

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

**การสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งเป็น
ตัวตรวจจับสนีเอ็กซ์**

**FABRICATION OF A VERTICAL STRUCTURED SILICON
PIN DIODE AS X-RAY DETECTOR**



๒พ.
พ๖๕๓ก
๒๕๕๐

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**82964**
วัน,เดือน,ปี.....**30 ก.ค. 2551**

b..... 119 58145
i.....

**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**การสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งเป็น
ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์**

**FABRICATION OF A VERTICAL STRUCTURED SILICON
PIN DIODE AS X-RAY DETECTOR**



**ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2550**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2550

ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์

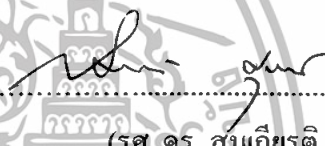
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
เรื่อง การสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้งเป็นตัว
ตรวจจับรังสีเอ็กซ์

FABRICATION OF A VERTICAL STRUCTURED SILICON
PIN DIODE AS X-RAY DETECTOR

ผู้จัดทำ

1. นายพิเชษฐ์ นามารุง รหัส 48015216
2. นายสมโชค ถิละชุตินเดช รหัส 48015229

รายงานนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว



(รศ. ดร. สมเกียรติ สุขเดช)
อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างซิลิคอนไดโอดชนิด PIN ที่มีโครงสร้างแบบแนวตั้ง เป็นตัวตรวจรังสีเอ็กซ์

นาย พิเชษฐ์ นานำรุง รหัส 48015216

นาย สมโชค ถีละชุตีเดช รหัส 48015229

รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเดช อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2550

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ ได้นำเสนอการออกแบบ การสร้าง การทดลอง และผลการทดลอง ของ ตัวตรวจรังสีเอ็กซ์ ชนิดซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว มีลักษณะเป็นโฟโต้ ไดโอดต่อเรียงกันแบบแถวเดี่ยว (อาร์เรย์) โดยมีชั้นพีซึ่งเป็นชั้นหน้าต่างรับรังสีเอ็กซ์และมีชั้น guard ring (p⁺) ล้อมรอบ ไดโอดแต่ละตัว ในการสร้างใช้แผ่นผลึกเริ่มต้นเป็นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มี สภาพต้านทานสูง 2,000 Ω.cm (หรือชั้น n) มีระนาบ (111) ส่วนของชั้นเอ็น และชั้นพีที่เข้มข้น (n⁺, p⁺-region) ถูกสร้างขึ้นโดยใช้เทคนิคการแพร่ด้วยความร้อนของอะตอมฟอสฟอรัส และ โบรอน ตามลำดับ ตัวตรวจรังสีเอ็กซ์ที่สร้างได้ ถูกนำไปวัดคุณสมบัติทั้งด้านไฟฟ้าด้านแสง และการ ตรวจรังสีเอ็กซ์ โดยใช้หลอดรังสีเอ็กซ์ ที่มีแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ 40 kVp - 100 kVp เป็น แหล่งกำเนิดรังสี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโฟโต้ไดโอดชนิดนี้สามารถตรวจรังสีเอ็กซ์ได้ดี ในการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโคออลัม ทั้งยังมีคุณสมบัติในการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์เป็นแบบเชิงเส้น อีกด้วย ซึ่งจะทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้เป็นตัวตรวจรังสี เอ็กซ์ในอุปกรณ์เครื่องถ่ายภาพเอ็กซ์เรย์ระบบคอมพิวเตอร์ หรือ CT สแกนเนอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

FABRICATION OF A VERTICAL STRUCTURED SILICON PIN DIODE AS X-RAY DETECTOR

Mr. Pichet Nabamrung ID. 48015216

Mr. Somchok Leelashutidech ID. 48015229

Assoc. Prof. Dr. Somkiat supadech Advisor

Educational Years 2007

Abstract

This paper reports the design, fabrication, experiments and results of a vertical array-shaped silicon PIN photodiodes x-ray detector - single inline arranged diode. They have p^+ region as window layer to collect x-ray and p^+ guard ring surrounded diode each other. Fabrication process, 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. X-ray detection measurement, the x-ray tube with voltage supply of 40 KVp - 100 KVp was used as x-ray source. From an experimental results, it is evident that the detector can detect the x-ray with indirect 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 computerized tomography or CT scanner.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาบัตรฉบับนี้สำเร็จเป็นรูปเล่มโดยสมบูรณ์ ด้วยคำแนะนำและคำปรึกษาจาก รศ. ดร. สมเกียรติ สุขเกษ ซึ่งเป็นอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาบัตร ข้าพเจ้ารู้สึกซาบซึ้งในความอนุเคราะห์จากท่านอาจารย์ และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณ รศ. ดร. มนัส สัจจวิทย์ และ รศ. ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้ห้องทดลอง และเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ-คุณแม่ผู้ที่เป็นแรงบันดาลใจอันสำคัญยิ่งรวมถึงกำลังใจที่ได้รับเสมอมาจากคุณพ่อ-คุณแม่ อีกทั้งญาติพี่น้องของทางคณะผู้จัดทำ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความมานะพากเพียรทำปริญญาบัตรฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ. ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

