่ไปยังขั้วไฟฟ้า คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จะถูกรวมตัวไปบางส่วน เมื่อเปรียบเทียบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนมีระยะห่างขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าโครงสร้างแนวตั้ง ระยะทางที่น้อยลงทำให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล ถูกรวมตัวน้อยลงไปด้วย ส่งผลให้กระแสแสงมีค่ามากขึ้น

4.6 ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP

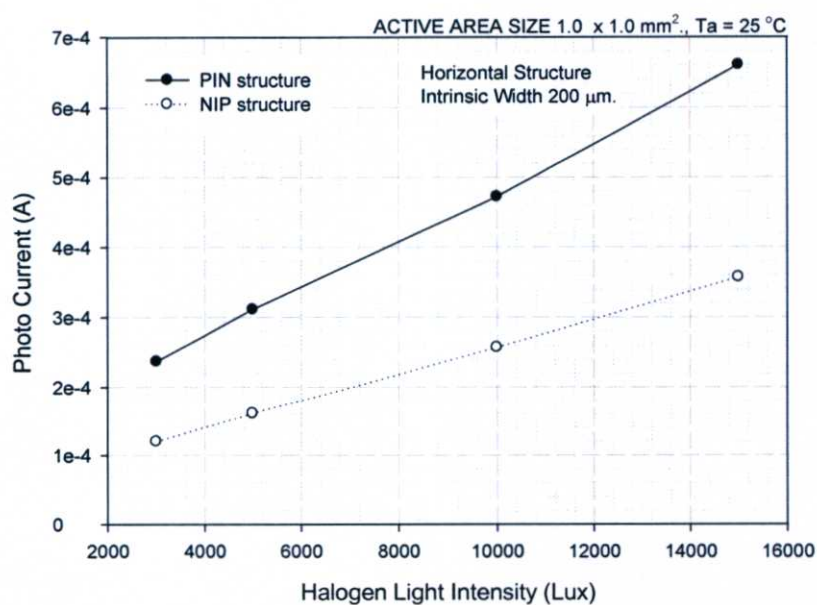
การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของโครงสร้าง PIN และ NIP ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแนวนอน โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งจ่ายแสง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากันและมีระยะชั้นอินทรินซิกคงที่ $200 \text{ }\mu\text{m}$. โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน ที่มีโครงสร้าง PIN และ NIP แสดงดังรูปที่ 4.30



รูปที่ 4.30 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน โครงสร้างต่างๆ (ก) PIN (ข) NIP

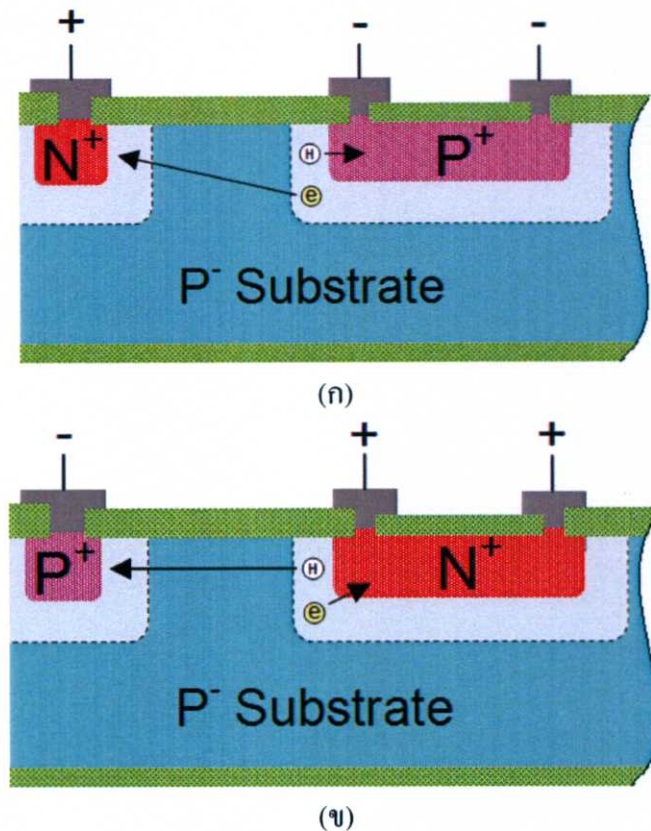
ในรูปที่ 4.31 เปรียบเทียบกระแสแสงที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงชนิดชนิดพีและพื้นที่รับแสงชนิดเอ็น ที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้าง PIN สูงกว่า โครงสร้าง NIP $84.87 - 98.16\%$ ที่ค่าความเข้มแสงจากหลอดฮาโลเจน $3,000 - 15,000$ ลักซ์



รูปที่ 4.31 กระแสแสงที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดแนวนอนที่มีพื้นที่รับแสงชนิด PIN และ NIP

ถึงแม้ว่ากระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้าง PIN มีค่ามากกว่ากระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้าง NIP แต่สังเกตเห็นได้ว่ากระแสแสงของทั้งสองโครงสร้างนี้จะมีค่าคู่เข้าหากันเมื่อความเข้มแสงมีค่าลดลง

เมื่อซิลิคอนโฟโตไดโอดดูดกลืนแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลส่วนมากที่บริเวณปลดพาหะ ในกรณีไบอัสย้อนกลับ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าบวกบริเวณเอ็นเข้มชั้น และโฮลจะเคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าลบบริเวณพีเข้มชั้น โดยปกติความเร็วครีฟท์ (drift velocity) ของอิเล็กตรอนมีค่าสูงกว่าความเร็วครีฟท์ของโฮลเพราะอิเล็กตรอนมีสภาพคล่อง (mobility) สูงกว่าโฮล



รูปที่ 4.32 ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮล โครงสร้างต่างๆ (ก) PIN (ข) NIP

รูปที่ 4.32 (ก) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มชั้น โดยที่ระยะทางจากบริเวณปลดพาหะถึงขั้วไฟฟ้าบวกมีระยะทางมากกว่าขั้วไฟฟ้าลบ ซึ่งโฮลเคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าลบ และอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าบวก

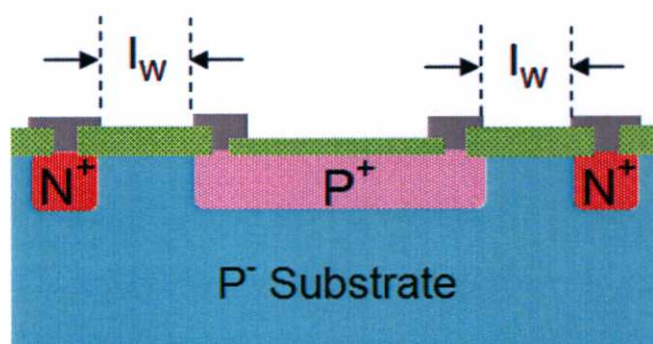
รูปที่ 4.32 (ข) แสดงทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและโฮลของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มชั้น โดยที่ระยะทางจากบริเวณปลดพาหะถึงขั้วไฟฟ้าลบมีระยะทางมากกว่าขั้วไฟฟ้าบวก ซึ่งโฮลเคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าลบ และอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าบวก

เมื่อเปรียบเทียบโพลีซิลิคอนที่เข้าขั้วไฟฟ้าลบบและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าบวก ที่ระยะทางบริเวณปลอดพาหะถึงขั้วไฟฟ้าเท่ากัน (ระยะทางสั้น) แม้ว่าโพลีซิลิคอนจะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าอิเล็กตรอน แต่ระยะทางจากบริเวณปลอดพาหะถึงขั้วไฟฟ้าสั้น ดังนั้นโพลีซิลิคอนและอิเล็กตรอนจึงมีโอกาสในการรวมตัวน้อย ในกรณีที่โพลีซิลิคอนที่เข้าขั้วไฟฟ้าลบบและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้าบวก ที่ระยะทางบริเวณปลอดพาหะถึงขั้วไฟฟ้าเท่ากัน (ระยะทางยาว) ทำให้โอกาสในการรวมตัวของอิเล็กตรอนจึงมีน้อยกว่าโพลีซิลิคอนเนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ถึงขั้วไฟฟ้าได้เร็วกว่าโพลีซิลิคอน ส่งผลให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มชั้นสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มชั้น

นอกจากนี้ เหตุผลอีกประการหนึ่งที่ทำให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้าง PIN สามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้าง NIP คือ พื้นที่รับแสงชนิดเอ็นมีสัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง (reflective index) สูงกว่าพื้นที่รับแสงชนิดพี [34] ทำให้พื้นที่รับแสงชนิดพีสามารถลดการสะท้อนแสงได้ดีกว่าพื้นที่รับแสงชนิดเอ็น

4.7 ผลของระยะชั้นอินทรีนซิก

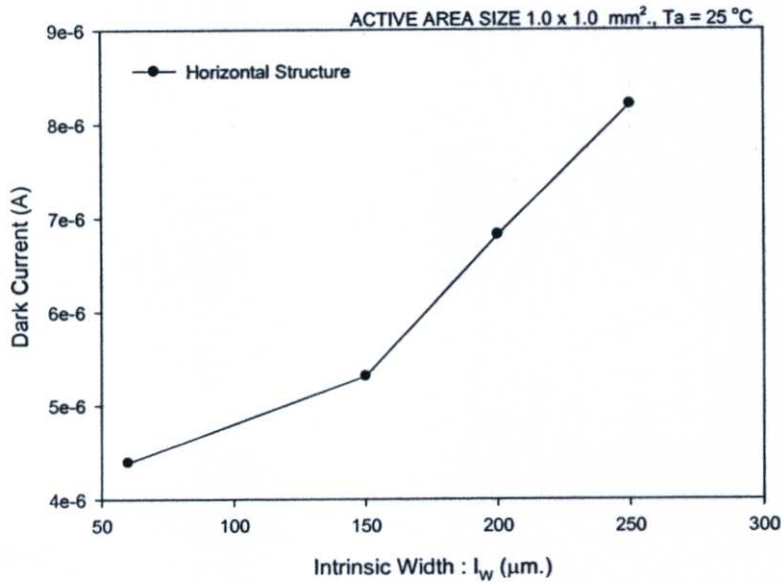
การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของระยะชั้นอินทรีนซิก (ระยะห่างระหว่างพื้นที่พีเข้มชั้นและเอ็นเข้มชั้น : I_w) ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแวนอน โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งจ่ายแสง ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน และระยะชั้นอินทรีนซิก (I_w) มีค่า 60, 150, 200, 250 μm . ตามลำดับ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแวนอน ที่มีระยะชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.33



รูปที่ 4.33 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแวนอน ที่มีระยะชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ

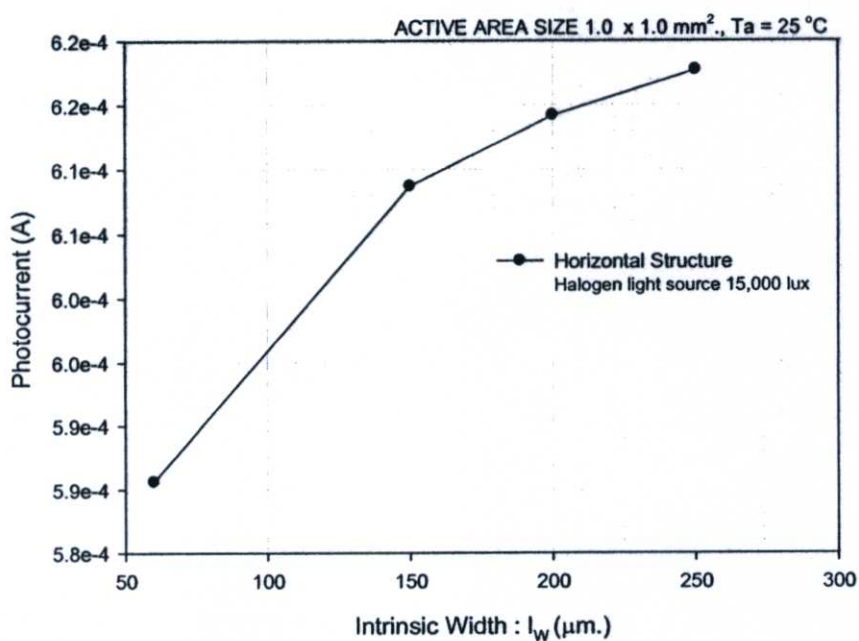
โดยการทดลองกระแสได้เปรียบเทียบทั้งกระแสแสงและกระแสมืด ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแวนอน เพื่อศึกษาการเพิ่มของกระแสมืด ได้เปลี่ยนระยะชั้นอินทรีนซิก

(I_w) มีค่า 60, 150, 200, และ 250 μm . ตามลำดับ ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V ดังรูปที่ 4.34 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดและความกว้างชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนมีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะชั้นอินทรีนซิกที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากระยะชั้นอินทรีนซิกที่เพิ่มมากขึ้น ผนวรอยสัมผัส Si/SiO_2 จะมากขึ้นตาม ทำให้ประจุไฟฟ้าบวกต่างๆที่บริเวณผนวรอยสัมผัส Si/SiO_2 จะมากขึ้น ส่งผลให้ประจุไฟฟ้าบวกเหล่านี้มีการเหนี่ยวนำอิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำให้เคลื่อนที่เข้ามาบริเวณผนวสัมผัส Si/SiO_2 ในจำนวนที่มากขึ้น จึงเป็นสาเหตุให้พาหะที่ทำให้เกิดกระแสมืดมีค่ามากขึ้น

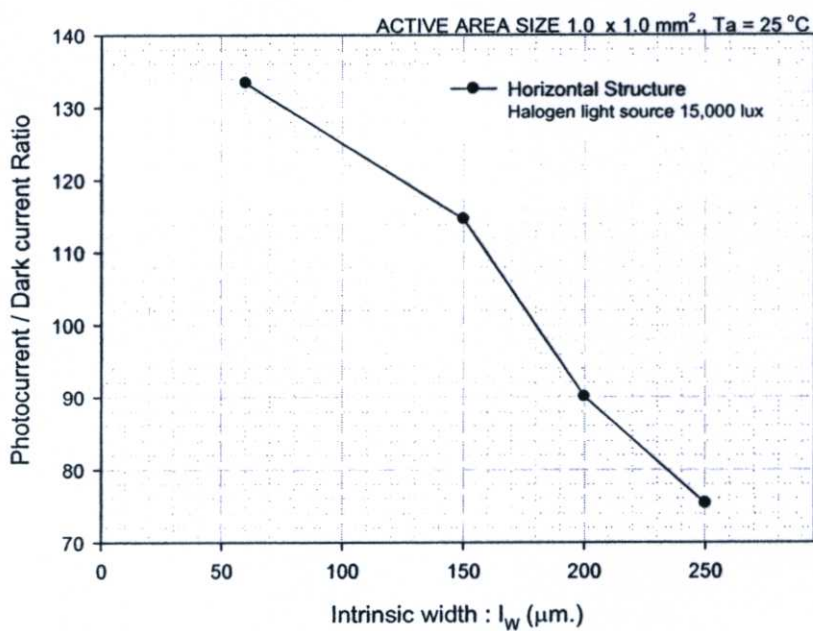


รูปที่ 4.34 กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนที่ความกว้างชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ

เพื่อศึกษาการเพิ่มของกระแสแสง ได้เปลี่ยนระยะชั้นอินทรีนซิก (I_w) มีค่า 60, 150, 200, และ 250 μm . ตามลำดับ ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V รูปที่ 4.35 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความกว้างชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ พิจารณาที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนมีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะชั้นอินทรีนซิกที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่ากระแสแสงส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณปลอดพาหะ แต่โดยปกติเมื่อซิลิคอนโฟโตไดโอดได้รับแสง ซิลิคอนโฟโตไดโอดจะดูดกลืนแสงทั้งชั้นสารกึ่งตัวนำ ทั้งบริเวณที่เข้มข้น เอ็นเข้มข้น และชั้นอินทรีนซิกทำให้เกิดกระแสแสงได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นแม้ว่าเขตปลอดพาหะมีค่าคงที่ ทำให้กระแสแสงมีค่าคงที่ แต่ ชั้นอินทรีนซิกที่มีความกว้างเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



รูปที่ 4.35 กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอนที่ความกว้างชั้นอินทรีนซิกค่าต่างๆ



รูปที่ 4.36 ความสัมพันธ์ระหว่างระยะชั้นอินทรีนซิกและกระแสแสงต่อกระแสมืดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

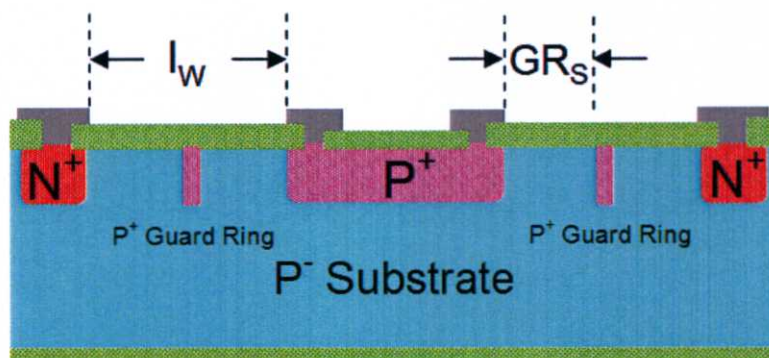
เมื่อหาอัตราส่วน S/N กระแสแสงต่อกระแสมืด ดังรูปที่ 4.36 พบว่า ค่า S/N มีค่าลดลงเมื่อระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิกมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 73.3 - 133.4 ที่ระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิก 60 - 250 μm . ถึงแม้ว่าระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิกที่เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนการเพิ่มของกระแสแสงจะน้อยลงเมื่อระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ทั้งนี้เนื่องจากระยะระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิกเพิ่มขึ้นหมายถึงระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะต้องเคลื่อนที่ด้วยระยะทางที่ยาวขึ้น ส่งผลให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลมีโอกาสเกิดการรวมตัวระหว่างที่เคลื่อนที่เข้าขั้วไฟฟ้ามากขึ้นจึงทำให้สัดส่วนการเพิ่มของกระแสแสงน้อยลง

4.8 ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง

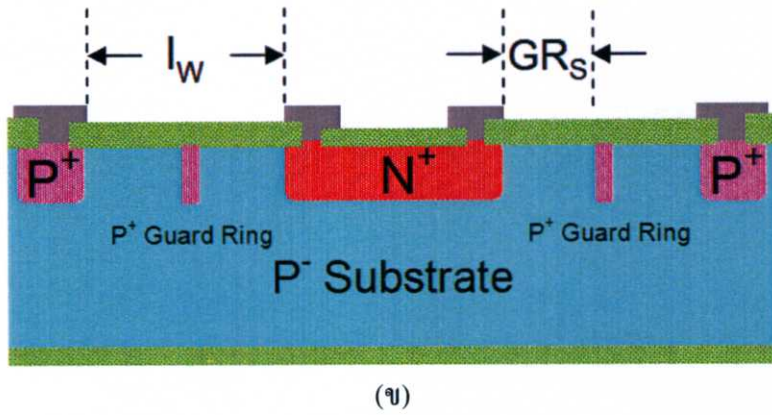
การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอน โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งจ่ายแสง

4.8.1 ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน

ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน มีระยะชั้นอินทรีนซิกคงที่ 200 μm . ความกว้างของการ์ดริง (GR_w) คงที่ 25 μm . และระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริง (GR_s) มีค่า 25, 50, 75, 100 และ 125 μm . ตามลำดับ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอด แบบที่มีการ์ดริง แสดงดังรูปที่ 4.37

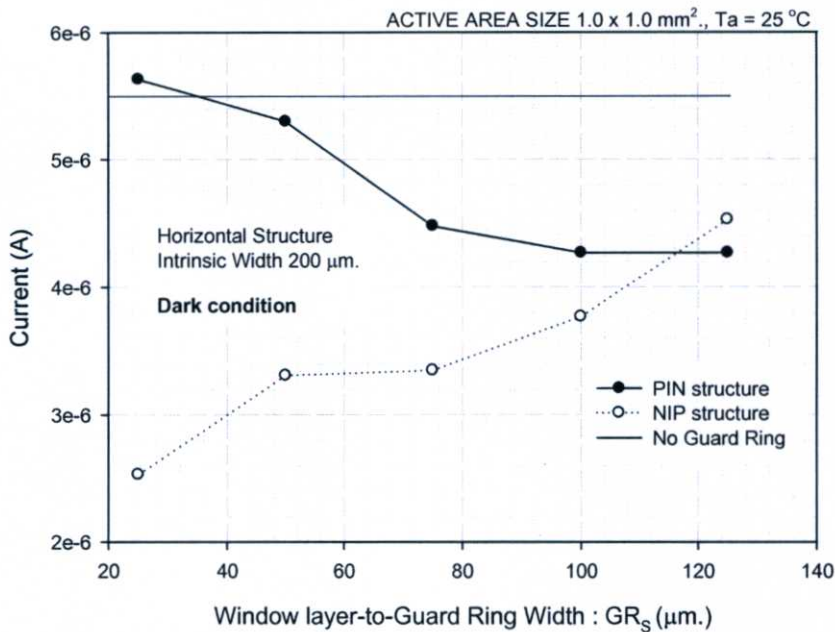


(ก)



รูป 4.37 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแบบแนวนอน ที่มีการ์ดริง (ก) PIN พื้นที่ได้รับแสงชนิดพีเข้มชั้น (ข) NIP พื้นที่ได้รับแสงชนิดเอ็นเข้มชั้น

โดยในการทดลองจะแบ่งซิลิคอนโฟโตไดโอดเป็น 3 กลุ่ม คือ (1) ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริงและมีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มชั้น (2) ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด NIP แบบที่มีการ์ดริงและมีพื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มชั้น และ (3) ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบปกติ (ไม่มีการ์ดริง) และมีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มชั้น

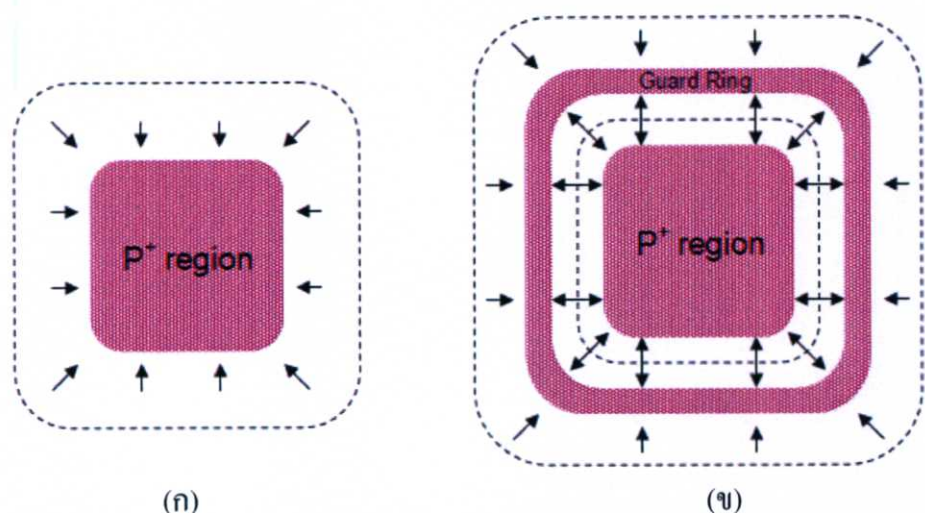


รูปที่ 4.38 กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบที่มีการ์ดริงโครงสร้าง PIN และ NIP และซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบที่ไม่มีการ์ดริง

การทดลองกระแสได้เปรียบเทียบทั้งกระแสมืด ของซิลิคอนโฟโตไดโอดทั้ง 3 กลุ่ม ในรูปที่ 4.38 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริง

พิจารณาที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 8 V พบว่า ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบไม่มีกั้วคริง จะมีค่ากระแสมืดมากกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีกั้วคริง 22.36% และมากกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด NIP แบบที่มีกั้วคริง 54%

หน้าที่สำคัญของกั้วคริงคือการลดกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอด กลไกการลดกระแสมืดของกั้วคริงแสดงดังรูปที่ 4.39 เปรียบเทียบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างที่มีกั้วคริง และโครงสร้างที่ไม่มีกั้วคริง ในกรณีของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ไม่มีกั้วคริง กระแสมืดส่วนใหญ่ นอกบริเวณพื้นที่รับแสงจะไหลเข้าไปยังโฟโตไดโอดทั้งหมด ดังรูปที่ 4.39 (ก) จึงมีผลให้กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างที่ไม่มีกั้วคริงมีค่าสูงกว่าโครงสร้างที่มีกั้วคริง ในขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างที่มีกั้วคริงสามารถลดกระแสมืดได้มากกว่า เนื่องจากสนามไฟฟ้า บริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอนโฟโตไดโอดจะถูกเบี่ยงเบนไปยังกั้วคริง ส่งผลให้พาหะที่ทำให้เกิดกระแสมืดทั้งในเนื้อสารและผิวสัมผัสของ Si/SiO₂ บางส่วนซึ่งอยู่นอกบริเวณพื้นที่รับแสง เคลื่อนที่เข้ากั้วคริง ทำให้กระแสมืดที่ไหลเข้าไปยังโฟโตไดโอดมีค่าลดลง ดังรูป 4.39 (ข)

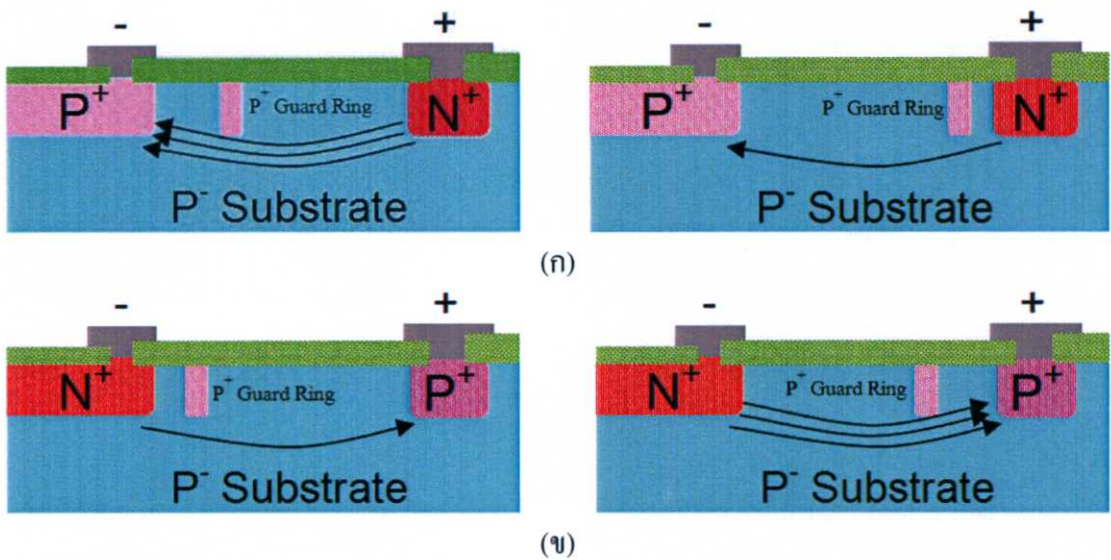


รูป 4.39 กลไกการลดกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอด (ก) โครงสร้างที่ไม่มีกั้วคริง (ข) โครงสร้างที่มีกั้วคริง

นอกจากนี้ จากรูปที่ 4.38 กรณีซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มชั้น กระแสมืดมีค่าลดลงเมื่อกั้วคริงมีระยะห่างจากพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น แต่กรณีซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มชั้น กระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อกั้วคริงมีระยะห่างจากพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่ากระแสมืดมีค่าต่ำลงเมื่อกั้วคริงเข้าใกล้พื้นที่เอ็นเข้มชั้นทั้งสองโครงสร้าง ทั้งนี้เนื่องจาก เมื่อซิลิคอนโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะเกิดสนามไฟฟ้ามีทิศพุ่งจากพื้นที่เอ็นไปพื้นที่พี เกิดเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของพาหะ โดยอิเล็กตรอนมีทิศการเคลื่อนที่จากพื้นที่พีไปพื้นที่เอ็น

และโฮลมีทิศการเคลื่อนที่จากพื้นที่เอ็นไปพื้นที่พี แต่เนื่องจากอิเล็กตรอนเคลื่อนที่เร็วกว่าโฮล ดังนั้น จึงพิจารณาการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเท่านั้น

เมื่อพิจารณาเส้นแรงสนามไฟฟ้า ซึ่งเป็นเส้นทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน กรณีโครงสร้าง PIN พบว่าขณะที่ตำแหน่งของการ์ดริงใกล้พื้นที่รับแสงพี การ์ดริงสามารถปิดกั้นสนามไฟฟ้าได้น้อย แต่เมื่อการ์ดริงมีตำแหน่งใกล้พื้นที่เอ็น การ์ดริงสามารถปิดกั้นสนามไฟฟ้าได้มากขึ้น ส่งผลให้กระแสมีค่าลดลงเมื่อการ์ดริงมีตำแหน่งห่างจากพื้นที่รับแสงพีมากขึ้น เช่นเดียวกับกรณีโครงสร้าง NIP พบว่าขณะที่ตำแหน่งของการ์ดริงใกล้พื้นที่รับแสงเอ็น การ์ดริงสามารถปิดกั้นสนามไฟฟ้าได้มากกว่าตำแหน่งของการ์ดริงใกล้พื้นที่พี ส่งผลให้กระแสมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อการ์ดริงมีตำแหน่งห่างจากพื้นที่รับแสงเอ็นมากขึ้น

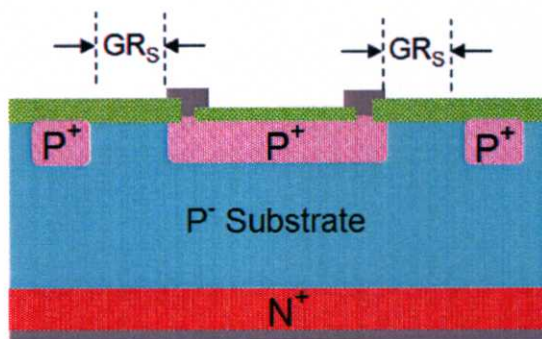


รูป 4.40 การเกิดกระแสที่ผิวสัมผัส Si/SiO₂ ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริง (ก) PIN พื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้น (ข) NIP พื้นที่รับแสงชนิดเอ็นเข้มข้น

4.8.2 ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

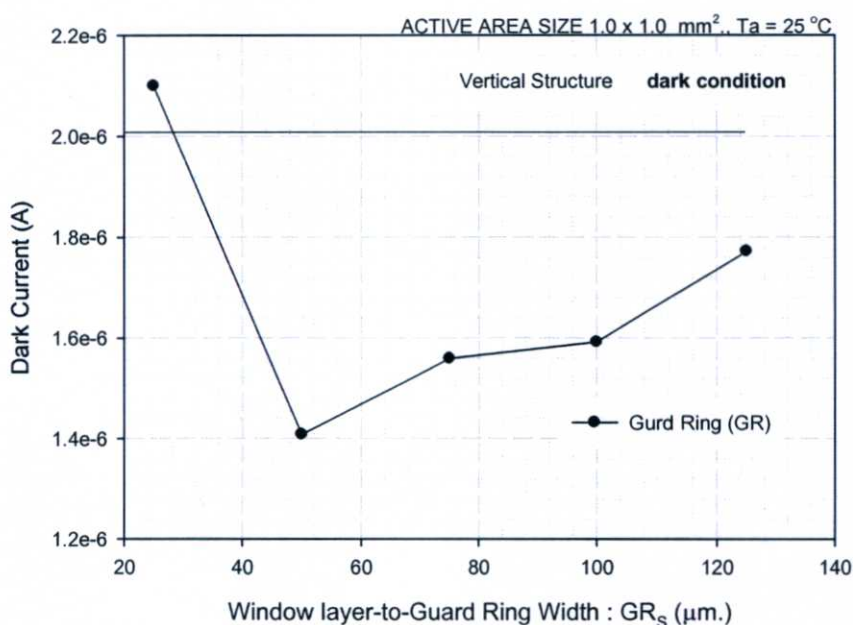
ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.0 x 1.0 mm². เท่ากัน มีระยะความกว้างของการ์ดริง (GR_w) คงที่ 25 μm. และระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริง (GR_s) มีค่า 25,50,75,100 และ 125 μm. ตามลำดับ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง แสดงดังรูปที่ 4.41

โดยการทดลองกระแสได้เปรียบเทียบกระแสของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแบบปกติ (ไม่มีการ์ดริง) และซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง ในรูป



รูปที่ 4.41 โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

ที่ 4.42 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริง พิจารณาที่ค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V พบว่า ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบไม่มีการ์ดริง จะมีค่ากระแสมืดมากกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบที่มีการ์ดริง โดยกระแสมืดจะน้อยที่สุดเมื่อระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริงเท่ากับ 50 μm . ทั้งนี้อาจจะเกิดจากกระแสดังกล่าว มีการเลี้ยวเบนของสนามไฟฟ้าบริเวณขอบรอยต่อพี-เอ็นของซิลิคอนโฟโตไดโอด มีค่าเหมาะสมที่สุด

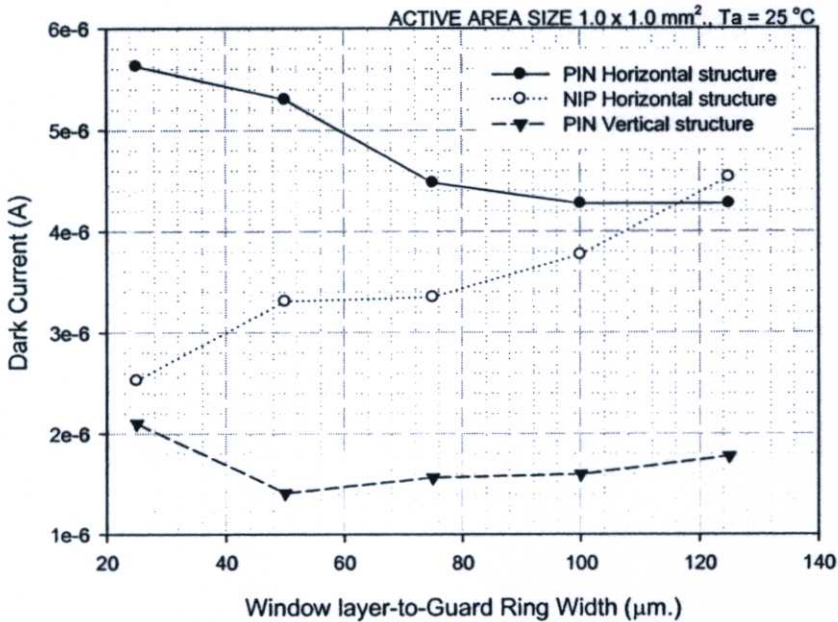


รูปที่ 4.42 กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง ที่ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริงค่าต่างๆ

4.8.3 การเปรียบเทียบตัวตรวจจับสนามแม่เหล็กแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างที่มีการ์ดริง แบบแนวนอนและแนวตั้ง

รูปที่ 4.43 เปรียบเทียบกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้ง พบว่ากระแสมืดที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน โครงสร้าง PIN

และ โครงสร้าง NIP มีค่ามากกว่ากระแสมืดที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง กระแสมืดส่วนใหญ่จะเกิดในบริเวณเขตปลอดพาหะนอกพื้นที่รับแสง ดังนั้นในกรณีซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอนที่มีบริเวณปลอดพาหะที่ผิวมากกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ดังที่ได้อธิบายในหัวข้อ 4.5.7 จึงส่งผลให้กระแสมืดมีค่ามากตามไปด้วย



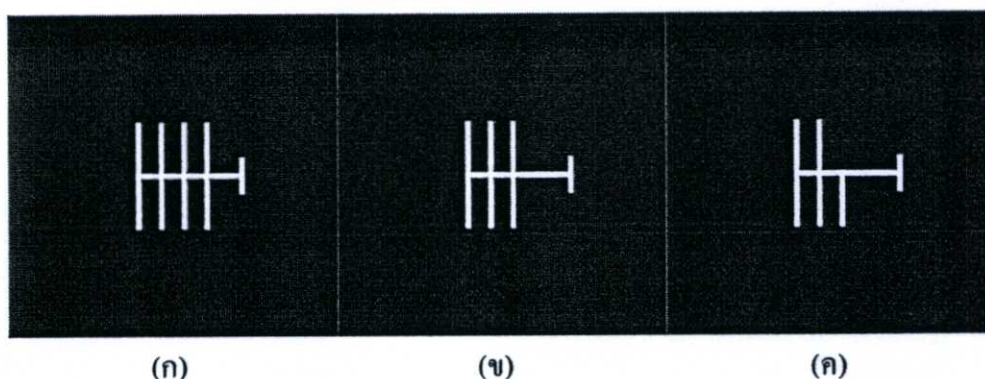
รูปที่ 4.43 กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวนอนและแนวตั้งที่มีการครีงที่ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการครีงค่าต่างๆ

4.9 ผลของพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงที่มีต่อความหนาแน่นกระแส

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงที่มีต่อความหนาแน่นกระแสของพื้นที่รับแสง (J_A) ต่อความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง (J_p) โดยในการทดลองซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งถูกออกแบบให้มีขนาดพื้นที่รับแสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงต่างกัน แบ่งเป็น 4 รูปแบบ โดยขนาดพื้นที่รับแสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงแสดงดังตารางที่ 4.1 มุมมองด้านบนของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งทั้ง 2 กลุ่ม แสดงดังรูปที่ 4.44

ตารางที่ 4.1 ขนาดพื้นที่รับแสงและความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงรูปแบบต่างๆ

รูปแบบที่	พื้นที่รับแสง (cm ²)	ความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง (cm)
1	2.68×10^{-3}	1.084
2	2.18×10^{-3}	0.884
3	1.93×10^{-3}	0.784



รูปที่ 4.44 มุมมองด้านบนของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง

- (ก) พื้นที่รับแสง $2.68 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. และความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง 1.084 mm.
 (ข) พื้นที่รับแสง $2.18 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. และความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง 0.884 mm.
 (ค) พื้นที่รับแสง $1.93 \times 10^{-3} \text{ mm}^2$. และความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง 0.784 mm.

จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง สามารถคำนวณหาความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสง (J_A) และความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง (J_P) ได้ จากสมการที่ 4.5 ซึ่งเป็นสมการกระแสไหลย้อนกลับทั้งหมด (I_R) [35]

$$I_R = A J_A + P J_P \quad (4.5)$$

โดยที่ A คือ ขนาดพื้นที่รับแสง มีหน่วยเป็น cm^2 .

J_A คือ ความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสง มีหน่วยเป็น A/cm^2 .

P คือ ความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง มีหน่วยเป็น cm .

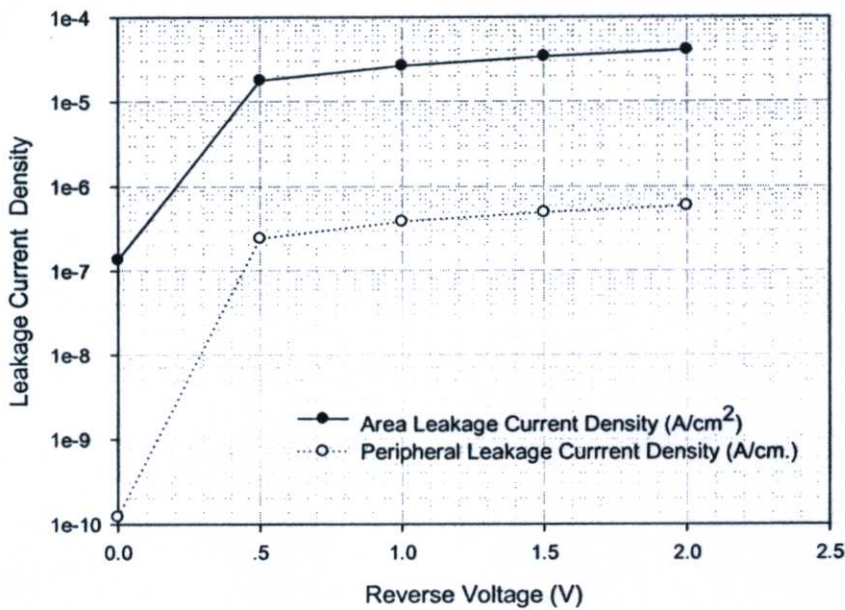
J_P คือ ความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง มีหน่วยเป็น A/cm .

เนื่องจากความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสง และความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง เป็นค่าคงที่ ดังนั้นจากสมการ (4.5) สามารถเขียนสมการจากค่าพื้นที่รับแสง และค่าความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดได้ 2 สมการคือ

$$2.68 \times 10^{-3} J_A + 1.084 J_p = I_{R1} \quad (4.6)$$

$$2.18 \times 10^{-3} J_A + 0.884 J_p = I_{R2} \quad (4.7)$$

โดยในการทดลอง ได้เปลี่ยนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 0, 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 V ขณะไม่ได้รับแสง เมื่อนำค่ากระแสรั่วของซิลิคอนโฟโตไดโอดทั้ง 2 กลุ่ม มาแทนค่า สามารถแก้สมการหาค่า J_A และ J_p ได้ รูปที่ 4.45 แสดงความสัมพันธ์ความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสง และความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ

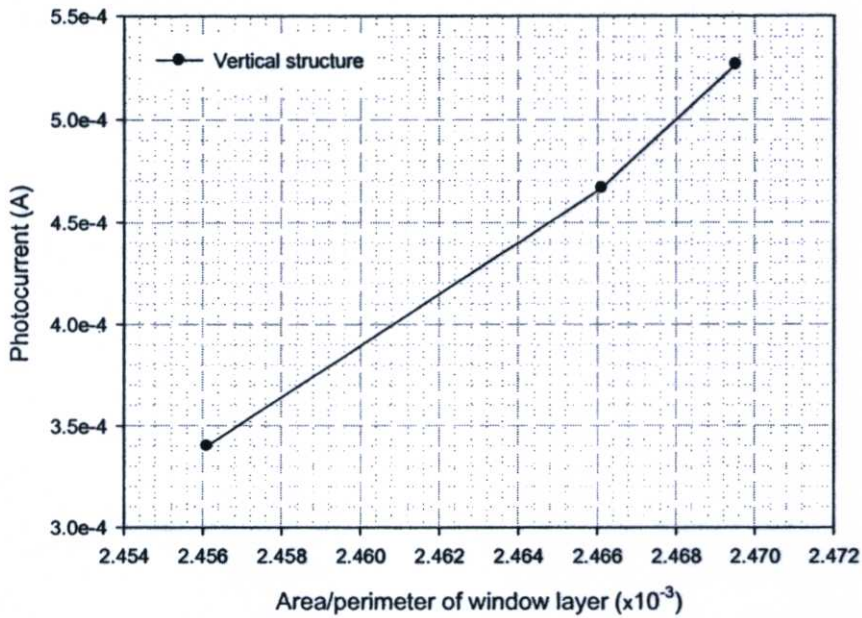


รูปที่ 4.45 ความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสง และความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ขณะที่ไม่ได้รับแสง ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ

จากรูปที่ 4.45 ความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสงมีค่าสูงกว่าความหนาแน่นกระแสรั่วของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงประมาณ 100 เท่า สรุปได้ว่าพื้นที่รับแสงมีผลทำให้เกิดกระแสรั่วมากกว่าความยาวเส้นรอบรูป อย่างไรก็ตาม ในกรณีที่โฟโตไดโอดถูกออกแบบให้มีขนาดพื้นที่เล็กมากๆ และความยาวเส้นรอบรูปยาวมากๆ ผลของความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงอาจมีผลเด่นชัดมากขึ้น เนื่องจากความหนาแน่นกระแสรั่วของทั้ง 2 กรณี มีความต่างกันไม่มากนัก

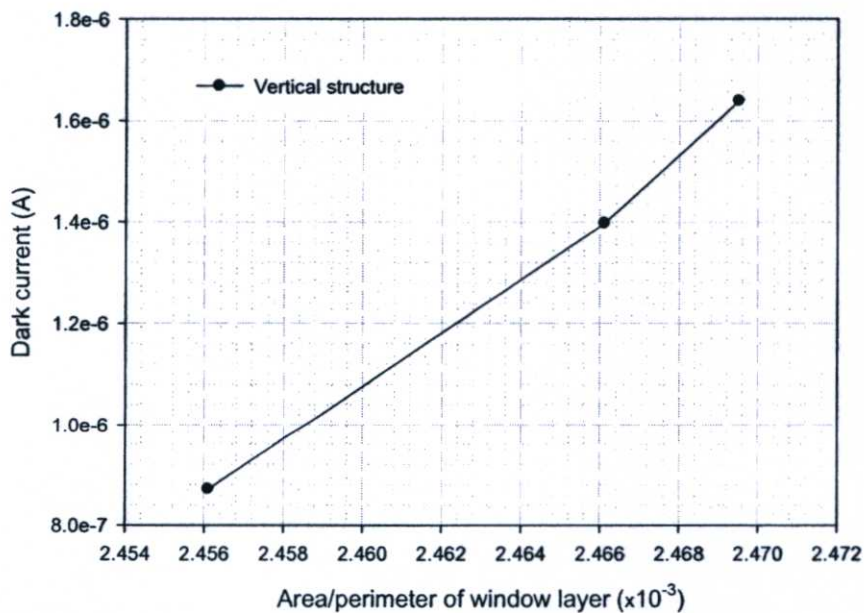
เพื่อหาค่าอัตราส่วนพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงที่เหมาะสม จากรูปที่ 4.46 พบว่าค่ากระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง (A/l) เพิ่มขึ้น นั่นคือ ค่าพื้นที่ (A) มีค่ามาก และ ค่าความยาวเส้นรอบรูป (l) มีค่าน้อย ซึ่ง

สอดคล้องกับ รูปที่ 4.45 คือ ค่าความหนาแน่นกระแสของพื้นที่มีค่ามากกว่าค่าความหนาแน่นกระแสของเส้นรอบรูปมาก ส่งผลให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ A/I เพิ่มขึ้น



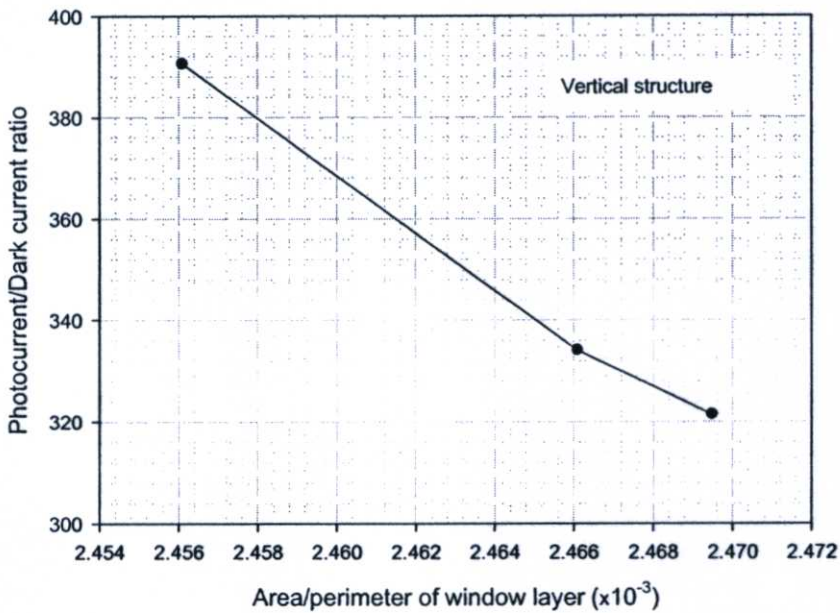
รูปที่ 4.46 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและอัตราส่วนพื้นที่ต่อความยาวเส้นรอบรูป

นอกจากนี้ค่ากระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่ที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง (A/I) เพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับกับกระแสแสงดังรูปที่ 4.47



รูปที่ 4.47 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดและอัตราส่วนพื้นที่ต่อความยาวเส้นรอบรูป

อย่างไรก็ตาม เมื่อหาอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดกลับพบว่าอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงมีค่าลดลง ดังรูปที่ 4.48 เนื่องจากค่าความหนาแน่นกระแสรั่วของพื้นที่รับแสงมีค่ามากกว่าความหนาแน่นกระแสรั่วของเส้นรอบรูป ดังนั้นการลดพื้นที่รับแสงและเพิ่มความยาวเส้นรอบรูปหรือการทำให้อัตราส่วนพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงมีค่าลดลง ส่งผลให้อัตราส่วน S/N มากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นโฟโตไดโอดที่ดี เพราะถ้าสัญญาณรบกวนลดลงทำให้ความไวแสงของโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น



รูปที่ 4.48 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนพื้นที่ต่อความยาวเส้นรอบรูป และกระแสแสงต่อกระแสมืดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

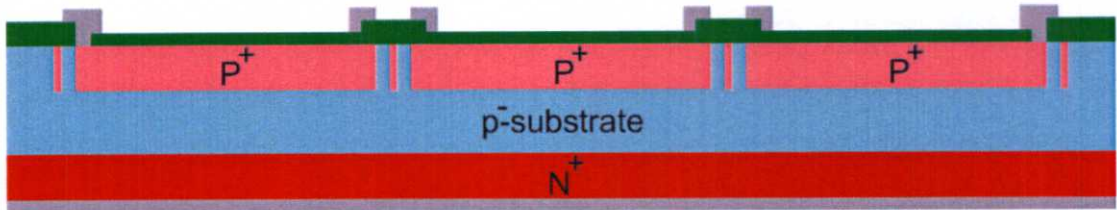
4.10 การศึกษาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างอเรีย

การศึกษาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งโครงสร้างอเรีย เพื่อหาศึกษาผลของระยะห่างของโฟโตไดโอดแต่ละตัว และผลของการโค้ง นำเสนอลักษณะสมบัติต่างๆที่สำคัญของซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างอเรีย ดังนี้

4.10.1 ผลของระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างอเรียแบบที่ไม่มีกักรโค้ง

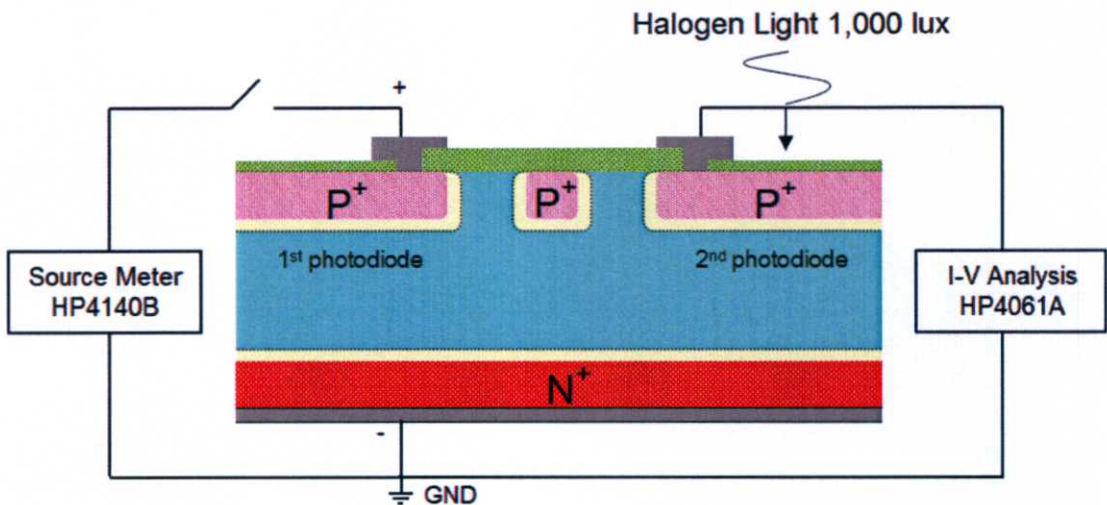
การทดลองในหัวข้อนี้ ได้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายตัวดูออกแบบให้เรียงติดกันเป็นแถวเดียว โฟโตไดโอดมีขนาดพื้นที่รับแสง 1.0

x 1.0 mm². และระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดมีค่า 65,75,85 และ 95 μm . ตามลำดับ โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งโครงสร้างอเรีย่แสดงดังรูปที่ 4.49



รูปที่ 4.49 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งโครงสร้างอเรีย่ที่ไม่มีกัร่ดริง

โดยการทดลองได้เปรียบเทียบกระแสการแพร่ (diffusion current) ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบปกติ (ไม่มีกัร่ดริง) และซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบมีกัร่ดริงล้อมรอบไดโอดแต่ละตัว ชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.50 ในการทดลองจะเปรียบเทียบค่ากระแสแสงและกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่สอง ในขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งได้รับการไบอัสตรงและไม่ได้รับการไบอัสตรงทั้งกรณีไม่ได้รับแสง และได้รับแสง โดยใช้แสงจากหลอดฮาโลเจนความเข้ม 1,000 lux

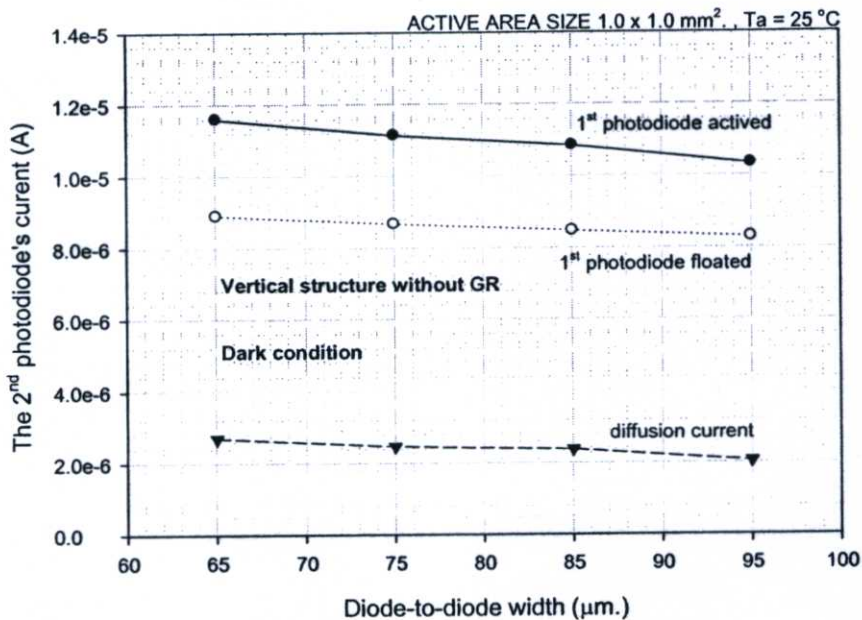


รูปที่ 4.50 วงจรวัดกระแสแพร่ด้านข้าง

ขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรง จะทำให้โฮลส่วนหนึ่ง Δp จากด้านพี ฉีด (injection) ข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านเอ็น และอิเล็กตรอนส่วนหนึ่ง Δn จากด้านเอ็น สามารถฉีดข้ามรอยต่อเข้าไปยังด้านพี ได้เช่นเดียวกัน ทำให้ชั้นอินทรินซิกบริเวณรอยต่อพี-เอ็นมีความหนาแน่นของพาหะมากกว่าชั้นอินทรินซิกนอกบริเวณรอยต่อพี-เอ็น ส่งผลให้พาหะส่วนมากบางส่วนที่เคลื่อนข้ามรอยต่อ ได้มีการแพร่เข้าสู่ชั้นอินทรินซิกนอกบริเวณรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งพาหะส่วนนี้ จะมีผลทำให้พาหะของซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่สองมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อระยะระหว่างโฟโต

ไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น กระแสแสงที่ได้จะมีค่าน้อยลงเนื่องจาก จำนวนพาหะที่แพร่เข้าสู่ชั้นอินทรีนซิกนอกบริเวณรอยต่อพี-เอ็นจะมีค่าลดลงกับระยะทางที่เพิ่มขึ้น

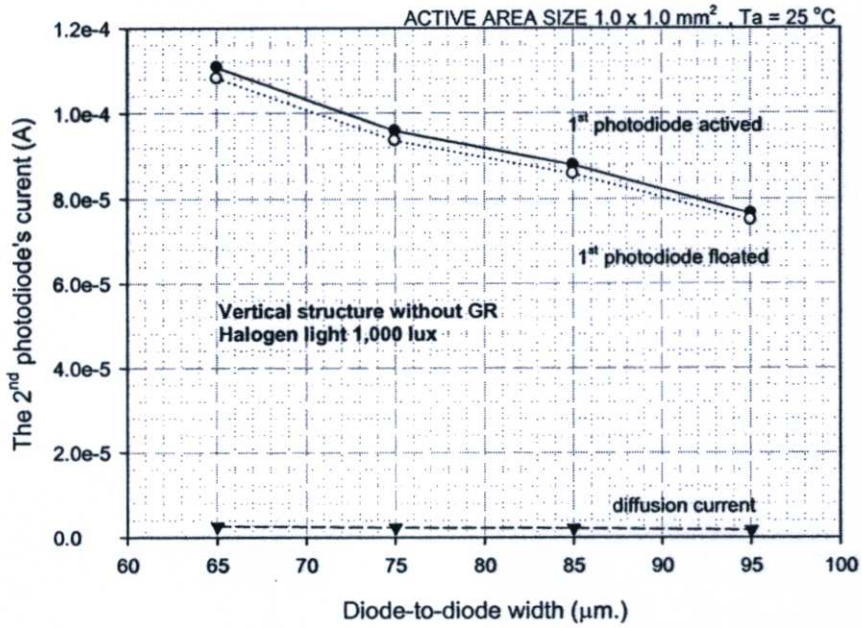
รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีการ์ดริง เมื่อพิจารณาที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งได้รับไบอัสตรง 1 โวลต์ พบว่ากระแสของซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่สองขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ได้รับไบอัสตรงมีค่ามากกว่ากระแสขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ไม่ได้รับไบอัสตรงอยู่ 23.28% ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 65 μm และ 19.83 % ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 95 μm จะสังเกตเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของกระแสระหว่างโฟโตไดโอดตัวที่สองขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ได้รับไบอัสตรงและไม่ได้รับไบอัสตรงนั้นมีค่าลดลง เนื่องจากระยะทางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสการแพร่ด้านข้างมีค่าลดลง โดยกระแสแพร่มีค่าอยู่ระหว่าง 2.05-2.71 μA



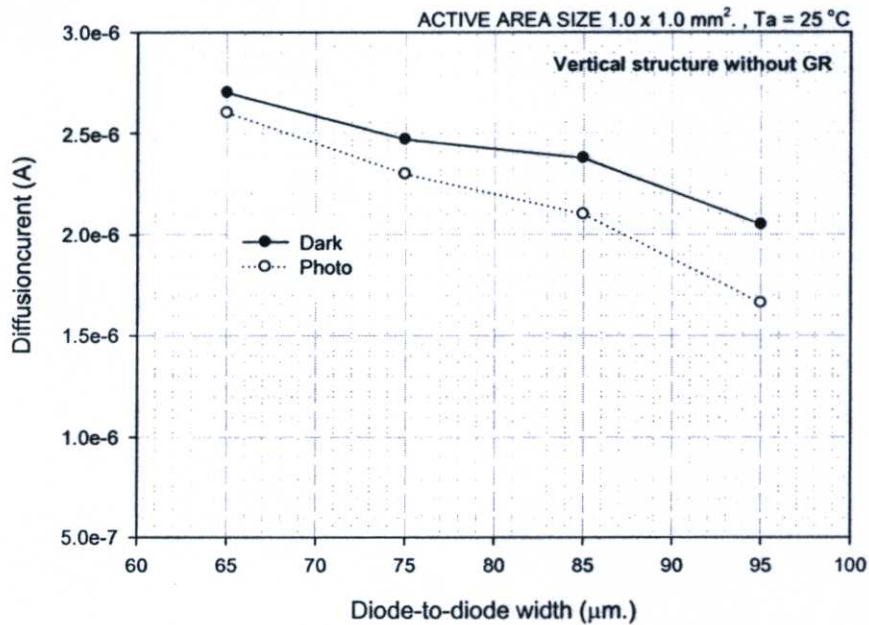
รูปที่ 4.51 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีการ์ดริง

รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีการ์ดริง เมื่อพิจารณาที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งได้รับไบอัสตรง 1 โวลต์ พบว่ากระแสของซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่สองขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ได้รับไบอัสตรงมีค่ามากกว่ากระแสขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ไม่ได้รับไบอัสตรงอยู่ 2.35% ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 65 μm และ 2.17 % ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 95 μm จะสังเกตเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของกระแสระหว่างโฟโตไดโอดตัวที่สองขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่

หนึ่งที่ได้รับไบอัสตรงและไม่ได้รับไบอัสตรงนั้นมีค่าลดลง เนื่องจากระยะทางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสการแพร่มีค่าลดลง โดยกระแสแพร่มีค่าอยู่ระหว่าง 1.66-2.60 μA



รูปที่ 4.52 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีกักร์ดริง

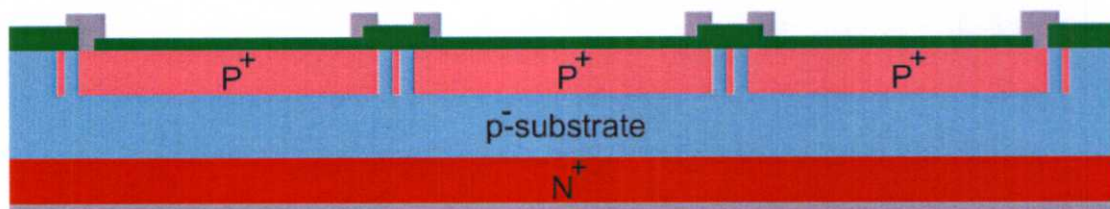


รูปที่ 4.53 เปรียบเทียบกระแสแพร่ของโฟโตไดโอดที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่ไม่มีกักร์ดริง ขณะไม่ได้รับแสง และได้รับแสง

เมื่อเปรียบเทียบกระแสแพร่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบที่ไม่มีกักรังสีขณะที่ไม่ได้รับแสง และได้รับแสง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างกัน $0.11 \mu\text{A}$ ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด $65 \mu\text{m}$ และ $0.39 \mu\text{A}$ ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด $95 \mu\text{m}$ ดังรูปที่ 4.53

4.10.2 ผลของระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างอเรียแบบที่มีกักรังสี

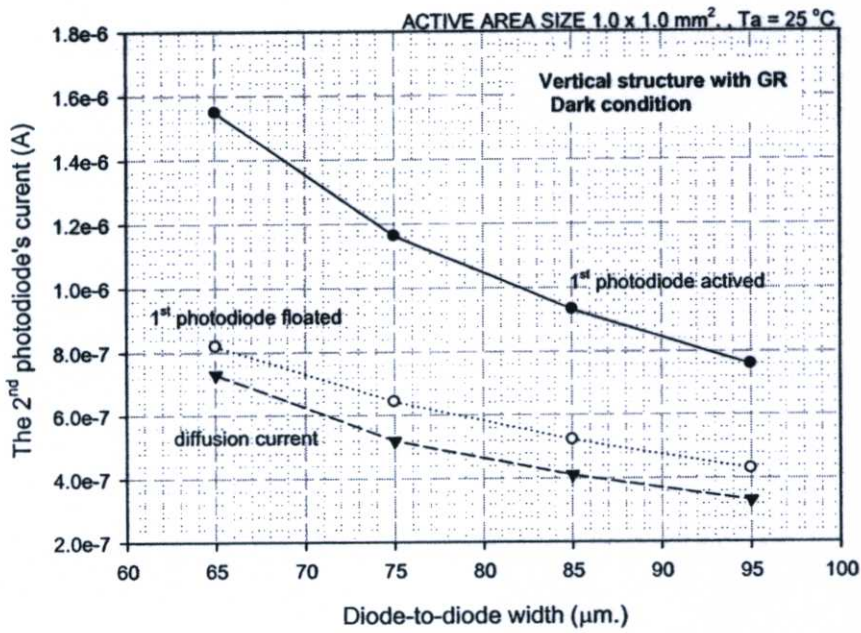
การทดลองในหัวข้อนี้ ได้ศึกษาผลของระยะห่างระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งหลายตัวถูกออกแบบให้เรียงติดกันเป็นแถวเดียว โฟโตไดโอดมีขนาดพื้นที่รับแสง $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. โดยมีกักรังสีล้อมรอบไดโอดแต่ละตัว ความกว้างของ (GR_w) คงที่ $25 \mu\text{m}$. และระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดมีค่า $65, 75, 85$ และ $95 \mu\text{m}$. ตามลำดับ โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งโครงสร้างอเรียที่มีกักรังสี แสดงดังรูปที่ 4.54



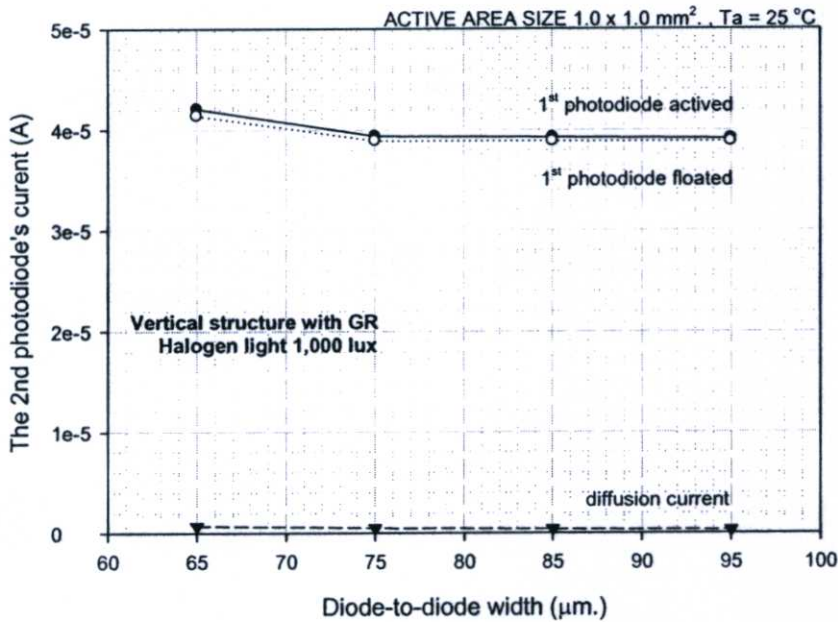
รูปที่ 4.54 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งโครงสร้างอเรียที่มีกักรังสี

โดยการทดลองได้เปรียบเทียบกระแสการแพร่ (diffusion current) ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบปกติ (ไม่มีกักรังสี) และซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบมีกักรังสีล้อมรอบไดโอดแต่ละตัว ชุดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.50 ในการทดลองจะเปรียบเทียบค่ากระแสแสงและกระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่สอง ในขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งได้รับการไบอัสตรงและไม่ได้รับการไบอัสตรงทั้งกรณีไม่ได้รับแสง และได้รับแสง โดยใช้แสงจากหลอดฮาโลเจนความเข้ม $1,000 \text{ lux}$

รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่มีกักรังสี เมื่อพิจารณาที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งได้รับไบอัสตรง 1 โวลต์ พบว่ากระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่สองขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ได้รับไบอัสตรงมีค่ามากกว่ากระแสขณะที่ยังซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ไม่ได้รับไบอัสตรงอยู่ 47.12% ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด $65 \mu\text{m}$ และ 43.48% ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด $95 \mu\text{m}$ จะสังเกตเห็นได้ว่า เปรอร์เซ็นต์ความต่างของกระแสมืดระหว่างโฟโตไดโอดตัวที่สองขณะที่ซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งที่ได้รับไบอัสตรงและไม่ได้รับไบอัสตรงนั้นมีค่าลดลง เนื่องจากระยะทางที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสการแพร่มีค่าลดลง โดยกระแสแพร่มีค่าอยู่ระหว่าง $0.33\text{-}0.73 \mu\text{A}$



รูปที่ 4.55 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่มี การ์ดรีจ

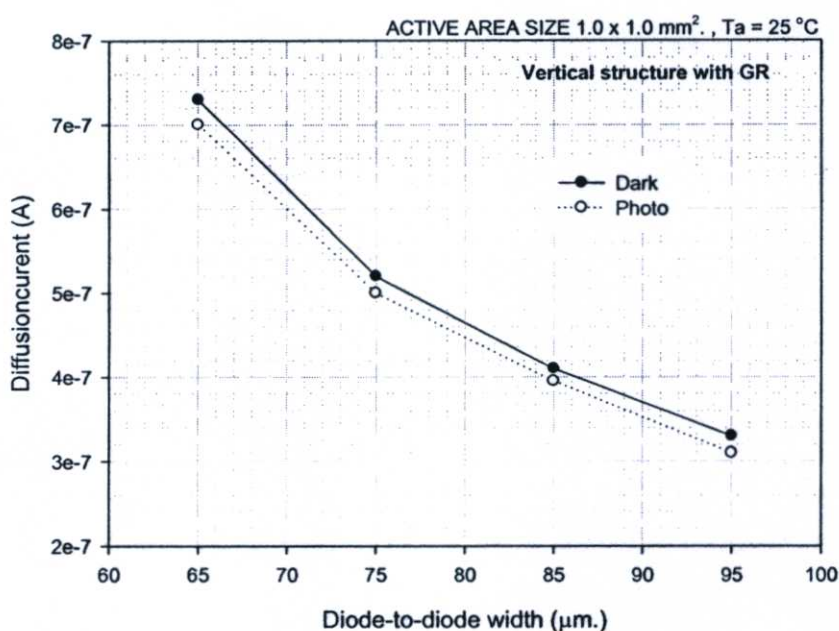


รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่มี การ์ดรีจ

รูปที่ 4.56 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงที่ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบที่มีการ์ดรีจ เมื่อพิจารณาที่ซิลิกอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งได้รับไบอัสตรง 1 โวลต์ พบว่า

กระแสเมิดของซิลิคอน โฟโตไดโอดตัวที่สองขณะทีซิลิคอน โฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งทีได้รับไบอัสตรงมีค่ามากกว่ากระแสขณะทีซิลิคอน โฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งทีไม่ได้รับไบอัสตรงอยู่ 1.66% ทีระยะห่างระหว่างไดโอด 65 μm และ 0.79% ทีระยะห่างระหว่างไดโอด 95 μm จะสังเกตเห็นได้ว่าเปอร์เซ็นต์ความต่างของกระแสเมิดระหว่างโฟโตไดโอดตัวที่สองขณะทีซิลิคอน โฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งทีได้รับไบอัสตรงและไม่ได้รับไบอัสตรงนั้นมิต่ำลดลง เนื่องจากระยะทางทีเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่ากระแสการแพร่มีค่าลดลง โดยกระแสการแพร่มีค่าอยู่ระหว่าง 0.3-0.71 μA

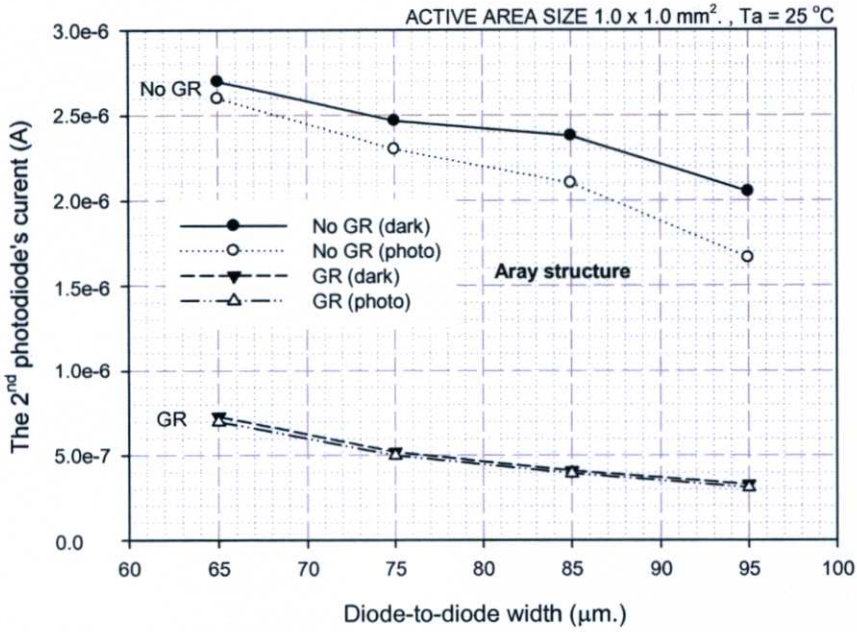
เมื่อเปรียบเทียบกระแสการแพร่ด้านข้างของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบทีมีการ์ดริงขณะทีไม่ได้รับแสง และได้รับแสง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างกัน 30 nA ทีระยะห่างระหว่างไดโอด 65 μm และ 20 nA ทีระยะห่างระหว่างไดโอด 95 μm ดังรูปที 4.57



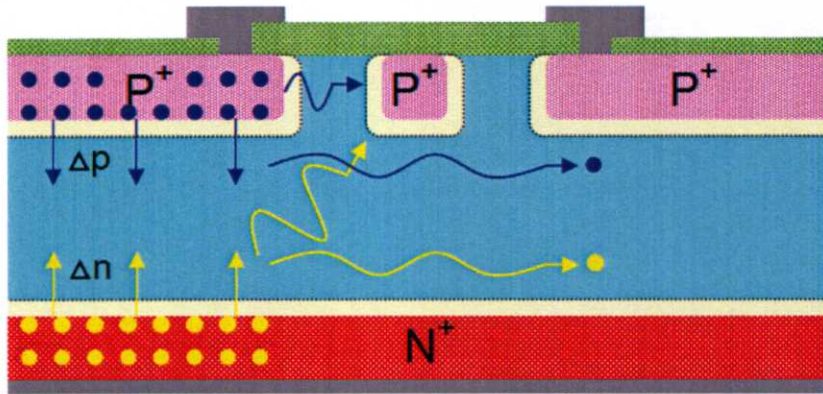
รูปที 4.57 เปรียบเทียบกระแสการแพร่ด้านข้างของโฟโตไดโอดทีระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดค่าต่างๆ แบบทีมีการ์ดริง ขณะทีไม่ได้รับแสง และได้รับแสง

4.10.3 ผลของการ์ดริงทีมีต่อตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย

เมื่อเปรียบเทียบกระแสการแพร่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรียแบบทีไม่มีการ์ดริง และมีการ์ดริงดังรูปที 4.58 พบว่า กระแสการแพร่ของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบมีการ์ดริงล้อมรอบไดโอดแต่ละตัวมีค่าน้อยกว่าซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบไม่มีการ์ดริง เนื่องจากระยะทางส่วนน้อยทีมีการ์ดริงเข้าสู่ชั้นอินทรีนซิคนอกริเวณรอยต่อพี-เอ็น ส่วนหนึ่งจะถูกการ์ดริงป้องกันไม่ให้แพร่เข้าสู่โฟโตไดโอดตัวที่สอง ส่งผลให้กระแสการแพร่ของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบมีการ์ดริงมีค่าน้อยกว่า รูปที 4.59 แสดงทิศทางการแพร่ประจุพาหะส่วนมากของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบมีการ์ดริง โครงสร้างอเรีย

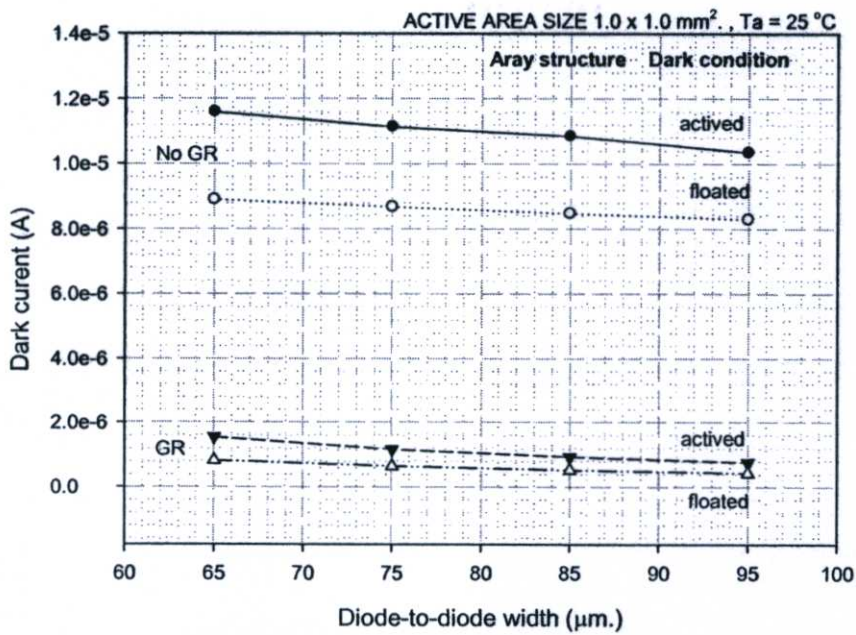


รูปที่ 4.58 กระแสการแพร่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรย์แบบที่ไม่มีการ์ดริงและ มีการ์ดริง



รูปที่ 4.59 ทิศทางการแพร่ประจุพาหะส่วนมากของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบมีการ์ดริง โครงสร้างอเรย์

จากรูปที่ 4.60 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดและระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอด พิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 8 V กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โครงสร้างอเรย์ที่มีการ์ดริงมีค่าน้อยกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โครงสร้างอเรย์ที่ไม่มีการ์ดริง 95.85% เนื่องจากการ์ดริงสามารถช่วยลดกระแสรั่วได้ ด้วยเหตุผลที่อธิบายในหัวข้อ 4.8.1 นอกจากนี้กระแสมืดของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง โครงสร้างอเรย์ที่มีการ์ดริงและไม่มีการ์ดริงมีค่าลดลงกับระยะห่างโฟโตไดโอดที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเหตุผล 2 ประการ



รูปที่ 4.60 กระแสมืดของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างออร์เรย์

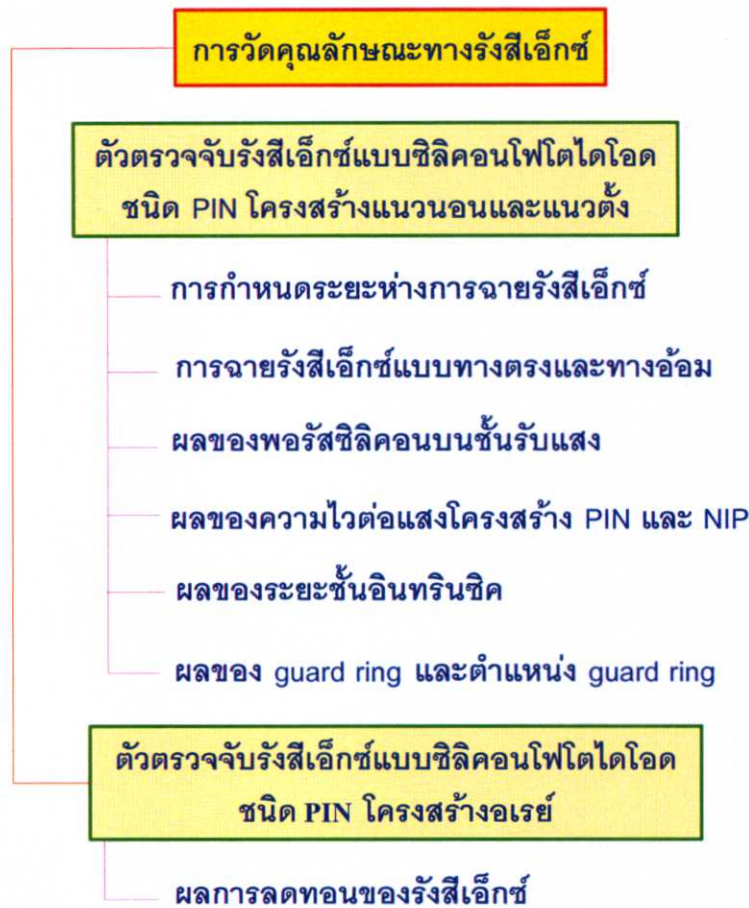
ประการแรก ระยะห่างระหว่างโฟโตไดโอดที่เพิ่มขึ้น ทำให้พหุคูณที่ทำให้เกิดกระแสมืดจากซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่หนึ่งแพร่ไปยังซิลิคอนโฟโตไดโอดตัวที่สองได้น้อยลง ตามที่อธิบายไปแล้วข้างต้น

ประการที่สอง ในการออกแบบเพื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอด คือการเพิ่มระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริง ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแต่ละตัว ซึ่งระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริงมีค่า 20, 25, 30 และ 35 μm. ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.42 ที่ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงและการ์ดริง 25 – 50 μm. มีค่าลดลงซึ่งสอดคล้องกับ รูปที่ 4.60

บทที่ 5

ผลการทดลองทางรังสีเอ็กซ์และการอภิปราย

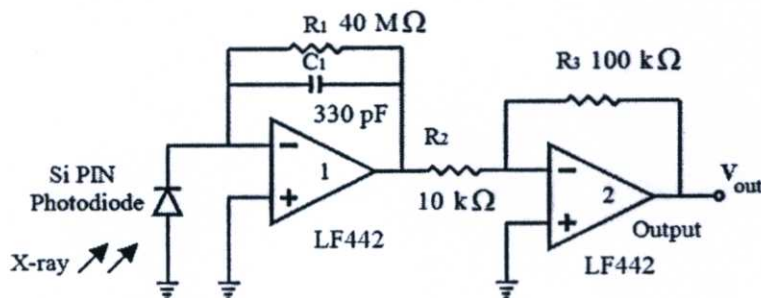
ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและการอภิปรายผลการทดลองของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งและแนวนอน และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างอเรีย โดยแบ่งหัวข้อการทดลองออกดังแผนผังการทดลองรูปที่ 5.1 ดังนี้



รูปที่ 5.1 แผนผังการทดลองตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN

การทดลองทางรังสีเอ็กซ์ในบทนี้ กล่าวถึงการศึกษาตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอนที่วัดกับรังสีเอ็กซ์ โดยผลการทดลองนำเสนอ (1) การกำหนดระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (2) ผลการตรวจจับรังสีเอ็กซ์วิธีตรงและวิธีอ้อม (3) ผลของพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับแสง (4) ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP ที่มีต่อความไวรังสีเอ็กซ์ (X-ray Sensitivity) (5) ผลของระยะชั้นอินทรีนซิค (6) ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง (7) ผลการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ต่อวัสดุตัวอย่าง

ในการทดสอบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอดที่วัดกับรังสีเอ็กซ์ โดยตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ ในลักษณะแบบ Photovoltaic mode ดังแสดงในรูปที่ 5.2

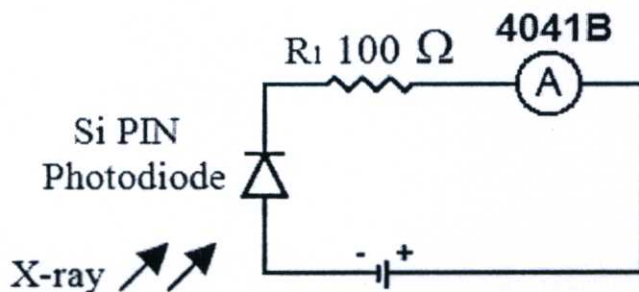


รูปที่ 5.2 การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

วงจรขยายภาคแรกจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสแสงที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยมีอัตราขยาย 40mV/nA วงจรขยายภาคที่สองเป็นวงจรขยายแรงดันเพื่อขับออกที่เอาต์พุต โดยมีอัตราขยายเป็น 10 เท่า

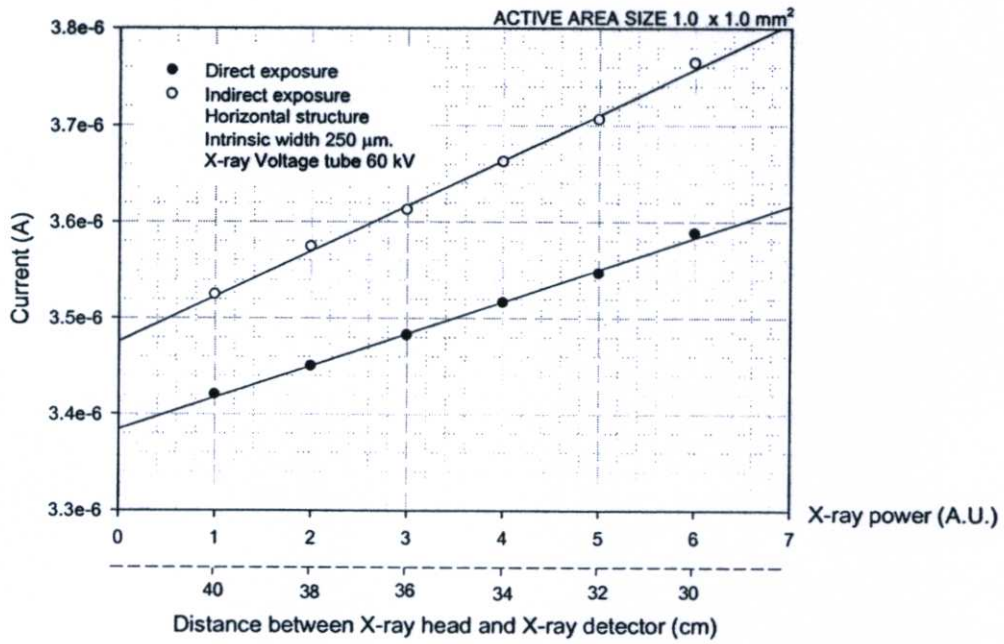
5.1 การกำหนดระยะห่างระหว่างหัวฉายรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

ในการทดลองใช้แหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์คือ หัวฉายรังสีเอ็กซ์ Asahi รุ่น G610S ซึ่งมีค่ากระแสไฟฟ้า 10 mA และแรงดันหลอดรังสีเอ็กซ์คงที่ 60 kV เนื่องจากในบางการทดลองมีความจำเป็นต้องเปลี่ยนระดับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งโดยปกติสามารถควบคุมพลังงานรังสีเอ็กซ์ได้จากการกำหนดแรงดันที่จ่ายให้กับหลอดรังสีเอ็กซ์ แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการทดลองนี้ไม่สามารถกำหนดแรงดันที่จ่ายให้กับหลอดรังสีเอ็กซ์ได้ ดังนั้นจึงต้องทำการกำหนดระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์เพื่อหาระยะที่ทำให้พลังงานของรังสีเอ็กซ์เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น



รูปที่ 5.3 วงจรทดลองเพื่อหาระยะห่างระหว่างหัวฉายรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์

รูปที่ 5.3 แสดงวงจรการทดลองเพื่อหาระยะที่ทำให้พลังงานของรังสีเอ็กซ์เปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น จะทำการต่อความต้านทาน $100\ \Omega$ อนุกรมกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ซึ่งตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ถูกไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ และใช้ Source Meter HP รุ่น 4041B วัดกระแสไฟฟ้าที่ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จ่ายออกมา ขณะที่ตรวจจับรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยตรงและวิธีอ้อม



รูปที่ 5.4 ระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ทำให้กระแสไฟฟ้าเอาท์พุทเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น

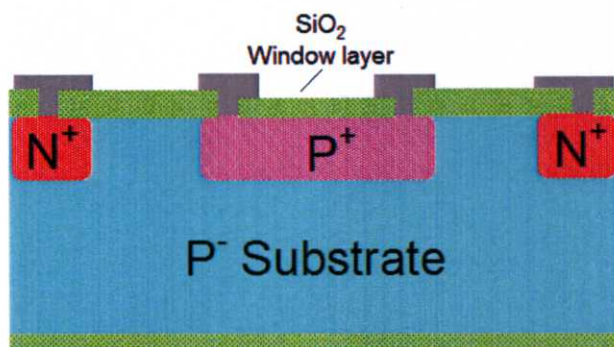
กลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์นั้นเกิดจากโฟตอนของรังสีเอ็กซ์ในการตรวจจับวิธีตรงและเกิดจากโฟตอนของแสงสีเขียวการตรวจจับวิธีอ้อม โดย 1 โฟตอนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล 1 คู่อิเล็กตรอน-โฮลจะทำให้เกิดกระแสค่าๆหนึ่ง ดังนั้นกระแสไฟฟ้าที่ได้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้นกับจำนวนโฟตอนหรือพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง จากรูปที่ 5.4 แสดงระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ทำให้ค่ากระแสไฟฟ้าของวงจรเปลี่ยนแปลงอย่างเชิงเส้น ซึ่งกระแสไฟฟ้ามาจากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นกล่าวอีกนัยหนึ่งคือพลังงานของรังสีเอ็กซ์เพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นนั่นเอง ซึ่งในการทดลองจะใช้ระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในรูปที่ 5.4 เป็นค่าอ้างอิงในการทดลอง

5.2 ผลของการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม

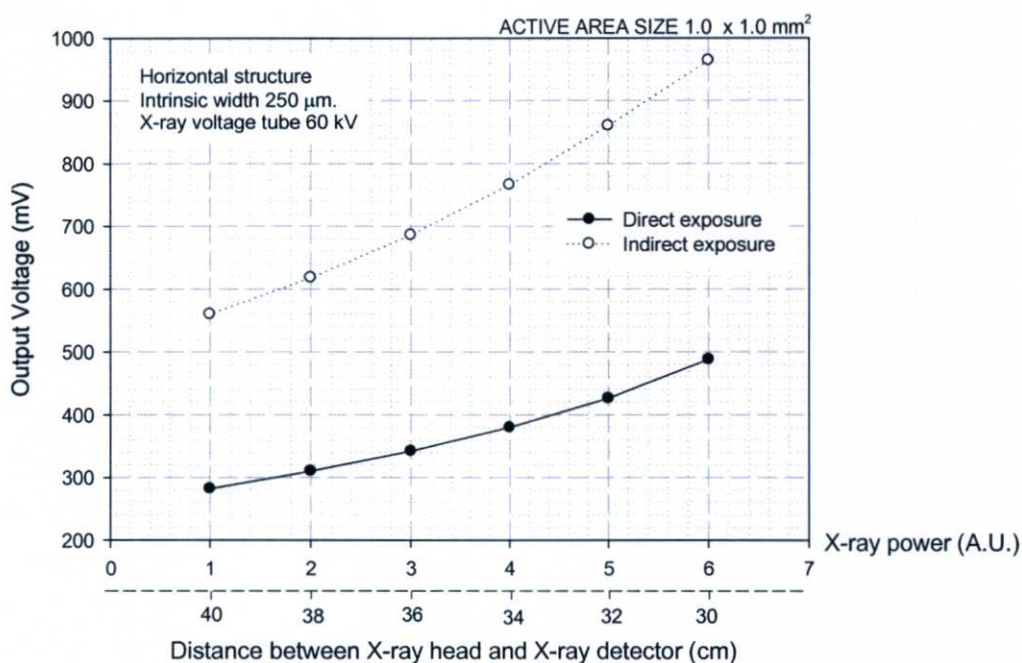
การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของการตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม ที่มีต่อการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอน

5.2.1 ผลของการตรวจรังสีเอกซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อมของตัวตรวจรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน

ตัวตรวจรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงชนิดพีเข้มข้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน ระยะชั้นอินทรินซิกคงที่ $250 \text{ }\mu\text{m}$. และมีชั้นเอ็นเข้มข้นล้อมรอบพื้นที่รับแสงชนิดพี โดยมีชั้นรับรังสีแบบซิลิคอนไดออกไซด์ โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวนอน ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีแสดงดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี



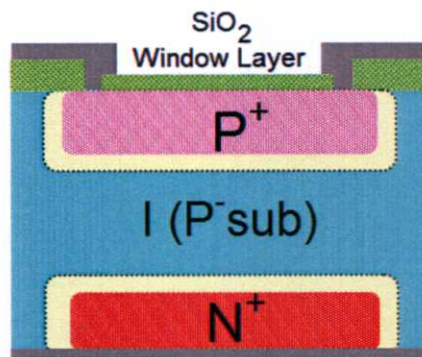
รูปที่ 5.6 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุทของตัวตรวจรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน

รูปที่ 5.6 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุทของวงจร ทั้งกรณีตรวจรังสีเอกซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม พบว่าตัวตรวจรังสีเอกซ์ที่ตรวจรังสีเอกซ์ด้วยวิธีโดยอ้อมสามารถ

จ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยตรงสูงสุดถึง 88% เนื่องจากการตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยอ้อมเป็นการตรวจจับสนีเอ็กซ์ผ่านชั้นสารเรืองแสง Gadolinium Oxysulfide Activated with Terbium ($Gd_2O_2S:Tb$) ซึ่งมีคุณสมบัติเรืองแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 545 nm. เมื่อถูกตรวจจับสนีเอ็กซ์ ดังนั้นตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์จะดูดกลืนแสงสีเขียวและสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมีคุณสมบัติสามารถตอบสนองต่อคลื่นในย่านความถี่แสงที่มองเห็นได้ โดยเฉพาะแสงสีเขียวได้ดีกว่าคลื่นความถี่ในย่านรังสีเอ็กซ์ [36] จึงส่งผลให้แรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทของวงจรจากการตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยอ้อมมากกว่าการตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยตรง

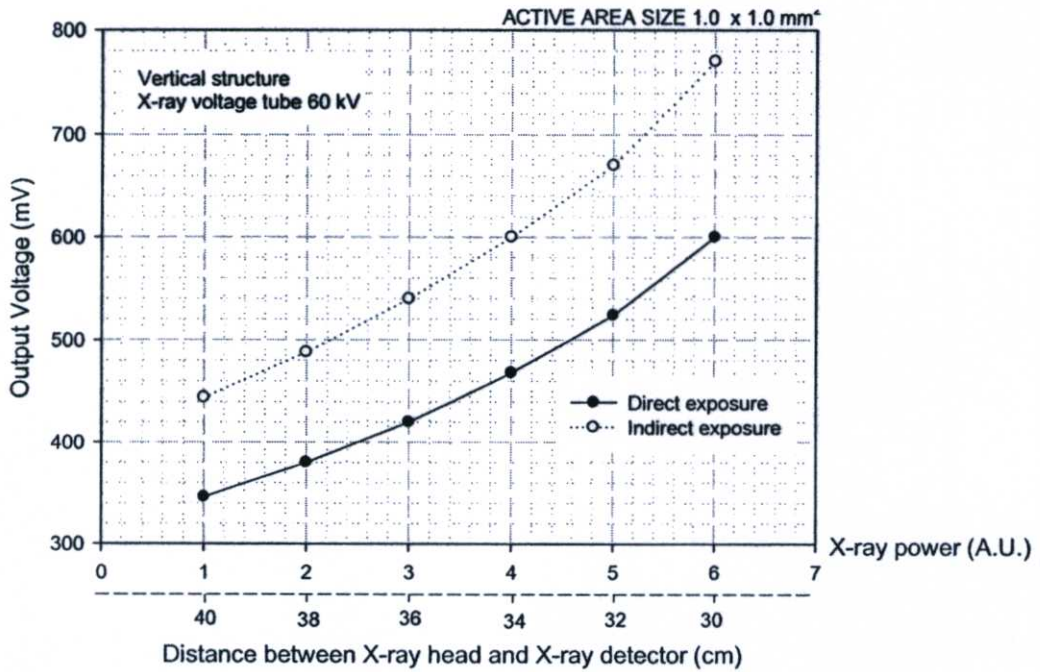
5.2.2 ผลของการตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อมของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง

ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากันทุกตัว โดยมีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี แสดงดังรูปที่ 5.7



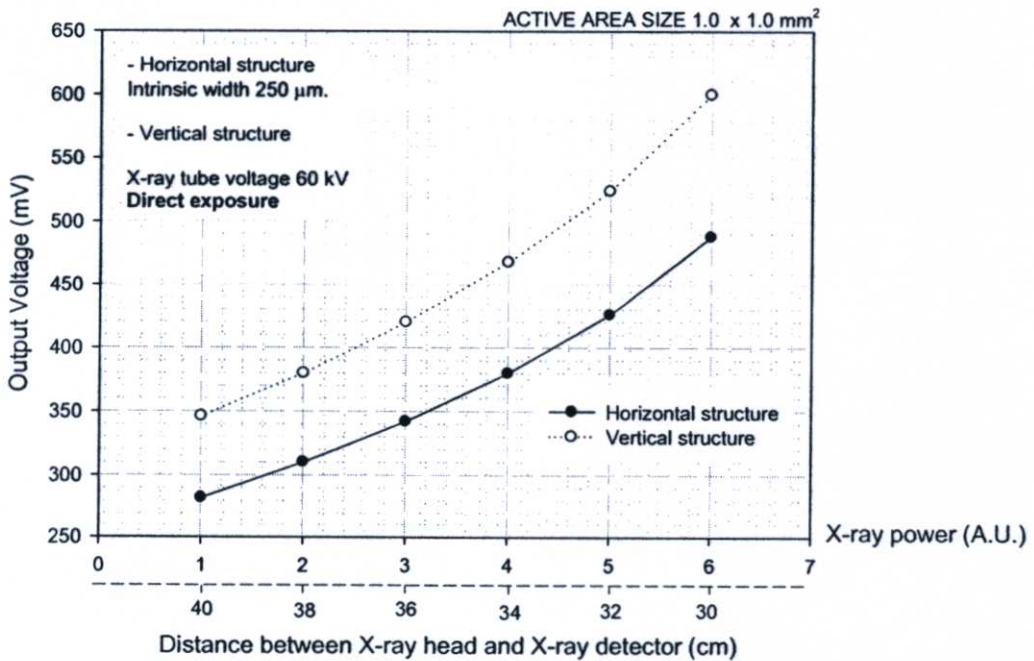
รูปที่ 5.7 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

รูปที่ 5.8 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาท์พุทของวงจร ทั้งกรณีตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบวิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อม พบว่าตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ที่ตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยอ้อมสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยตรงสูงสุดถึง 28.3 % เนื่องจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้วข้างต้น



รูปที่ 5.8 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง

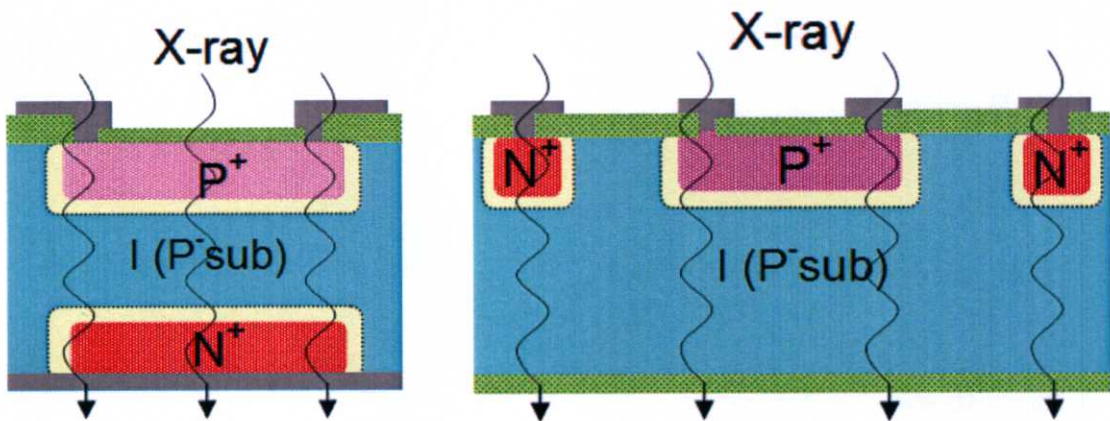
5.2.3 การเปรียบเทียบการตรวจจับสนีเอ็กซ์วิธีโดยตรงและวิธีโดยอ้อมของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้ง



รูปที่ 5.9 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้ง ด้วยวิธีการตรวจจับสนีเอ็กซ์วิธีตรง

รูปที่ 5.9 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนและแนวตั้ง ด้วยวิธีการตรวจจับสนีเอ็กซ์วิธีตรง พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแวนอนสูงสุดถึง 22.95 %

การตรวจจับสนีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยตรงนั้น ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์จะดูดกลืนรังสีเอ็กซ์โดยตรงคั้งนั้นตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์สามารถดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้ทั้งชั้นสาร กรณีตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งนั้น ขั้วไฟฟ้าจะอยู่ที่บริเวณผิวด้านบนและผิวด้านล่างของผลึกฐานรอง ในขณะที่ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแวนอนนั้น ขั้วไฟฟ้าจะอยู่เฉพาะที่บริเวณผิวด้านบนของผลึกฐานรอง ดังนั้นพื้นที่ชั้นอินทรีนซิกที่สามารถดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ได้นั้น ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งมีมากกว่าตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแวนอน จึงส่งผลให้ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งสามารถจ่ายกระแสได้มากกว่าแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอน

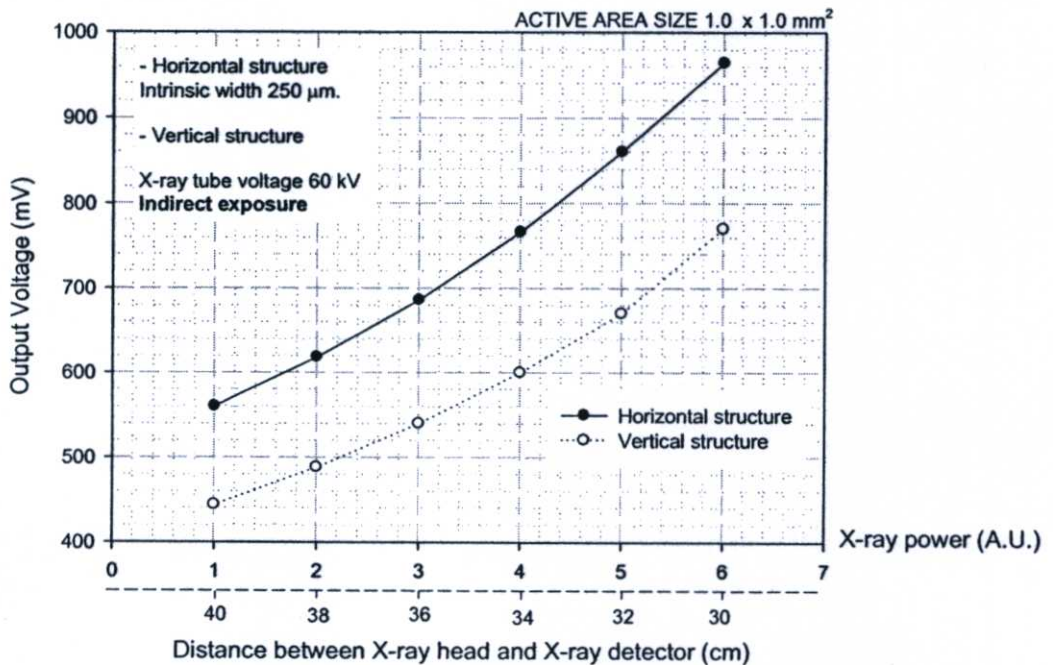


รูปที่ 5.10 การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ (ก) โครงสร้างแวนอน (ข) โครงสร้างแนวตั้ง

นอกจากนี้ ดังที่ได้กล่าวไปแล้ว กระแสที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นที่บริเวณเขตปลอดพาหะ ดังนั้นเมื่อบริเวณเขตปลอดพาหะเพิ่มมากขึ้น การดูดกลืนรังสีเอ็กซ์ในบริเวณปลอดพาหะของสารกึ่งตัวนำจึงเกิดมากขึ้น (อัตราการเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนรังสีเอ็กซ์มากขึ้น) เมื่อเปรียบเทียบพื้นที่รอยต่อ $P^+ - i$ และ รอยต่อ $N^+ - i$ ระหว่างตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนและแนวตั้ง ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งนั้นมีพื้นที่รอยต่อมากกว่าตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแวนอน ทำให้เขตปลอดพาหะในกรณีตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งมากกว่าตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์โครงสร้างแวนอนดังรูปที่ 5.10

รูปที่ 5.11 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนและแนวตั้ง ด้วยวิธีการตรวจจับสนีเอ็กซ์วิธีอ้อม พบว่า

แรงดันเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งถึง 25.19 %



รูปที่ 5.11 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้ง ด้วยวิธีการตรวจจับรังสีเอ็กซ์วิธีอ้อม

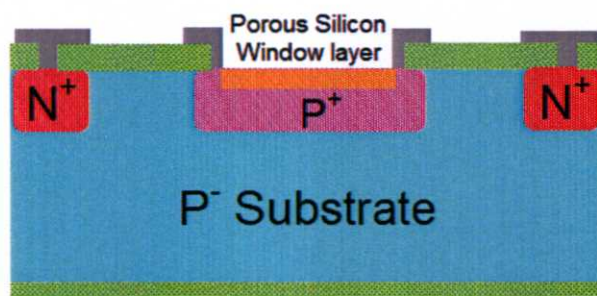
การตรวจจับรังสีเอ็กซ์ด้วยวิธีโดยอ้อมนั้น เป็นการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ผ่านชั้นเรืองแสง ซึ่งมีคุณสมบัติเรืองแสงสีเขียวเมื่อถูกตรวจจับด้วยรังสีเอ็กซ์ ดังนั้นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะดูดกลืนแสงสีเขียวซึ่งเป็นแสงที่ตามองเห็นได้ ดังนั้นกลไกการเกิดกระแสะจะเหมือนกับกรณีการตรวจจับด้วยแสงจากหลอดฮาโลเจนดังที่ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.5.7 กล่าวคือตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์สามารถดูดกลืนแสงสีเขียวได้เฉพาะบริเวณผิวของผลึกฐานรองเท่านั้น เนื่องจากอำนาจการทะลุทะลวงของแสงสีเขียวน้อยกว่ารังสีเอ็กซ์นั่นเอง เมื่อเปรียบเทียบบริเวณปลอดพาหะที่ผิว ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนจะมีมากกว่าตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้ง ดังนั้นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวนอนจึงสามารถจ่ายกระแสได้มากกว่าตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้ง

5.3 ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิด PIN ที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับรังสี

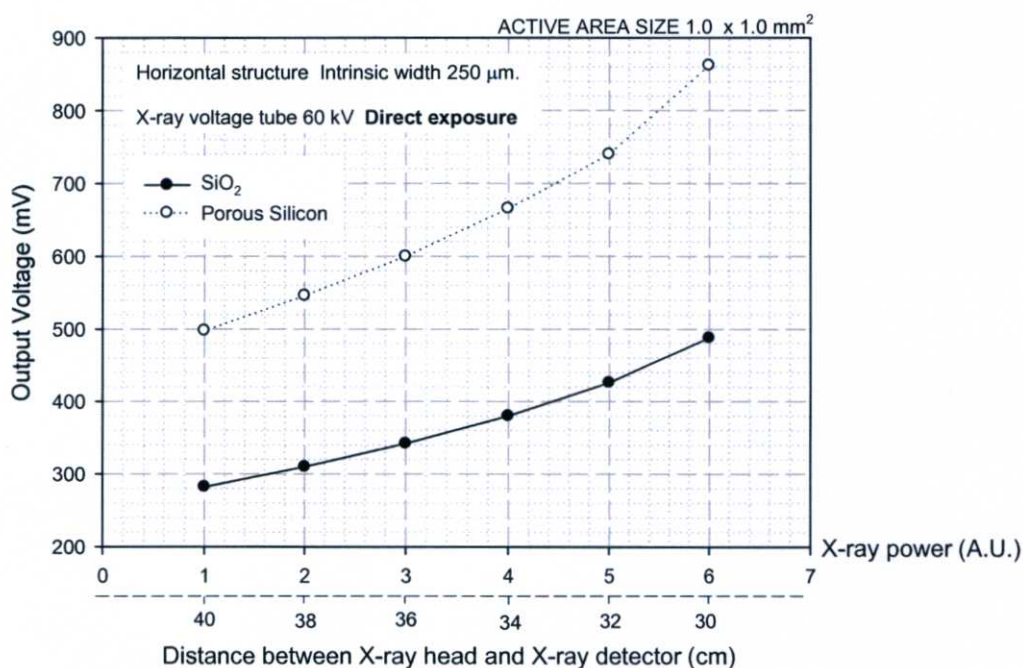
การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของพอร์ซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีที่มีต่อการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอด โดยเปรียบเทียบทั้งแบบแนวตั้งและแนวนอน

5.3.1 ผลของพอร์ซิลิคอนที่อยู่บนชั้นรับรังสีของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน

ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงชนิดพีเพิ่มขึ้นขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน ระยะชั้นอินทรินซิกคองที่ $250 \text{ }\mu\text{m}$. และมีชั้นเอ็นเพิ่มขึ้นล้อมรอบพื้นที่รับแสงชนิดพี โดยมีพอร์ซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับรังสีแสดงดังรูปที่ 5.12 และแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีแสดงดังรูปที่ 5.5



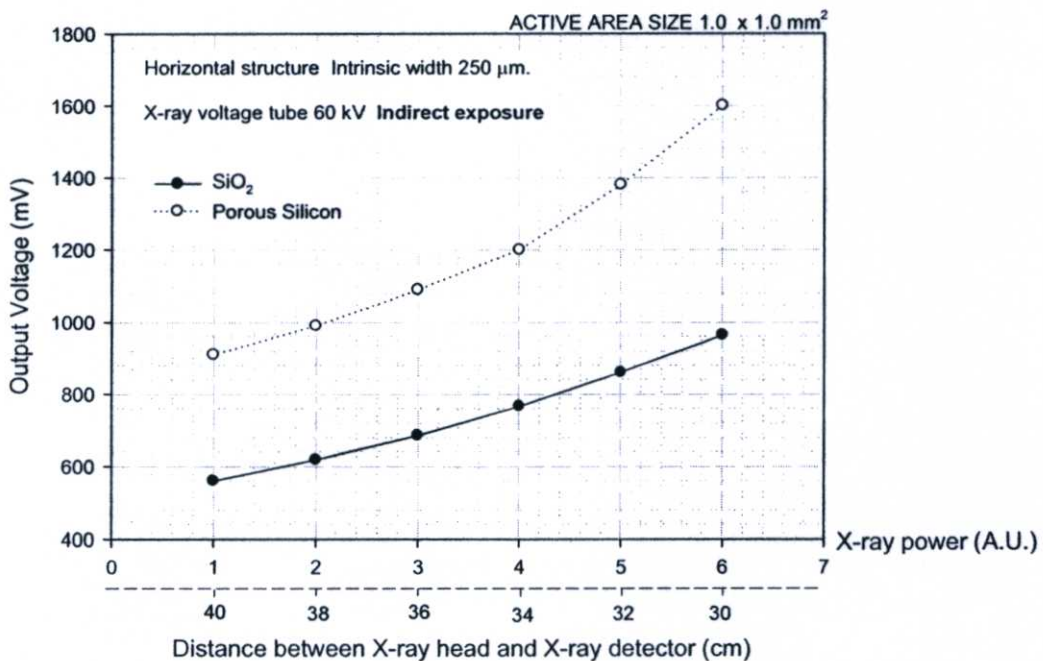
รูปที่ 5.12 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับรังสี



รูปที่ 5.13 แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรในการตรวจจับแบบวิธีตรงของตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์ซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

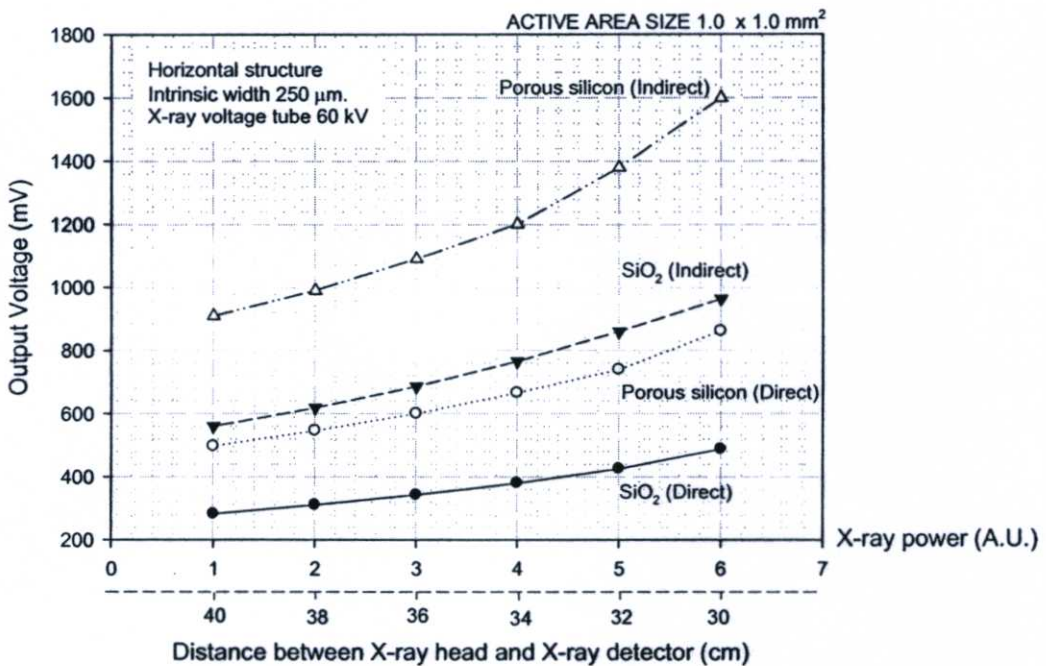
รูปที่ 5.13 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจร กรณีที่มีพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี ในกรณีการตรวจจับแบบวิธีตรง ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีมากถึง 76.6 % ทั้งนี้เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง [33] ในขณะที่ซิลิคอนไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวที่เรียบ ดังนั้นพอร์สซิลิคอนจึงมีพื้นที่ผิวที่สามารถรับรังสีได้มากกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

รูปที่ 5.14 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจร กรณีที่มีพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี ในกรณีการตรวจจับแบบวิธีอ้อม ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีมากถึง 66 % ทั้งนี้เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้พอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ส่งผลให้แสงมีการสะท้อนน้อยลง อีกทั้งพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนหรือดักจับแสง (light trapping) ได้ดี ส่งผลให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี



รูปที่ 5.14 แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรในการตรวจจับแบบวิธีอ้อมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

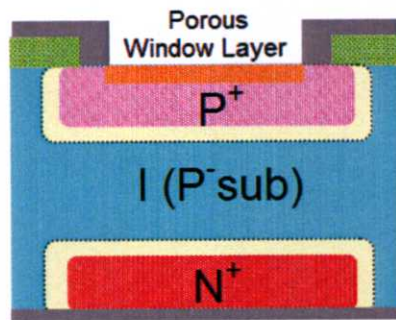
เมื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจร กรณีที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี ในการตรวจจับแบบวิธีอ้อม ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับแบบวิธีตรง โดยตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับแบบวิธีตรง 49.38% และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน ชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับแบบวิธีตรง 46.13 % ดังแสดงในรูปที่ 5.15



รูปที่ 5.15 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

5.3.2 ผลของพอร์สซิลิคอนที่อยู่บนชั้นรับรังสีของของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง

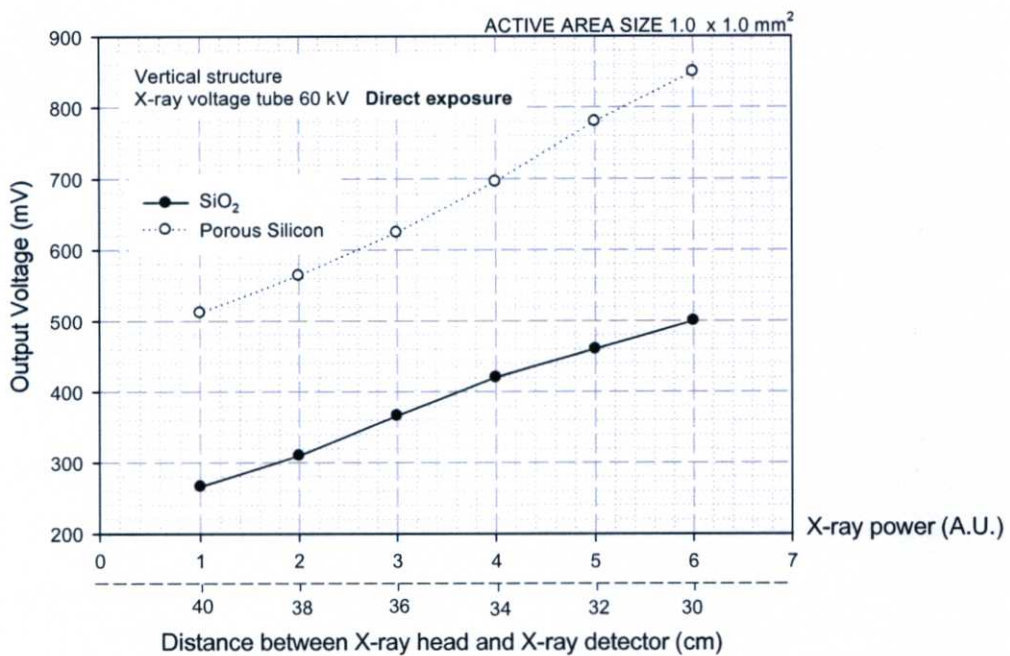
ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.0 x 1.0 mm². เท่ากันทุกตัว โดยมีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี โครงสร้างภาคตัดขวางของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีแสดงดังรูปที่ 5.16 และแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีแสดงดังรูปที่ 5.7



(ก)

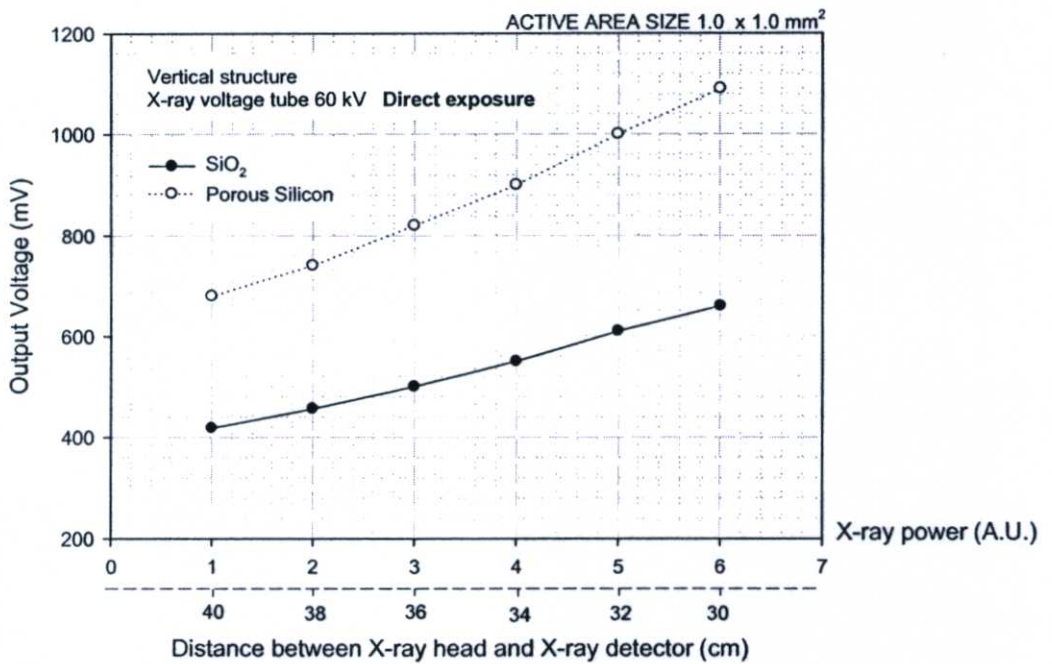
รูปที่ 5.16 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสี

รูปที่ 5.17 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรถ่ายภาพที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี ในกรณีการตรวจจับแบบวิธีตรง ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีมากถึง 70 % ทั้งนี้เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้มีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง ในขณะที่ซิลิคอนไดออกไซด์มีพื้นที่ผิวที่เรียบ ดังนั้นพอร์สซิลิคอนจึงมีพื้นที่ผิวที่สามารถรับรังสีได้มากกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ส่งผลให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี



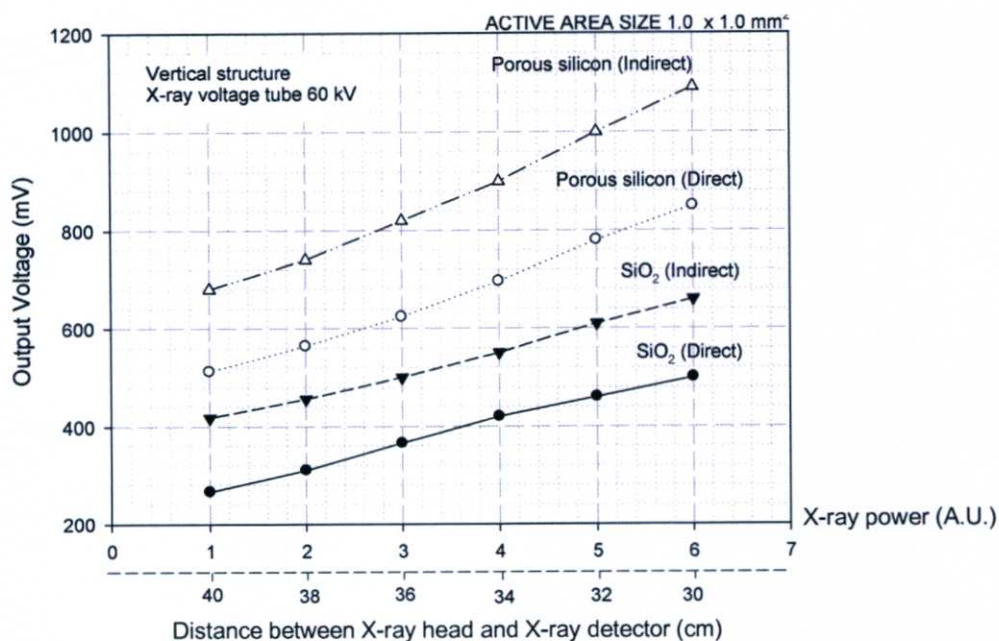
รูปที่ 5.17 แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรถ่ายภาพในกรณีการตรวจจับแบบวิธีตรงของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี

รูปที่ 5.18 เปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุทของวงจร กรณีสี่ที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี ในกรณีการตรวจจับแบบวิธีอ้อม ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีมากถึง 65 % ทั้งนี้เนื่องพอร์สซิลิคอนมีโครงสร้างที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ทำให้พอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิคอนไดออกไซด์ ส่งผลให้แสงมีการสะท้อนน้อยลง อีกทั้งพอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติดูดกลืนโฟตอนหรือดักจับแสง (light trapping) ได้ดี ส่งผลให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีพอร์สซิลิคอนบนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าแบบซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี



รูปที่ 5.18 แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุทของวงจรในการตรวจจับแบบวิธีอ้อมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นรับรังสีแบบพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์

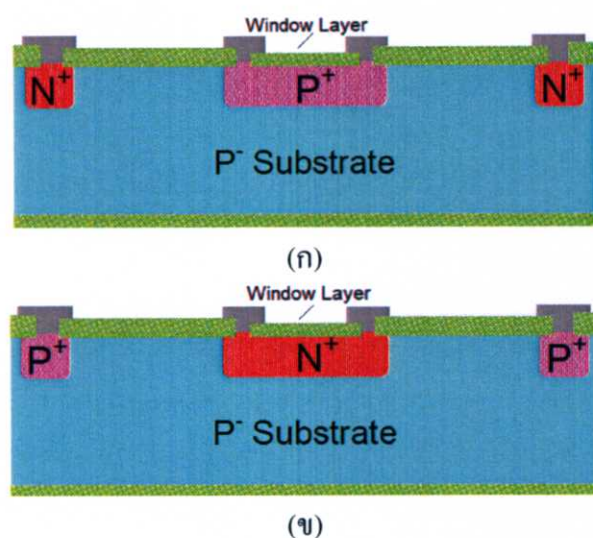
เมื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุทของวงจร กรณีสี่ที่มีพอร์สซิลิคอน และซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสี ในการตรวจจับแบบวิธีอ้อม ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับแบบวิธีตรง โดยตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับแบบวิธีตรง 24.24% และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นพอร์สซิลิคอน ชั้นรับรังสีสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าได้มากกว่าการตรวจจับแบบวิธีตรง 22.02 % ดังแสดงในรูปที่ 5.19



รูปที่ 5.19 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งที่มีชั้นรับแสงแบบพอร์ซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์

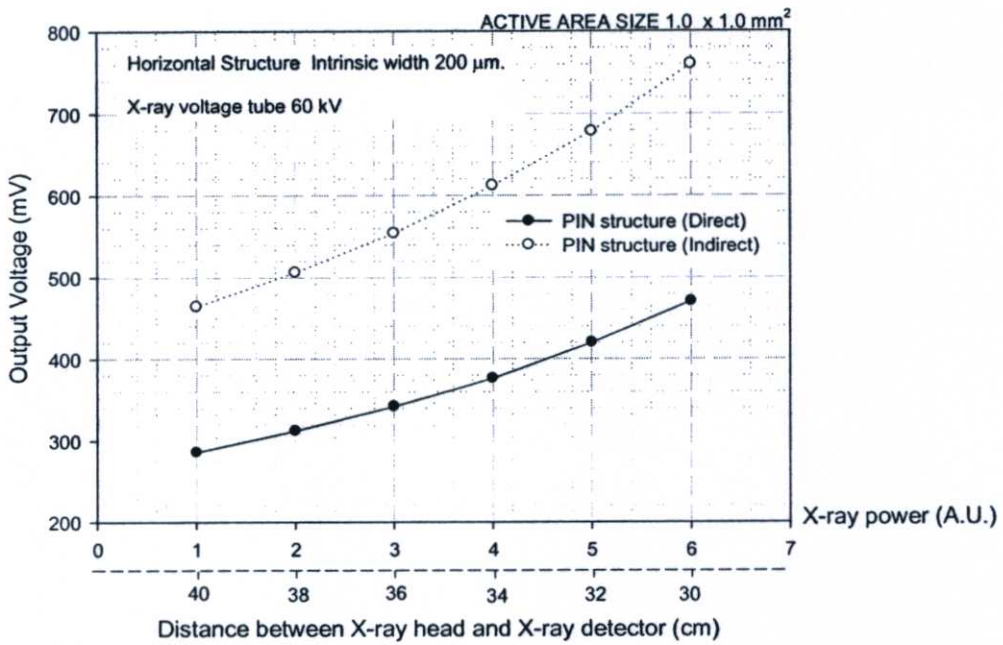
5.4 ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของโครงสร้าง PIN และ NIP ที่มีต่อการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด 1.0 x 1.0 mm². เท่ากันและมีระยะชั้นอินทรีนซิคคองที่ 200 μm. โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP แสดงดังรูปที่ 5.20

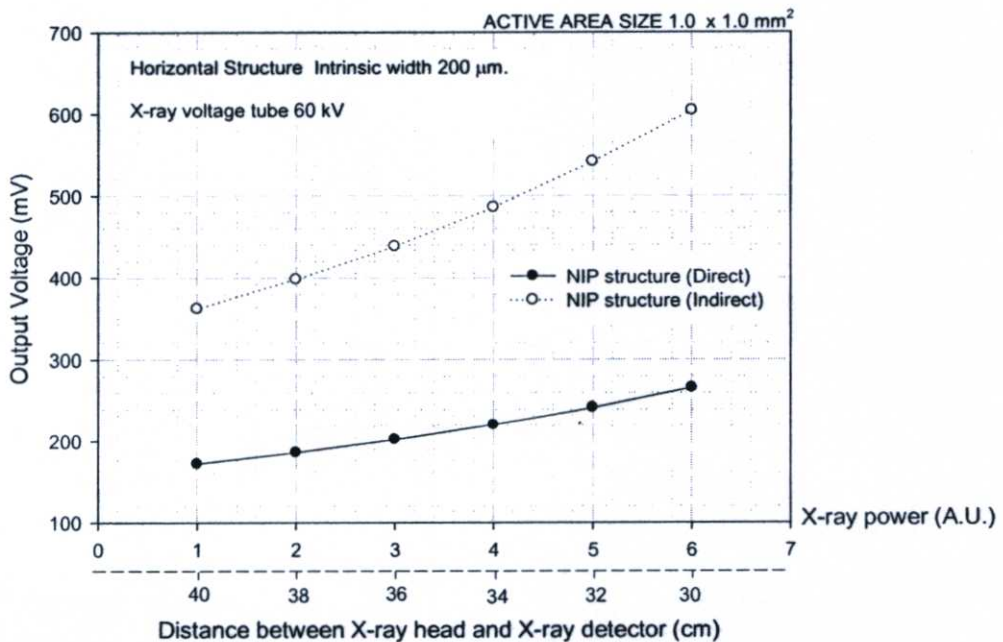


รูปที่ 5.20 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอน (ก) PIN (ข) NIP

ในรูปที่ 5.21 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ลดลง ทั้งการตรวจจับด้วยวิธีตรงและวิธีอ้อม โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ด้วยการตรวจจับแบบวิธีอ้อมมีค่ามากกว่าวิธีตรง 38.16%



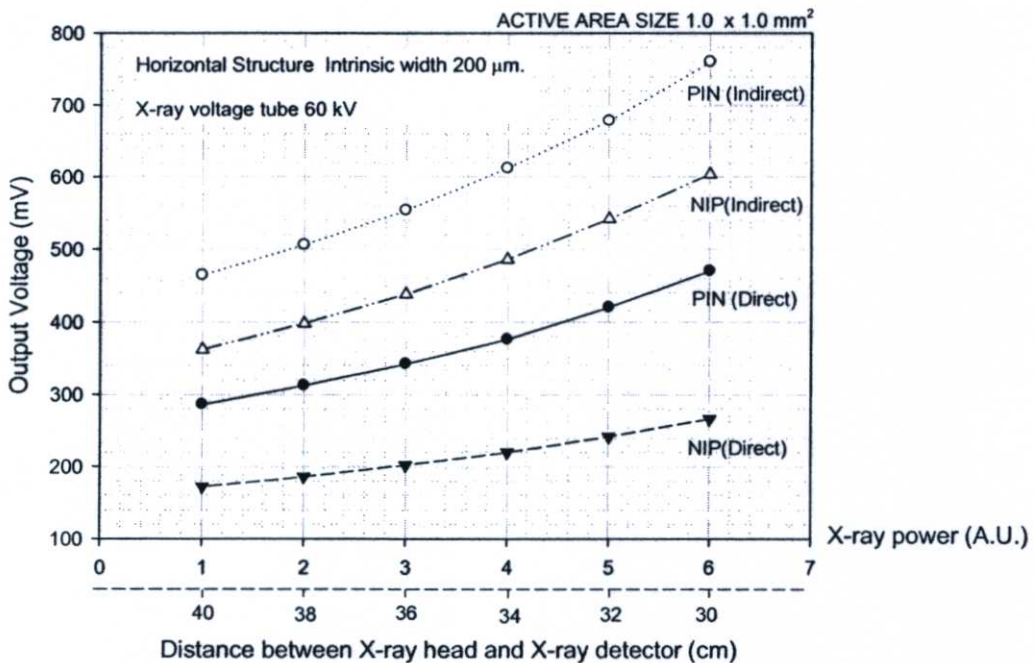
รูปที่ 5.21 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN



รูปที่ 5.22 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด NIP

ในรูปที่ 5.22 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด NIP แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างหัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ลดลง ทั้งการตรวจจับด้วยวิธีตรงและวิธีอ้อม โดยแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด NIP ด้วยการตรวจจับแบบวิธีอ้อมมีค่ามากกว่าวิธีตรง 55.96% เช่นเดียวกับโครงสร้าง PIN

เมื่อเปรียบเทียบแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP ดังแสดงในรูปที่ 5.23 พบว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN มีค่ามากกว่า ชนิด NIP ทั้งการตรวจจับวิธีตรง และการตรวจจับวิธีอ้อม โดยในการตรวจจับวิธีตรง แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN มีค่ามากกว่า ชนิด NIP 43.4 % และในการตรวจจับวิธีอ้อม แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN มีค่ามากกว่า ชนิด NIP 20.53 % ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการวัดด้วยแสงจากหลอดฮาโลเจน เนื่องจากกลไกการเคลื่อนที่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดจากรังสีเอ็กซ์และแสงจากหลอดฮาโลเจนเหมือนกันดังที่กล่าวในหัวข้อ 4.6

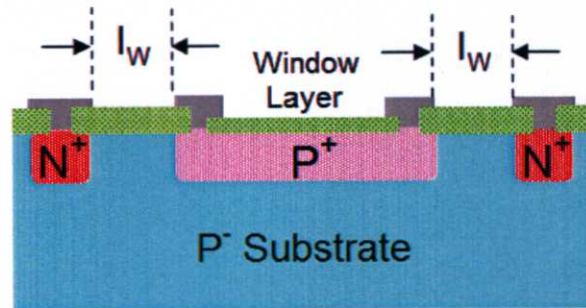


รูปที่ 5.23 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP ด้วยการตรวจจับวิธีตรงและวิธีอ้อม

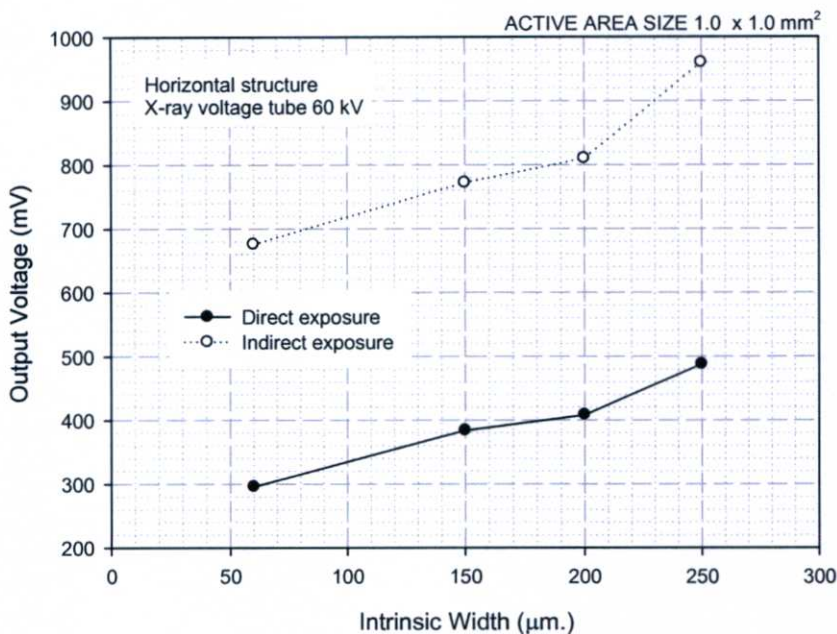
5.5 ผลของระยะชั้นอินทรีนซิก

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของระยะชั้นอินทรีนซิก (ระยะห่างระหว่าง พื้นที่ที่เข้มข้นและเอ็นเข้มข้น : I_w) ที่มีต่อการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโต

ไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์ที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับรังสีขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$. เท่ากัน และระยะชั้นอินทรินซิก (I_w) มีค่า 50, 75, 100, 125 และ 150 μm . ตามลำดับ โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ที่มีระยะชั้นอินทรินซิกค่าต่างๆ แสดงดังรูปที่ 5.24



รูปที่ 5.24 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ที่มีระยะชั้นอินทรินซิกค่าต่างๆ



รูปที่ 5.25 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนที่ความกว้างชั้นอินทรินซิกค่าต่างๆ

รูปที่ 5.25 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตและความกว้างชั้นอินทรินซิกค่าต่างๆ แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนมีค่าเพิ่มขึ้นกับระยะชั้นอินทรินซิกที่เพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่ากระแสแสงส่วนใหญ่จะเกิดที่บริเวณปกคลุมหะ แต่โดยปกติเมื่อซิลิคอนโฟโตไดโอดได้รับรังสีเอ็กซ์ ซิลิคอนโฟโต

ไดโอดจะดูดกลืนแสงทั้งชั้นสารกึ่งตัวนำ ทั้งบริเวณที่เข้มข้น เอ็นเข้มข้น และชั้นอินทรีนซิคทำให้เกิดกระแสแสงได้เช่นเดียวกัน ดังนั้นแม้ว่าเขตปลอดพาหะมีค่าคงที่ ทำให้กระแสแสงมีค่าคงที่แต่ชั้นอินทรีนซิคที่มีความกว้างเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย

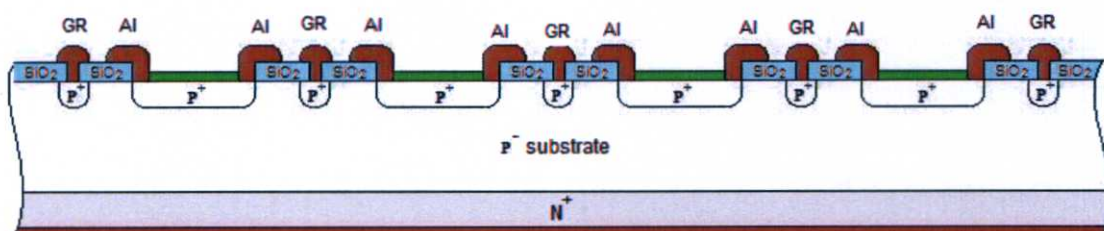
5.6 ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง ที่มีต่อการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP

เนื่องจากการทดสอบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอน โฟโตไดโอดที่วัดกับรังสีเอ็กซ์นั้น ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ ในลักษณะแบบ Photovoltaic mode คือ ไม่มีการไบอัสย้อนกลับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด ซึ่งการต่อการใช้งานตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ลักษณะนี้จะไม่มีกระแสมีคเนื่องจากไม่มีการไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นการ์ดริงซึ่งทำหน้าที่ในการลดกระแสรั่วจึงไม่มีผลในการต่อการใช้งานในลักษณะนี้ อย่างไรก็ตามในการต่อการใช้งานตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในลักษณะแบบ Photoconductive mode คือ มีการไบอัสย้อนกลับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอด การต่อการใช้งานในลักษณะนี้จะเกิดกระแสมีคขึ้นเนื่องจากมีการไบอัสย้อนกลับ ดังนั้น การ์ดริงจึงมีบทบาทในการทำหน้าที่ลดกระแสรั่วในการต่อการใช้งานในลักษณะนี้

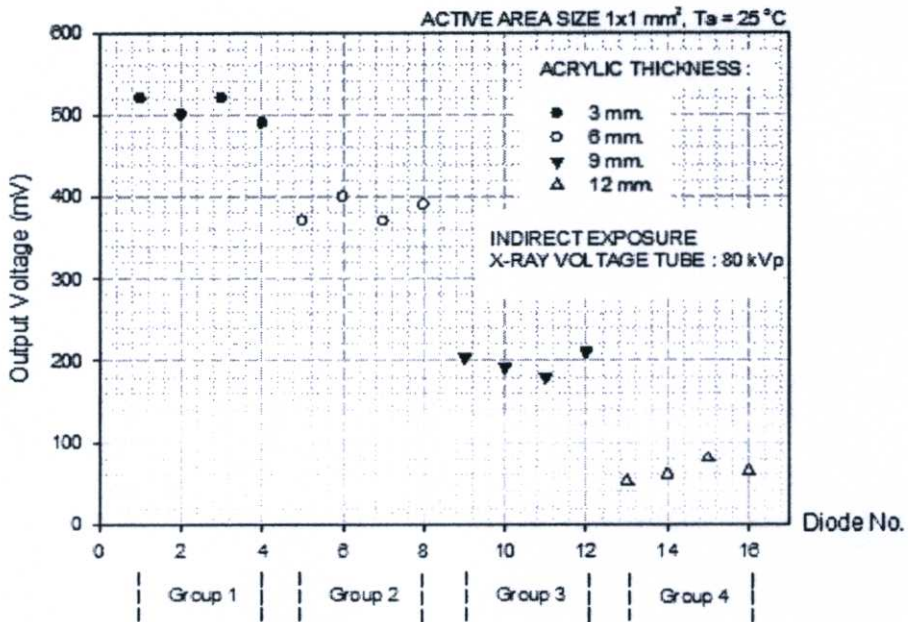
5.7 ผลการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ต่อวัสดุตัวอย่าง

การทดลองในหัวข้อนี้ เพื่อศึกษาผลผลการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ต่อวัสดุตัวอย่าง ที่มีต่อการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดอเรียชนิด PIN โครงสร้างแนวดิ่ง ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับรังสีขนาด $1.0 \times 1.0 \text{ mm}^2$ เท่ากันจำนวน 16 พิกเซล โดยมีการ์ดริงความกว้าง $70 \mu\text{m}$ ล้อมรอบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ทุกตัว ระยะห่างระหว่างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์และการ์ดริงคงที่ $65 \mu\text{m}$ โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดอเรียชนิด PIN โครงสร้างแนวดิ่ง แสดงดังรูปที่ 5.26 รังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการทดลองได้จากเครื่อง CT scanner ยี่ห้อ Toshiba รุ่น TF-6TL-6

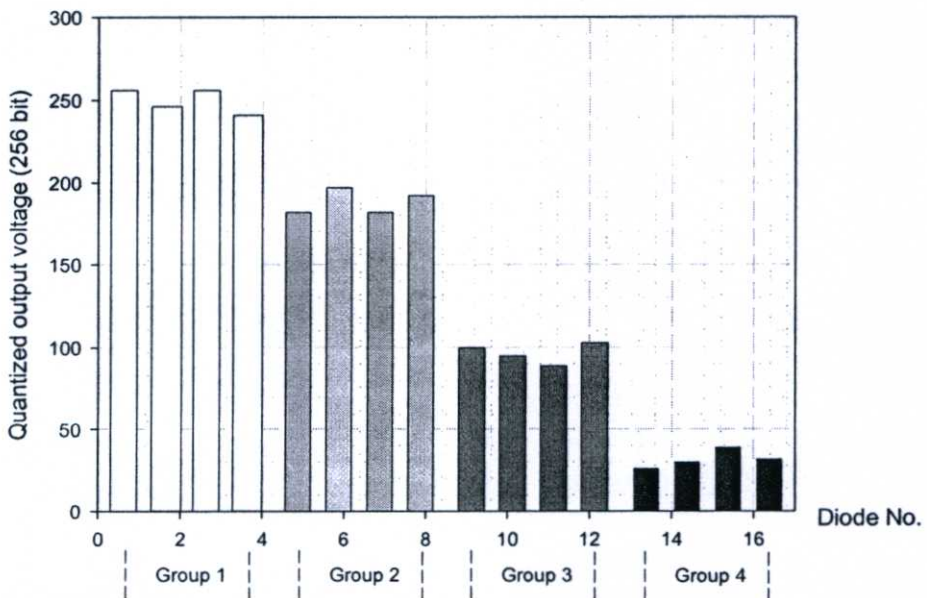


รูปที่ 5.26 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอน โฟโตไดโอดอเรียชนิด PIN โครงสร้างแนวดิ่ง

เพื่อที่จะศึกษาผลการลดทอนรังสีเอ็กซ์ ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้ถูกแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆละ 4 ทิศ โดยในแต่ละกลุ่มถูกปิดบังด้วยแผ่นอะคริลิกหนาที่บิตค่าความหนาต่างกัน 4 ค่า คือ กลุ่มที่หนึ่งถูกปิดบังด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 3 mm. กลุ่มที่สองถูกปิดบังด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 6 mm. กลุ่มที่สามถูกปิดบังด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 9 mm. และกลุ่มที่สี่ถูกปิดบังด้วยแผ่นอะคริลิกหนา 12 mm. ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ถูกทดสอบด้วยการตรวจจับวิธีอ้อม



รูปที่ 5.27 แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ความหนาแผ่นอะคริลิกค่าต่างๆ



รูปที่ 5.28 ภาพหลังจากการควอนไทเซชันแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต

รูปที่ 5.27 แสดงให้เห็นว่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตลดลงเมื่อความหนาแผ่นอะคริลิกเพิ่มขึ้น เนื่องจากพลังงานของรังสีเอ็กซ์ถูกกลทอน โดยแผ่นอะคริลิก [37] นอกจากนี้แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตในแต่ละกลุ่มมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์สามารถแยกความหนาวัตถุที่มีค่าต่างกันได้

แรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตที่นำมาทำการควอนไทเซชัน 256 บิต เกรย์สเกล เพื่อสร้างภาพ 2 มิติ แสดงดังรูปที่ 5.28 จะเห็นได้ว่าเจดสีที่ได้นั้นแตกต่างกันอย่างชัดเจนในแต่ละกลุ่ม และเมื่อเปรียบเทียบในกลุ่มเดียวกัน เจดสีแต่ละพิกเซลมีค่าใกล้เคียงกัน

บทที่ 6

สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการออกแบบ และสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอน ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้ง และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดออร์เรย์ชนิด PIN ลักษณะเด่นของโฟโตไดโอดชนิด PIN คือ จากการที่มีชั้นอินทรีนซิก จึงทำให้ความจุไฟฟ้ารอยต่อมีค่าน้อย จึงทำให้มีการตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็ว และมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงเนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสงที่กว้าง ในปัจจุบันมีการใช้งานโฟโตไดโอดชนิด PIN เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์อย่างแพร่หลาย เช่น การตรวจจับยาเสพติด การตรวจสอบผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร การสร้างภาพทางการแพทย์ การสร้างภาพ 3 มิติ และระบบการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ศึกษาลักษณะทางไฟฟ้า ทางแสง และการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอน โครงสร้างแนวตั้ง และซิลิคอนโฟโตไดโอดออร์เรย์ ผลการทดลองแบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ผลการทดลองทางด้านแสง และผลการทดลองทางด้านรังสีเอ็กซ์ โดยผลการทดลองทางด้านแสงนำเสนอ ผลการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับแสง และไม่ได้รับแสง ลักษณะสมบัติความจุ-แรงดันไฟฟ้า การวัดผลตอบสนองเชิงความถี่ของซิลิคอนโฟโตไดโอด ผลของพอร์สซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ที่เป็นชั้นรับแสง ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP ผลของระยะชั้นอินทรีนซิก ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง ผลของพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงที่มีต่อความหนาแน่นกระแส และผลของระยะห่างระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดโครงสร้างออร์เรย์ ผลการทดลองทางด้านรังสีเอ็กซ์นำเสนอ การกำหนดระยะห่างระหว่างหัวฉายรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ ผลการฉายรังสีเอ็กซ์วิธีตรงและวิธีอ้อม ผลของพอร์สซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ที่เป็นชั้นรับรังสี ผลของโครงสร้าง PIN และ NIP ที่มีต่อความไวรังสีเอ็กซ์ ผลของระยะชั้นอินทรีนซิก ผลของระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์ดริง และผลการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ต่อวัสดุตัวอย่าง

ผลการทดลองทางด้านแสง

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนและแนวตั้ง มีคุณสมบัติเรกติไฟร์ และกระแสแสงเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มแสงที่ได้รับ ซึ่งกระแสแสงของโครงสร้างแนวนอนมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวตั้ง โดยโครงสร้างแนวนอนมีค่ากระแสแสง 530 μA ขณะที่โครงสร้างแนวตั้งมีค่า 430 μA ที่ความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ อย่างไรก็ตาม

กระแสมีคของโครงสร้างแวนอนก็มีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวตั้งด้วยเช่นกัน โดยโครงสร้างแวนอนมีค่ากระแสมีค $2 \mu\text{A}$ ขณะที่โครงสร้างแนวตั้งมีค่า $0.55 \mu\text{A}$

ความจุไฟฟ้ารยต่อของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งมีค่ามากกว่าโครงสร้างแวนอน

ความถี่คัทออฟของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งมีค่ามากกว่าโครงสร้างแวนอน โดยตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนมีค่าความถี่คัทออฟ 300 kHz และโครงสร้างแนวตั้งมีค่าความถี่คัทออฟ 220 kHz

ประสิทธิภาพทางควอนตัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวตั้ง ซึ่งตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนมีค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม 71% และโครงสร้างแนวตั้งมีค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม 67.46%

ชั้นพอร์ซิลิคอนสามารถทำให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์จ่ายกระแสแสงได้มากกว่าชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทั้งในกรณีโครงสร้างแวนอน และแนวตั้ง โดยตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนแบบที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง $28-32\%$ ที่ความเข้มแสง $3,000-15,000$ ลักซ์ ส่วนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งแบบที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงสามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่าแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง $21-28\%$ ที่ความเข้มแสง $3,000-15,000$ ลักซ์ นอกจากนี้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแวนอนที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงมีกระแสมีค $1 \mu\text{A}$ ในขณะที่แบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสงมี กระแสมีค $2 \mu\text{A}$ ส่วนตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงมีกระแสมีค $0.2 \mu\text{A}$ ในขณะที่แบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสงมี กระแสมีค $0.55 \mu\text{A}$ นอกจากนี้พอร์ซิลิคอนยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางควอนตัมอีกด้วย โดยประสิทธิภาพทางควอนตัมของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวตั้ง ซึ่งตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแวนอนมีค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม 88.04% และโครงสร้างแนวตั้งมีมีค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม 81.62%

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงจะมีค่าความจุไฟฟ้า และความถี่คัทออฟใกล้เคียงกับตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง ซึ่งตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์โครงสร้างแนวตั้งมีความถี่คัทออฟ 240 kHz และโครงสร้างแวนอนมีความถี่คัทออฟ 280 kHz

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอน ชนิด PIN (พื้นที่รับแสงชนิดพี) สามารถจ่ายกระแสแสงได้มากกว่า ชนิด NIP (พื้นที่รับแสงชนิดเอ็น) 84.87 – 98.16% ที่ค่าความเข้มแสงจากหลอดฮาโลเจน 3,000 – 15,000 ลักซ์

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอน กระแสแสงและกระแสมืดจะเพิ่มขึ้นกับระยะอินทรีนซิกที่เพิ่มขึ้น แต่เมื่อหาอัตราส่วน S/N กระแสแสงต่อกระแสมืดพบว่า ค่า S/N มีค่าลดลงเมื่อระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิกมีค่าเพิ่มมากขึ้น โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 73.3 - 133.4 ที่ระยะความกว้างชั้นอินทรีนซิก 60 – 250 μm .

การสร้างการ์ดริงล้อมรอบตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดทั้งแบบโครงสร้างแนวนอนและโครงสร้างแนวตั้งสามารถช่วยลดกระแสมืดได้ โดยกรณีตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนชนิด PIN และ NIP ตำแหน่งการ์ดริงที่เหมาะสมคือตำแหน่งที่ใกล้พื้นที่เอมิชัน โดยโครงสร้างแนวนอนชนิด PIN สามารถลดได้ 22.72% ที่ระยะห่างการ์ดริง 125 μm และ ชนิด NIP สามารถลดได้ 56.36% ที่ระยะห่างการ์ดริง 25 μm และ กรณีตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้งตำแหน่งการ์ดริงที่เหมาะสมคือห่างจากชั้นรับแสงพีเพิ่มขึ้น 50 μm . ซึ่งสามารถลดได้ 33.33 %

ความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากพื้นที่รับแสงมีค่ามากกว่าความหนาแน่นกระแสที่เกิดจากเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสงประมาณ 100 เท่า ดังนั้นเพื่อลดกระแสมืด อัตราส่วนพื้นที่รับแสงต่อความยาวเส้นรอบรูปพื้นที่รับแสง (A/I) ควรออกแบบให้มีค่าน้อย

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่มีโครงสร้างแบบโฟโตไดโอดออร์เรย์ กระแสแพร่จะส่งผลให้กระแสรวมที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยกระแสแพร่จะมีค่าลดลงเมื่อระยะห่างระหว่างไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกระแสแพร่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบที่ไม่มีการ์ดริงขณะที่ไม่ได้รับแสง และ ได้รับแสง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างกัน 0.39 μA ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 65 μm และ 0.11 μA ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 95 μm แต่การสร้างการ์ดริงล้อมรอบไดโอดแต่ละตัวสามารถลดกระแสแพร่ด้านข้างลงได้ 95.85% โดยกระแสแพร่ของตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบที่มีการ์ดริงขณะที่ไม่ได้รับแสง และ ได้รับแสง พบว่ามีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าต่างกัน 30 nA ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 65 μm และ 20 nA ที่ระยะห่างระหว่างไดโอด 95 μm

ผลการทดลองทางด้านรังสีเอ็กซ์

ระยะห่างระหว่างหัวฉายรังสีเอ็กซ์และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ที่ทำให้พลังงานของรังสีเอ็กซ์มีค่าเปลี่ยนแปลงอย่างเป็นเชิงเส้น ของหัวฉายที่มีพลังงานคงที่ 60 kV กระแส 10 mA คือ ระยะ 40, 38, 34, 32 และ 30 cm.

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์วิธีอ้อมสามารถให้แรงดันเอาท์พุทมากกว่าการฉายรังสีเอ็กซ์วิธีตรงสูงสุด 88% ที่ระยะห่างจากหัวฉาย

รังสีเอ็กซ์ 30 cm ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้งเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์วิธีอ้อมสามารถให้แรงดันเอาต์พุตมากกว่าการฉายรังสีเอ็กซ์วิธีตรงสูงสุด 28.33% ที่ระยะห่างจากหัวฉายรังสีเอ็กซ์ 30 cm ด้วยวิธีการฉายรังสีเอ็กซ์วิธีตรง พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวตั้งมีค่ามากกว่าโครงสร้างแนวนอนสูงสุดถึง 68.9 % ด้วยวิธีการฉายรังสีเอ็กซ์วิธีอ้อม พบว่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN โครงสร้างแนวนอนมีค่ามากกว่าแรงดันไฟฟ้าที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งถึง 45.45 %

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอนที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมากกว่าแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง ในการฉายวิธีตรงมากถึง 76.6% และ การฉายวิธีอ้อมมากถึง 66% และตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวตั้งที่มีพอร์ซิลิคอนบนชั้นรับแสงสามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตมากกว่าแบบที่มีซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นรับแสง ในการฉายวิธีตรงมากถึง 70% และ การฉายวิธีอ้อมมากถึง 65%

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบแนวนอนชนิด PIN สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตได้มากกว่าโครงสร้าง NIP 21.05% ด้วยการฉายวิธีอ้อม และ 43.4% ด้วยการฉายวิธีตรง

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างแนวนอน สามารถจ่ายกระแสไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้นกับระยะอินทรีนซิกที่เพิ่มขึ้น

เนื่องจากการวัดรังสีเอ็กซ์ได้ต้องการใช้งานตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบโฟโตโวลตาอิกคือ ไม่มีการไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นการต่อการใช้งานในลักษณะนี้จึงไม่มีกระแสมีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับรังสีและการ์คริงจึงไม่มีผลต่อกระแสมี

เมื่อรังสีเอ็กซ์ถูกลดทอนความเข้มโดยผ่านชั้นอะคริลิกที่มีความหนาต่างๆ ค่าแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุตจะมีค่าลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดออร์เรย์สามารถแยกแยะความต่างของความหนาได้อย่างชัดเจน

เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Orito et al, "Performance of a Large Area Si PIN Photodiode Array" **Proceeding of IEEE Nuclear Science Symposium**, pp.2993-2997, 2005
- [2] สรวิศ มุ่งการนา. "เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [3] คงศักดิ์ อิ่มอุไร จีรววัฒน์ ปราบเขต สมเกียรติ สุกเดช, "ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมาที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29 (EECON 29), Vol.2, 2549, หน้า 1181-1184
- [4] S.M.Sze. **Semiconductor Devices Physics and Technology**. New York : John Wiley & Son Ltd., 2002.
- [5] S.M.Sze. **Physics of Semiconductor Devices**. New Jersey : John Wiley & Son Ltd., 2007.
- [6] Hamamatsu Photonics, "Photodiodes." [Online]. Available : <http://hamamatsu.com>
- [7] H. G. Nam, M. S. Shin, K. H. Cha, N. I. Cho, E. J. Yun "Fabrication of a Silicon PIN Diode for Radiation Detection" **Journal of the Korean Physical Society**, Vol. 48, No. 6, June 2006, pp. 1514-1519
- [8] Sung-Woo Kwak, Kwang Hyun Kim, Insu Kim, Gyuseong Cho, "Development of X-Ray Scanner Using 450-kVp X-Ray." **IEEE Trans. Nucl. Sci.**, Vol.50, 2003, pp. 2414-2419
- [9] Ilja Goushcha, Bernd Tabbert, and Alexander O. Goushcha, Member, IEEE "Silicon PIN Photodiode Array for Medical Imaging Applications: Structure, Optical Properties Temperature Coefficients" **IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record.**, 2005
- [10] สมเกียรติ สุกเดช. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
- [11] Louis Desmaris. **Applied Electro-optics**. Prentice Hall International (UK) Ltd., 1998
- [12] John Gowar. **Optical Communication Systems**. : Prentice Hall International (UK) Ltd., 1993.
- [13] Michael D. Falcon. "Electrical Characterization of Gold-doped Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te Photodiodes." Degree of Master of Science in Electrical Engineering, Massachusetts Institute of Technology, 1994.

- [14] 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.
- [15] 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
Electronic Engineering Division, Sun Moon University, Asan 336-708
- [16] 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
- [17] Martin Nikl, "REVIEW ARTICLE : Scintillation detectors for x-rays." *Meas.Sci.Technol.*, Vol.17, 2006, pp.R37-R54
- [18] Scintillator Theory anonymous
- [19] G.C. John V.A. Singh. *Physics report.* 263, 1195. 93-151
- [20] J. Rouquerol et al. *Pure Appl. Chem.* (UK). Vol.66 no.8 1978. pp. 1739-1758
- [21] G. Mauckner et al. *J. Lumin (Netherlan-ds)*. Vol.57 1993. pp. 211-215
- [22] T. Unagami, M.seki. *J. Electrochem. Soc. (USA)*. Vol.125 no.8 1978. pp.1339-1344
- [23] V. Labunov, V. Bondarenko, L. Glinenko, A. Dorofeev, L. Tabulina. *Thin Solid Films (Switzerland)*. Vol.137. 1986. pp123-134
- [24] P.C. Searson. *Appl. Lett. (USA)*. Vol.59. 1991. pp.832-834
- [25] L.T. Canham. "Pore type, Shape type, volume and surface area in porous silicon"
Properties of Porous Silicon. England ; Short Run Press Ltd., 1997
- [26] Y. Watanabe, Y. Arita, T. Yokohama, Y. Igarashi. *J. Electrochem. Soc. (USA)*. Vol.122. 1975. pp.1351
- [27] T. Unagami. *J. Electrochem. Soc. (USA)*. Vol.127 no.2 1980. pp. 476-483
- [28] T. Yau, R. Laiho, L. Meikkila. *J. Vac. Sci. Technol. B (USA)*. Vol.12 no.4 1994. pp. 2437-2439
- [29] T.R. Guilinger, M.J. Kelly, E.H. Chason, T.J. Headley, A.J. Howard. *J. Electrochem. Soc. (USA)*. Vol.142 1995. pp. 1634
- [30] H.F. Wolf. *Semiconductor*. Wiley-Interscience a division of John & Sons. 1971. pp. 50
- [31] R.J. Archer. *J.Phys. Chem. Solids (UK)*. Vol.35 1956. pp. 333

- [32] V.M. Aroutiounian, K.R. Maroutyan, A.L. Zatikyan, K.J. Touryan "Calculations of the reflectance of porous silicon and other antireflection coating to silicon solar cells" **Thin Solid Films**. Vol.403-404, 1 February 2002, pp. 517-521
- [33] M.J. Sailor. "Sensor applications of porous silicon" **Properties of Porous Silicon**. Short Run Press Ltd., 1997.
- [34] Marko Jankovec Helmut Stiebig Mathias Krause Janez Krc Miso Vukadinovic Franc Smole Marko Topic, " Numerical and experimental study of a-Si:H basedultraviolet sensitive detectors " **Journal of Non-Crystalline Solids** Vol.299-302, 2002, pp. 1229-1233
- [35] A. Poyai E. Simoen, C. Claeys R. Rooyackers G. Badenes, "Lifetime study in advanced isolation techniques" **Materials Science in Semiconductor Processing**, Vol.4, 2001, pp.137-139
- [36] จักรพันธ์ ศรียาภย์ จิรวัดน์ ปราบเขต สมเกียรติ สุภเดช, "การสร้างตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON 30), Vol. 1, หน้า 552-555, ตุลาคม, 2550
- [37] Jakaphan Sriyaphai Somkiat Supadech, "Fabrication of Vertical Silicon PIN photodiode Array" การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 (EECON 31), Vol. 2, หน้า 1205-1208, 29-31 ตุลาคม, 2551
- [38] ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์, คู่มือการอบรมหลักสูตรไมโครอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2550

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- 1] จักรพันธ์ ศรียากษ์ จิรวัดณ์ ปราบเขต สมเกียรติ สุภเดช, “การสร้างตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON 30), Vol. 1, หน้า 552-555, โรงแรมเฟลิกซ์แควริสอร์ท กาญจนบุรี, 25-26 ตุลาคม, 2550
- [2] Jakaphan Sriyaphai Somkiat Supadech, “Fabrication of Vertical Silicon PIN photodiode Array” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 (EECON 31), Vol. 2, หน้า 1205-1208, รอยัลฮิลล์ กอล์ฟ รีสอร์ท แอนด์ สปา นครนายก, 29-31 ตุลาคม, 2551
- [3] สมเกียรติ สุภเดช จักรพันธ์ ศรียากษ์, “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n” การนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 submitting



The EECON-30 Conference Joins the Eightieth Birthday Anniversary

Celebration of His Majesty the King Bhumibol Adulyadej

30th Electrical Engineering Conference

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 30

หนังสือรวมบทความที่นำเสนอในการประชุม เล่ม 1

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- โฟโตนิกส์ (PH)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)

Volume I



โดย
 ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม
 ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุมและเครื่องมือวัด ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
 คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ณ โรงแรมเพลิกซ์ ริเวอร์แคว รีสอร์ท กาญจนบุรี
 25 - 26 ตุลาคม 2550



FACULTY OF ENGINEERING
KMUTT
EECON - 30



การสร้างตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN Fabrication of Silicon PIN photodiode X-ray detector

จักรพันธ์ ศรียาภักย์ จิรวัดณ์ ปราบเขต สมเกียรติ ฤกษ์เดช

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

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

บทคัดย่อ

ตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำในปัจจุบันมีหลายชนิดแต่ที่มีบทบาทสำคัญและนิยมใช้งานอย่างแพร่หลายได้แก่ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN รายงานฉบับนี้ ได้นำเสนอการทดลอง ผลการทดลองออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง โดยชั้นพีซึ่งเป็นชั้นหน้าค้ำรับรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสี และมีชั้น guard ring (p⁺) ล้อมรอบ ในการสร้างใช้แผ่นผลึกเริ่มต้นเป็นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานสูง 2,000 Ω.cm (หรือชั้น I) มีระนาบ (111) ส่วนของชั้นเอ็น และชั้นพีที่เข้มข้น (n⁺, p⁺-region) ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการแพร่ด้วยความร้อนของอะตอมฟอสฟอรัส และ โบรอนตามลำดับ ตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ที่สร้างได้ ถูกนำไปวัดคุณสมบัติทั้งด้านไฟฟ้า ด้านแสง และการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ โดยใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ ที่มีแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40kV- 100 kV. เป็นแหล่งกำเนิดรังสี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโตไดโอดนี้สามารถตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ได้ดีทั้งการตรวจแบบโดยตรง และโดยทางอ้อมโดยผ่านชั้นสารเรืองแสง ทั้งยังมีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เป็นแบบเชิงเส้นอีกด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้กว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ในอุปกรณ์เครื่องถ่ายภาพรังสีระบบคอมพิวเตอร์ หรือ CT สแกนเนอร์

คำสำคัญ : ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN, ตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์

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 order to increase the radiation's absorption efficiency and 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 ทังสเตนหรือโมลิบดีนัม ทำให้อิเล็กตรอนสูญเสียพลังงานอย่างทันทีทันใด ในกรณีนี้จะทำให้มีความร้อน และรังสีเอ็กซ์เกิดขึ้น รังสีเอ็กซ์โดยวิธีนี้ สามารถผลิตได้จากหลอดรังสีเอ็กซ์ ซึ่งมักพบได้ในเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ของโรงพยาบาล และ โรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป

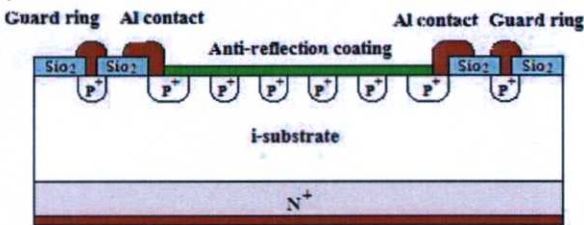
รังสีเอ็กซ์ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในงานต่างๆอย่างกว้างขวาง แม้ว่าในระยะแรกๆหลังการค้นพบมักจะใช้ในวงการแพทย์เท่านั้น แต่ในปัจจุบันมีการนำรังสีเอ็กซ์ไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆอย่างกว้างขวาง เช่น ในด้านการวิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ ในด้านความมั่นคง ด้านความปลอดภัย และด้านการทหาร นอกจากนี้ แม้ในกิจการแพทย์การใช้รังสีเอ็กซ์เพื่อการตรวจการวินิจฉัย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

ในการประยุกต์ใช้รังสีเอ็กซ์ สิ่งที่สำคัญอย่างหนึ่งก็คือ ตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์หรือ x-ray detector ซึ่งในปัจจุบันนี้มีอยู่

หลายชนิด แต่ที่นิยมใช้กันมากคือ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดPIN [2] ซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ที่สร้างได้ง่ายโดยใช้เทคโนโลยีมาตรฐานของการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์จากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนทั่วไป สามารถสร้างให้มีขนาดเล็ก และเป็นวงจรรวมได้ โดยสร้างให้อยู่ร่วมกับชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์อื่น ๆ บนแผ่นผลึกซิลิคอนชิ้นเดียวกัน

การฉายรังสีเอ็กซ์ให้แก่วัสดุจذبรังสี 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 และสร้างตัวตรวจจذبรังสีเอ็กซ์ ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง โดยมีชั้นพี (p+) ซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ (Multi-Strip) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสี และมีชั้นกักรังสี (Guard Ring) ชนิดพี (p+) ล้อมรอบ [4] ดังแสดงในรูปที่ 1. ซึ่งซิลิคอนโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างขึ้นมีพื้นที่รับแสงขนาด $1.5 \times 1.5 \text{ mm}^2$ และชั้นรับรังสีเอ็กซ์มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบนั้นมีขนาดความกว้าง $20 \mu\text{m}$ และระยะห่าง $150 \mu\text{m}$

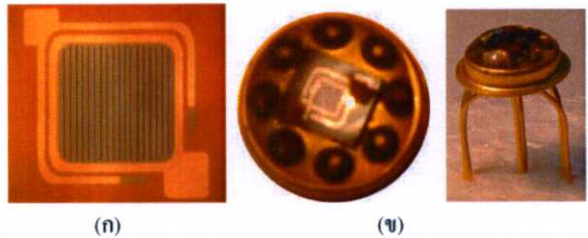


รูปที่ 1. ภาคตัดขวางของตัวตรวจจذبรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ซึ่งจะมีโครงสร้างแบบแนวตั้ง

2. กระบวนการสร้าง

เริ่มจากแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิดอินทรินซิก (i-type) ที่มีสภาพความต้านทาน $2,000 \Omega \cdot \text{cm}$ ระบาย (111) ส่วนของชั้นเอ็นที่เข้มข้น (n⁺ layer) และชั้นพีที่เข้มข้น (p⁺ layer) ของไดโอดสร้างได้โดยเทคนิคการแพร่อะตอมสารเจือของฟอสฟอรัส และโบรอนที่อุณหภูมิ $1,000 \text{ }^\circ\text{C}$ เข้าไปในผลึกฐานรอง ทางด้านล่าง และด้านบนของแผ่นผลึกตามลำดับ ขั้วไฟฟ้าของไดโอดเป็นชั้นโลหะอะลูมิเนียม ซึ่งสร้างได้จากการระเหยอะลูมิเนียมในสุญญากาศ (Al vapor evaporation) ลวดลายของชั้นพีซึ่งมีลักษณะเป็นแถบเล็กๆหลายแถบ และลวดลายของแถบตัวนำอะลูมิเนียม

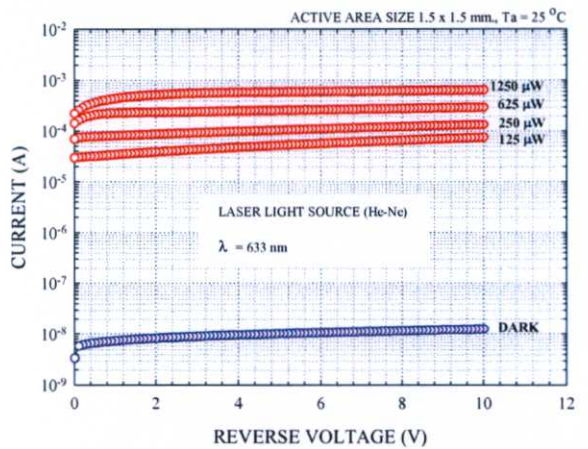
ที่อยู่ด้านรับแสง ถูกสร้างได้ด้วยเทคนิคของ photolithography ตัวไดโอดที่สร้างเสร็จสมบูรณ์บนแผ่นผลึกซิลิคอน จะถูกนำไปตัดแยกเป็นไดโอดแต่ละตัว และนำไปติดตั้งบนตัวถังแบบกระป๋องโลหะ (can case TO-8) ดังแสดงในรูปที่ 2. ก่อนที่จะถูกนำไปทดสอบ และวัดคุณสมบัติต่างๆต่อไป



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

3. การทดลองและผลการทดลอง

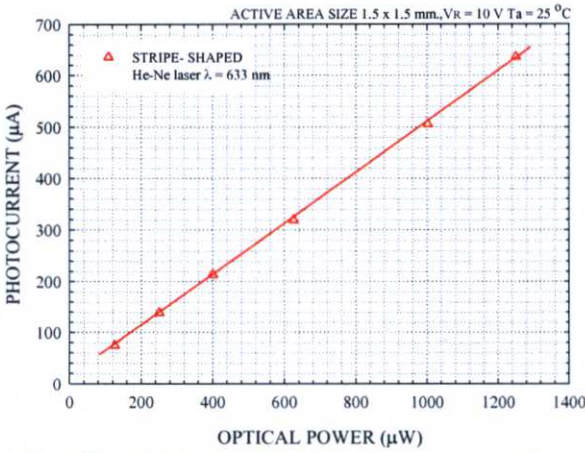
การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้า เพื่อหาลักษณะสมบัติ กระแสและแรงดัน (I-V characteristics) ของไดโอด ทำได้โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของสารกึ่งตัวนำ HP รุ่น 4061A ผลการทดลองพบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V กระแสอิ่มตัวของไดโอด มีค่าต่ำเพียง 12.5 nA ดังในรูปที่ 3. เนื่องจากมีชั้นกักรังสีชนิดพี (p+) ช่วยลดกระแสรั่ว



รูปที่ 3. ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสง และขณะได้รับแสงเลเซอร์ที่มีพลังงานค่าต่างๆ

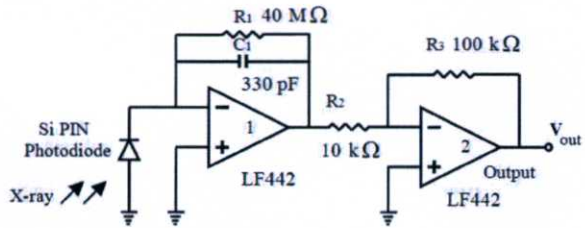
เมื่อไดโอดถูกฉายด้วยแสงเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 633 nm โดยมี sensitivity ประมาณ 0.508 A/W ที่พลังงาน 125 μW จะทำให้ได้กระแสแสงประมาณ 74 μA และเมื่อแสงเลเซอร์มีความเข้มหรือมีพลังงานเพิ่มขึ้น กระแสแสงจากโฟโตไดโอดจะมีค่าเพิ่มขึ้นด้วย การเพิ่มของกระแสแสงกับพลังงานของแสงเลเซอร์จากรูปที่ 3. สามารถ

นำมาเขียนเป็นกราฟแสดงได้ดังในรูปที่ 4. ซึ่งจะเห็นว่ามีลักษณะเป็นแบบเชิงเส้นอย่างสมบูรณ์ ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจจับแสง



รูปที่ 4. ที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ กระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นกับ พลังงานของแสงเลเซอร์ อย่างเชิงเส้น

ในการทดสอบการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอด ตัวไดโอดจะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรขยายสัญญาณ ในลักษณะแบบ Photovoltaic mode ดังแสดงในรูปที่ 5.



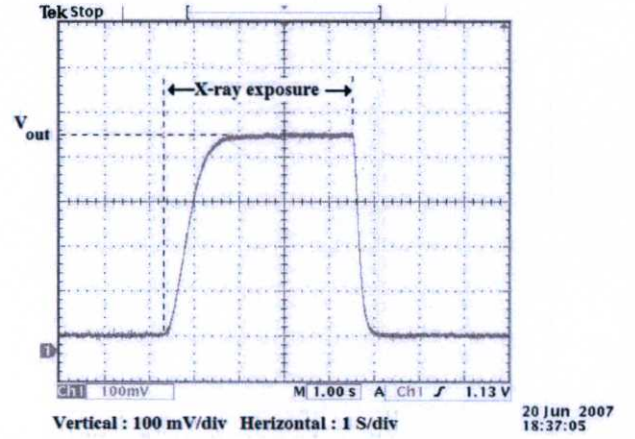
รูปที่ 5. การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

วงจรขยายภาคแรกจะทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสแสงที่ได้จากโฟโตไดโอด เป็นแรงดันไฟฟ้า โดยมีอัตราขยาย 40mV/nA วงจรขยายภาคที่สองเป็นวงจรขยายแรงดันเพื่อขับออกที่เอาต์พุต โดยมีอัตราขยายเป็น 10 เท่า วงจรขยายที่ใช้เป็นไอซีออปแอมป์เบอร์ LF442 ซึ่งมีกระแสอินพุต แรงดันออฟเซต ที่ต่ำมาก

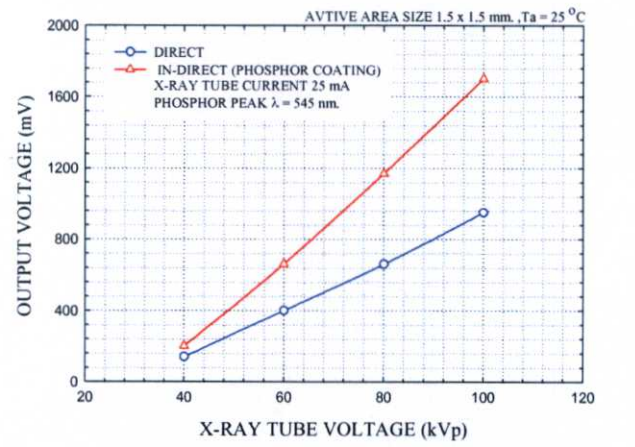
ผลการทดลองพบว่า แรงดันเอาต์พุตของวงจรขยาย จะเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของรังสีเอ็กซ์ซึ่งตัวซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถรับได้ รังสีเอ็กซ์ที่ใช้ในการทดลองได้จากเครื่อง CT scanner ยี่ห้อ Toshiba รุ่น TF-6TL-6 และความเข้มของรังสีเอ็กซ์สามารถควบคุม โดยการเปลี่ยนแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้แก่หลอดรังสีเอ็กซ์ ในการทดลองนี้ ใช้แรงดันไฟฟ้าในช่วง 40 - 100 kV และได้ทดลองให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดทำการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ทั้งแบบ โดยตรง และแบบโดยอ้อมซึ่งรังสีเอ็กซ์จะถูกฉายผ่านชั้นสารเรืองแสง [5] Gadolinium Oxysulfide

Activated with Terbium ($Gd_2O_2S:Tb$) ซึ่งมีคุณสมบัติเรืองแสงได้เมื่อถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์

จากการทดลองพบว่าในช่วงเวลาที่ไม่มีการฉายรังสีเอ็กซ์ให้กับโฟโตไดโอด แรงดันไฟฟ้าที่เอาต์พุตของวงจรขยายจะมีค่าเป็นศูนย์ แต่ในช่วงเวลาที่มีการฉายรังสีเอ็กซ์ และมีการดูดกลืนพลังงานของโฟโตไดโอด จะทำให้มีสัญญาณแรงดันไฟฟ้าปรากฏที่เอาต์พุตของวงจรขยายดังในรูปที่ 6. และขนาดของแรงดันเอาต์พุตจะเพิ่มขึ้นกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ในลักษณะที่เป็นเชิงเส้น ดังในรูปที่ 7.



รูปที่ 6. ลักษณะของสัญญาณแรงดันที่เอาต์พุตของวงจรขยายซึ่งวัดได้ด้วยออสซิลโลสโคป ขณะโฟโตไดโอดถูกฉายด้วยรังสีเอ็กซ์

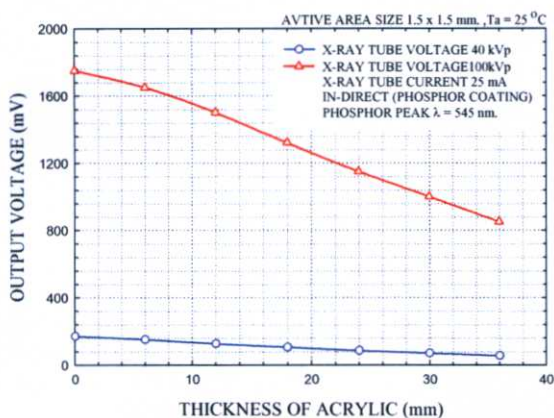


รูปที่ 7. ขนาดแรงดันเอาต์พุตของวงจรขยายกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ที่โฟโตไดโอดได้รับ ทั้งวิธีโดยตรง และวิธีการทางอ้อม

จากรูปที่ 7. จะเห็นว่า กรณีการฉายรังสีเอ็กซ์ ให้แก่โฟโตไดโอด โดยผ่านชั้นสารเรืองแสงหรือการรับรังสีโดยทางอ้อม จะทำให้ได้

แรงดันที่เอาท์พุทมีค่าสูงกว่ากรณีการได้รับรังสีเอกซ์โดยตรง ซึ่งผลดังกล่าว เกิดการเรืองแสงสีเขียวที่มีความยาวคลื่นสูงสุดที่ 545 nm ซึ่งก็คือการปล่อยคลื่นในย่านความถี่แสงออกมาให้แก่ซิลิคอนโฟโตไดโอด และเนื่องจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมีคุณสมบัติสามารถตอบสนองต่อคลื่นในย่านความถี่แสงที่มองเห็นได้โดยเฉพาะแสงสีเขียวได้ดีกว่าคลื่นความถี่ในย่านรังสีเอกซ์ ดังนั้นจึงทำให้ได้ผลการทดลองดังในรูปที่ 7.

เพื่อศึกษาผลการลดทอนของรังสีเอกซ์ ได้ทำการทดลองโดยใช้แผ่นอะคริลิกทึบแสง และมีความหนาต่าง ๆ ปิดบังตัวซิลิคอนโฟโตไดโอดไว้ และฉายด้วยรังสีเอกซ์ที่มีความเข้มคงที่ค่าหนึ่งๆ ขนาดของแรงดันเอาท์พุท และความหนาของชั้นอะคริลิกที่ใช้กับรังสีเอกซ์ ถูกนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 8.



รูปที่ 8. ค่าแรงดันเอาท์พุทของวงจรรายชาย กับค่าความหนาของแผ่นอะคริลิกที่ใช้บังรังสีเอกซ์ให้แก่โฟโตไดโอด

ผลการทดลองพบว่าขณะที่โฟโตไดโอดถูกบังด้วยแผ่นอะคริลิกทึบแสงที่มีความหนาเพิ่มขึ้น แรงดันเอาท์พุทของวงจรรายชายจะมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น ทั้งนี้เนื่องจากความเข้มของรังสีเอกซ์ถูกลดทอนลง โฟโตไดโอดจึงตรวจจับรังสีได้น้อยลงด้วย ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของโฟโตไดโอดที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น (linearity) ที่ดี จึงมีความเป็นไปได้สูงที่จะสามารถนำโฟโตไดโอดนี้ไปใช้งานเป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ ในอุปกรณ์ทางการแพทย์ และประยุกต์ใช้ในงานต่างๆ ได้อย่างกว้างขวาง

4. สรุป

ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง ชั้นรับแสง (p^+) มีลักษณะเป็นแถบเล็กๆ หลายแถบ และมีชั้นกักรังสีล้อมรอบ ถูกออกแบบ และสร้างขึ้น ผลการทดลองพบว่าไดโอดที่สร้างขึ้นสามารถตรวจจับรังสีเอกซ์ได้ดี ทั้งกรณีการตรวจจับรังสีแบบโดยตรง และแบบโดยทางอ้อม แต่ความไวในการตรวจจับรังสีแบบทางอ้อม จะสูงกว่า โดยให้แรงดันเอาท์พุทสูงกว่าราว 60 % นอกจากนี้ แรงดันเอาท์พุทของวงจรรายชายจะเปลี่ยนแปลงกับความเข้มของรังสีเอกซ์อย่างเป็นเชิงเส้น ซึ่ง

คุณสมบัติดังกล่าว จะให้เห็นว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN ที่สร้างขึ้นนี้ สามารถนำไปใช้เป็นตรวจจับรังสีเอกซ์ได้ หากมีการพัฒนา และสร้างให้อยู่ในลักษณะเป็นไดโอดที่มีขนาดเล็กๆ จำนวนหลายตัวเรียงอยู่เป็นแถวหรือ Array diode ก็จะสามารถที่จะนำไปใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ในเครื่องถ่ายภาพรังสีเอกซ์ระบบคอมพิวเตอร์หรือ CT scanner ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

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

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] จิรวัดน์ ปรามเขต สมเกียรติ สุขเดช "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



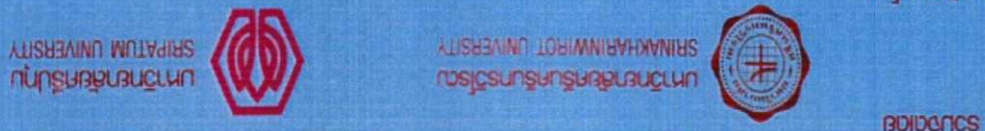
จักรพันธ์ ศรียากษ์, ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



จิรวัดน์ ปรามเขต, ปริญญาตรี วศ.บ. สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สจล. ปัจจุบันกำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโมเลกุลอิเล็กทรอนิกส์, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเดช รองศาสตราจารย์ ระดับ 9 ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สจล.



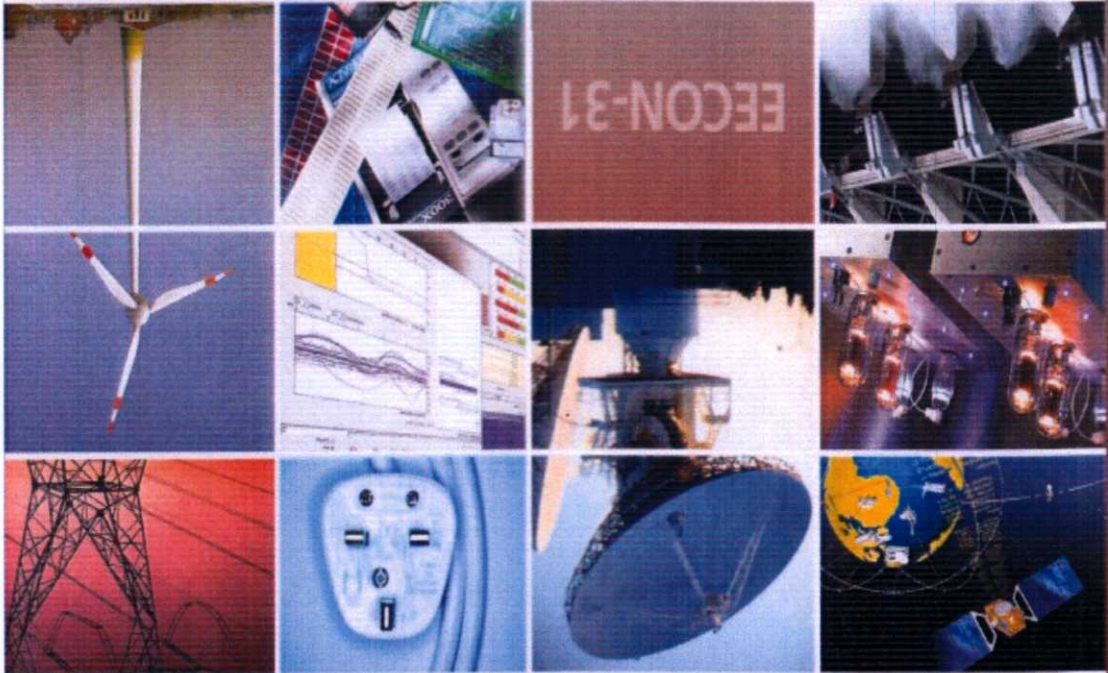
အသုံးပြုသူများ

ကျွန်ုပ်တို့အတွက်

29 - 31 ခုနှစ် 2551

ကျွန်ုပ်တို့၏ အသုံးပြုသူများအတွက် အသုံးပြုနိုင်သည့် အချက်အလက်များ

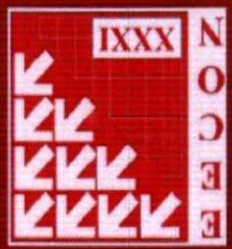
- မြေအောက်ကွေ့ကွေးစနစ် (GN)
- မြေအောက် (PH)
- အသုံးပြုမှု အကန့်အသတ် (CT)
- အသုံးပြုမှု အကန့်အသတ် (DS)
- အသုံးပြုမှု (EL)
- မြေအောက် (CM)
- မြေအောက် (PW)
- အသုံးပြုမှု (FE)
- အသုံးပြုမှု (CP)



31st Electrical Engineering Conference (EECON-31)

ကျွန်ုပ်တို့၏ အသုံးပြုသူများအတွက် 31

အသုံးပြုမှု



Fabrication of Vertical Silicon PIN photodiode Array

Jakaphan Sriyaphai Somkiat Supadech

Electronic Research Center, Department of Electronic Engineering, Faculty of Engineering

King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

3 Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok 10520 Phone 662-273-9238-4 E-mail: jakaphan@hotmail.com

Abstract

The electrical and optical characteristics of silicon PIN photodiode array are discussed. To develop applications of silicon PIN photodiode, 16 single PIN photodiode was designed to arrange into single line and separated each other by p^+ guard ring. This paper also discusses x-ray responsibility in term of distribution current, linearity and attenuation. The results demonstrated that Photodiode arrays could detect x-ray source indirectly exposure. So that, photodiode arrays allows for building imaging systems for the two dimensions practical applications.

Keywords: Silicon PIN photodiode, X-ray detector, array photodiode

1. Introduction

Recently, semiconductor detectors are widely use in many fields such as commercial and military applications. Semiconductor detectors [1] also detect X-ray, Gamma-ray. Among the semiconductor detector, [2] silicon detectors are considered to be the best candidates. There are many types of x ray detectors silicon-based but the most popular x ray detectors are silicon PIN photodiode [3] because most probable process technique for the device fabrication is the silicon based technique originally developed for integrated circuit (IC) fabrication with PIN diode structure. Typically, semiconductor detectors are only one element photodiode that are not appropriate to create imaging. To develop a applications in the fields of medical imaging systems including two-dimensional (2D) imaging of silicon PIN photodiode, Each element PIN photodiode was designed to arrange into single line and separated each other by p^+ guard ring.

In addition to realize practical applications, the important parameter is dark current or leakage current that is necessary to consider together. Dark current could be generated in bulk and surface of diode [4] which is the summary of all current such as diffusion current of minority carriers and leakage current between adjacent silicon and SiO_2 . However, the carriers diffusion between adjacent cells [5] could be avoided by etching trenches between active elements.

An alternative solution to decrease dark current is [6] designing guard ring structure between each active elements which isolate each active elements completely. This paper presents the results of study, design and fabrication of vertical silicon PIN photodiode arrays. In order to decrease dark current, each element was rounded by guard ring. The size of each element was $1 \times 1 \text{ mm}^2$ with square shape. The gap between each element is $65 \text{ }\mu\text{m}$. One photodiode array consists of 16 photodiodes are arrange inline as shown in fig.1

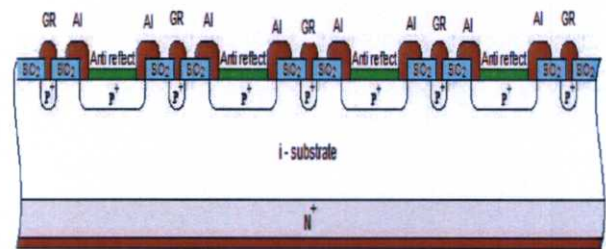


Fig. 1. Cross-sectional structure of PIN photodiode array with the isolating guard ring between pixels.

2. 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. Phosphorus atoms were

diffused on front-side and boron atoms were diffused on back-side. The diode's electrode is made of aluminum by Al vapor evaporation technique. Pattern of p⁺ layer and pattern of aluminum that lied down on the window Layer was patterned by photolithography technique. Completely fabricated photodiode arrays on silicon wafer were cut into one photodiode array. Single photodiode array was packed on print circuit board (PCB) as shown in fig. 2 before Photodiode array was characterized.

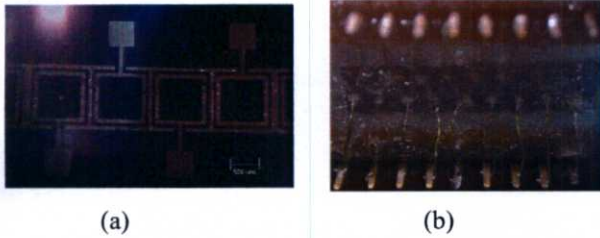


Fig. 2. Detector Photograph (a) Completely fabricated photodiode array. (b) Packaging on print circuit board.

3. Results and discussions

To measure the current-voltage (I-V) characteristics of fabricated photodiode array. Photodiode array was characterized by semiconductor characteristics analyzer HP model 4061A. The results demonstrated that photodiode array had low dark current is 0.9 μA at 10 volt reverse bias voltage, because photodiode array had p⁺ guard ring that helped to decrease dark current as shown in fig. 3

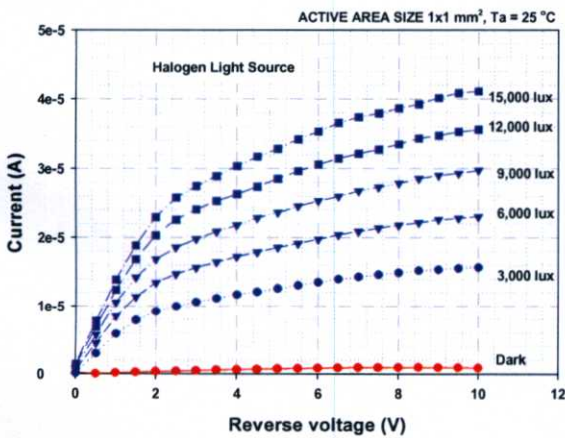


Fig. 3. I-V characteristics of photodiode array while illuminating with halogen lamp at differences powers.

When photodiode arrays was illuminated by halogen, photodiode arrays was generating current about 41.1 μA at intensity 15,000 lux. Moreover, higher halogen's intensity or higher power, higher photodiode's current. Photocurrent and halogen light power increasing from fig.3 could be plotted in fig. 4. Photocurrent linearly increased completely which is a good property of photo detector.

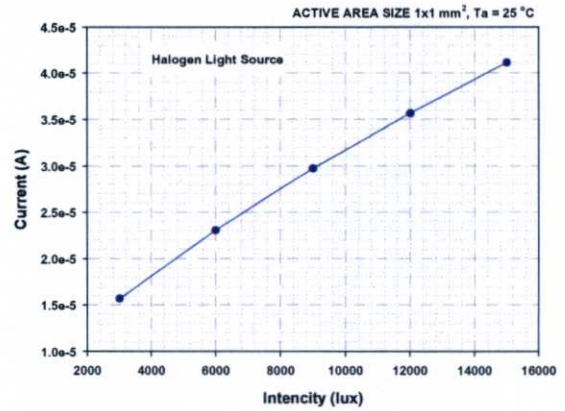


Fig 4. Reverse bias 10 V, photocurrent was increasing linearly while the intensity of halogen light increased.

After that, every pixels of photodiode array was measured photo current by condition: intensity 15,000 lux and reverse bias 10 V. as shown in fig. 5. The result demonstrated that current distributions were grouped. Mean value is 57.25 μA. The Difference percentages of the maximum and minimum photocurrent compared with mean value were about ± 25.95%.

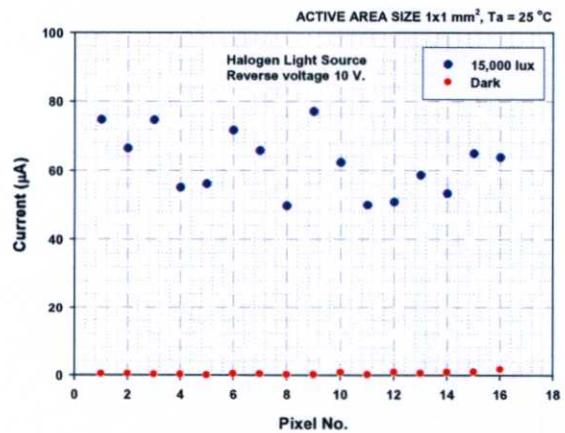


Fig. 5. Photocurrent distribution of each pixels which exposed by halogen light at reverse bias 10 V.

X-ray reasonability measurement of photodiode arrays, photodiode array was connected to amplifier circuit. Photodiode array use in photovoltaic mode as illustrated in fig. 6.

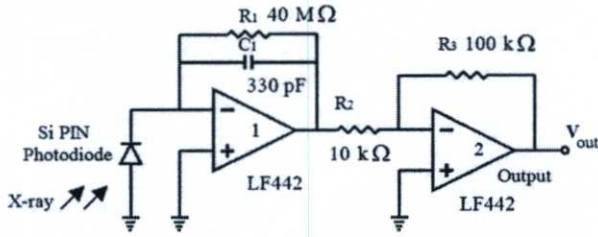


Fig 6. Silicon photodiode array was connected to amplifier circuit in photovoltaic mode.

First stage would convert photo current of photodiode array into voltage. First stage amplifier has gain 40mV/nA. Second stage amplifier is voltage amplifier. The output voltage was amplified which voltage gain 10. This circuit use LF442: Dual Low Power JFET Input Operational Amplifier.

Voltage output was zero during x ray was not exposed to photodiode array. During x ray was exposed, photodiode array absorbed the power of x ray and voltage signal would appeared at output terminal of amplifier circuit as shown in fig. 7.

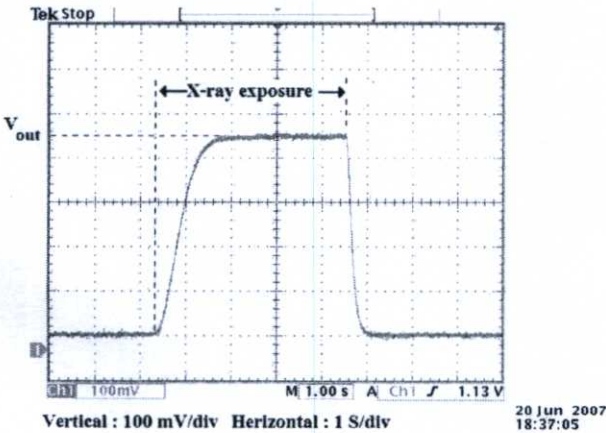


Fig. 7. Waveform output voltage that was measured by oscilloscope at output terminal of amplifier circuit.

As shown in fig. 8, the photodiode array was exposed by x-ray tube voltage was fixed at 80 kVp. This

exposure is indirect method that exposed through Gadolinium Oxysulfide Activated with Terbium ($Gd_2O_2S:Tb$). The results indicated that output voltage was grouped and mean value is 0.6 V. The Difference percentages of the maximum and minimum output voltage compared with mean value were not over $\pm 13.2\%$.

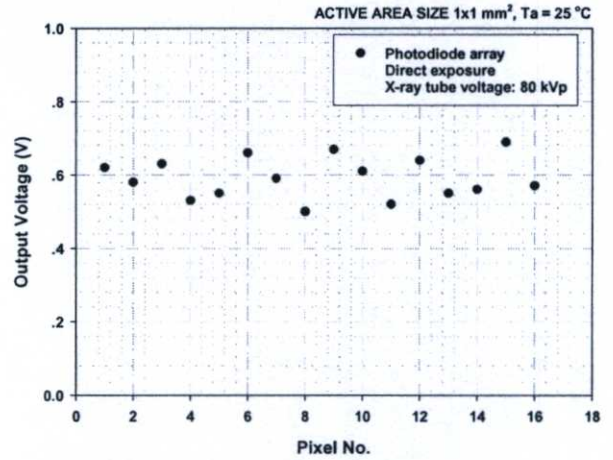


Fig. 8. Output voltage distribution while exposed x-ray at 80 kVp.

To study the results of x-ray attenuation, the photodiode array was divided into 4 groups. Each group had 4 elements. Then, each group was closed by opaque acrylic which had 4 differences thickness. After that, Photodiode array was indirectly exposed by x-ray at x-ray tube voltage 80 kVp. Output voltage and acrylic thickness that obstruct x-ray was plotted as fig. 9.

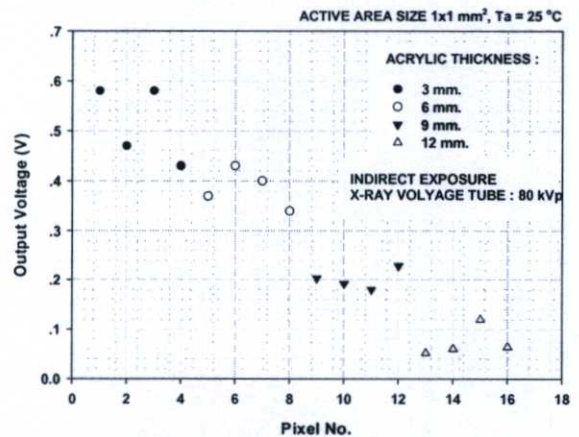


Fig. 9. The Output voltage of each group when acrylic which has 4 thicknesses obstructs x-ray.

As shown in fig. 9, the output voltage was decreasing when acrylic thickness was increased because of the power of x-ray was decreased. The output voltage of each group was obviously separated. This means photodiode array could distinguish the difference of thickness completely.

Practical application, the output voltage from each photodiode element was quantized into 256 bit that is gray scale to create two-dimensional (2D) imaging as shown in fig. 10. Correctly, each pixel should have had shade that to be close to other in same group. Because of voltage tolerance is 13.2%, they will provide a different gray shade that depend on output voltage.

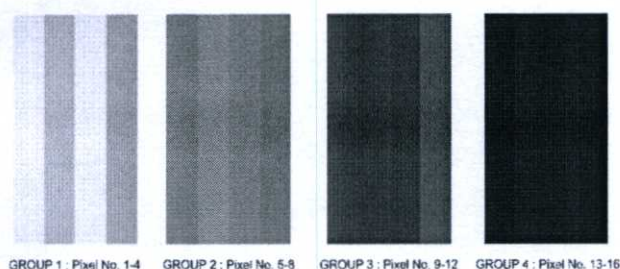


Fig. 10. Photodiode array provide gray shades after quantizing.

4. Conclusions

Vertical silicon PIN photodiode arrays was designed and fabricated. The results demonstrated that PIN photodiode Arrays can detect x-ray. Output voltages of each element were nearby. The voltage distribution percentage are not over $\pm 13.2\%$ when compare with mean value.

Photodiode was applied to practical application simulation by using acrylic that had various thicknesses. Photodiode could provide obviously separated output voltage. This means photodiode array could distinguish the difference of thickness completely.

In addition, the output voltage from each photodiode element was quantized to create two-dimensional (2D) imaging. The results found that each element provide gray shade that to be close to other in same group, even though photodiode array in each

groups were not provide same output voltage that created an error imaging. From all results was discussed, there is an possibility that fabricates vertical structure silicon PIN photodiode array as an x-ray detector to use in the fields of medical imaging, if photodiode array was fabricated in an accuracy process and good packaged.

5. Acknowledgment

The authors acknowledge Associate Prof. Dr. Manas Sangworasil and Associate Prof. Dr. Chuchart Pintawirooj from CT LAB, Computer Research and Service Center, KMITL for the laboratory and X-ray generator usage.

References

- [1] C. Fiorini, A. Longoni, "Semiconductor drift detectors for X- and gamma-ray spectroscopy and imaging" *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, Vol.266, No.10, May. pp. 2173-2181,2008
- [2] H. G. Nam, M. S. Shin, K. H. Cha, N. I. Cho, E. J. Yun, "Fabrication of a Silicon PIN Diode for Radiation Detection" *Journal of the Korean Physical Society*, Vol.48, No.6, June. pp. 1514-1519, 2006
- [3] R. Orito et al, "Performance of a Large Area Si PIN Photodiode Array" *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, pp.2993-2997, 2005
- [4] S.M. Sze, "physics of semiconductor Devices", 2nd ed. New york: wiley, p. 763, 1981
- [5] Ilja Goushcha, Bernd Tabbert, Alexander O. Goushcha, Member, IEEE, "Silicon PIN Photodiode Array for Medical Imaging Applications: Structure,Optical Properties and Temperature Coefficients *IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record*, Vol.5, Oct. pp. 2840 – 2844,2005
- [6] P. Rehak et al., "Spiral silicon drift detectors", *IEEE Trans. Nucl. Sci* Vol.36, p.203, 1989

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายจักรพันธ์ ศรียากย์
วัน เดือน ปีเกิด	13 มีนาคม 2525 จังหวัดกระบี่
ที่อยู่	295 หมู่บ้านประชาสรรค์ ซอยประชาสรรค์ ถนนประชาสรรค์ ตำบลหน้าเมือง อำเภอเมือง จังหวัดยะเชิงเทรา
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2547 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) การออกแบบและกระบวนการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN 2.) การประยุกต์ใช้งาน โฟโตไดโอด

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] จักรพันธ์ ศรียากย์ จิรวัดน์ ปราบเขต สมเกียรติ สุภเดช, “การสร้างตัวตรวจวัดรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 30 (EECON 30), Vol. 1, หน้า 552-555, โรงแรมเฟลิกซ์แควร์สอร์ท กาญจนบุรี, 25-26 ตุลาคม, 2550
- [2] Jakaphan Sriyaphai Somkiat Supadech, “Fabrication of Vertical Silicon PIN photodiode Array” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้าครั้งที่ 31 (EECON 31), Vol. 2, หน้า 1205-1208, รอยัลฮิลล์ กอล์ฟรีสอร์ท แอนด์ สปา นครนายก, 29-31 ตุลาคม, 2551
- [3] สมเกียรติ สุภเดช จักรพันธ์ ศรียากย์, “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ชนิดซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n” การนำเสนอผลงานวิจัยแห่งชาติ 2552 **submitting**