นาย พิเชษฐ์ นานารุ่ง

นาย สมโชค ถิระชุตติเดช

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของการทำโครงการ	2
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ	2
บทที่ 2 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสีเอ็กซ์และทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น	3
2.1 พื้นฐานของรังสีเอ็กซ์	3
2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์	3
2.1.2 การเกิดรังสีเอ็กซ์	4
2.1.3 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์	8
2.1.4 การประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์	9
2.1.4.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์	9
2.1.4.2 การประยุกต์ใช้ในด้านอื่น	9
2.2 ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น	10
2.2.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล	10
2.2.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับไบอัสตรง	14
2.2.3 รอยต่อพีเอ็นในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	15
2.2.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้การสร้างโฟโต้ไดโอด	17
2.2.5 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสงที่นำมาใช้งาน	19
2.3 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ	20
2.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (EHP)	20
2.3.2 การรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล	22
2.4 คุณสมบัติสำคัญของโฟโต้ดีเทคเตอร์	24
2.4.1 ประสิทธิภาพควอนตัม	24
2.4.2 สภาพการตอบสนอง	25

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4.3 ความเร็วในการตอบสนอง	26
2.4.4 แบนด์วิดท์	26
2.4.5 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัม	27
2.5 ชนิดของโฟโตนิกเทคโนโลยี	28
2.5.1 โฟโตนิกอินทรีย์	28
2.5.2 พี-เอ็นโฟโตนิกไดโอด	29
2.5.3 อะวาแลนซ์โฟโตนิกไดโอด	30
2.5.4 ซีอ็อกไซด์โฟโตนิกไดโอด	31
2.5.5 พินโฟโตนิกไดโอด	32
2.6 โหมดการไบอัสของโฟโตนิกไดโอด	33
2.7 ชนิดของการฉายรังสีเอ็กซ์	34
2.8 วงจรขยายที่ใช้วัสดุคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์	35
บทที่ 3 กระบวนการออกแบบและการสร้างโฟโตนิกไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	35
3.1 การสร้างกระจกคั่นแบบ	36
3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอน โฟโตนิกไดโอดแบบ PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	38
3.2.1 แผ่นผลึกที่ใช้สร้างโฟโตนิกไดโอดชนิด PIN	38
3.2.1.1 ระนาบของผลึก (Orientation)	38
3.2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง	39
3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน	39
3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation)	39
3.2.4 การเปิดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)	42
3.2.5 การฉายแสง (Exposure)	43
3.2.6 การแพร่สารเจือ (Diffusion)	43
3.2.6.1 กลไกของการแพร่ (Diffusion mechanism)	43
3.2.6.2 เทคนิคการแพร่สารเจือ	44
3.2.7 กระบวนการเมทัลไลเซชัน	44
3.2.8 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)	44
3.2.9 กระบวนการสร้างซิลิคอน โฟโตนิกไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	54
4.1 การทดลองหาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของซิลิคอน โฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีต่อรังสีเอ็กซ์	54
4.1.1 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงระหว่าง PIN ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe	55
4.1.2 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมระหว่าง PIN ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe	56
4.1.3 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมของซิลิคอน โฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา	57
4.1.4 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมของซิลิคอน โฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีโครงสร้างแบบ Stripe	58
4.1.5 ศึกษาผลของการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อค่าแรงดันเอาต์พุต (Vout)	59
4.2 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของกระแสแสงและความเข้มแสงธรรมดาของซิลิคอน โฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	60
4.3 การทดลองเพื่อศึกษาการกระจายของแรงดันเอาต์พุตของซิลิคอน โฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	62
4.4 การทดลองหาคุณสมบัติของแรงดันเอาต์พุตและการตรวจจับการลดทอนความเข้มรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอน โฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	63
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	65
เอกสารอ้างอิง	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างซิลิคอนโฟโต้ไดโอดแบบ PIN	2
รูปที่ 2.1 วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น ผู้ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรกเมื่อปี ค.ศ. 1895	3
รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายรังสีเอ็กซ์ภาพแรกซึ่งเป็นภาพมือภรรยาของ วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น	4
รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของรังสีเอ็กซ์	5
รูปที่ 2.4 แถบความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	5
รูปที่ 2.5 การเกิดของรังสีเอ็กซ์	7
รูปที่ 2.6 โครงสร้างรอยต่อ พี-เอ็น	10
รูปที่ 2.7 ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะสนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและศักย์ไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับของ p-n	12
รูปที่ 2.8 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงานในภาวะสมดุล	13
รูปที่ 2.9 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น	14
รูปที่ 2.10 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	15
รูปที่ 2.11 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็น ขณะ ได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ	16
รูปที่ 2.12 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบช่องตรง (ข) แบบช่องไม่ตรง	17
รูปที่ 2.13 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสง ในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	21
รูปที่ 2.14 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสง ในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรีนซิกชนิดเอ็น	21
รูปที่ 2.15 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสง ในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรีนซิก ชนิดพี	22
รูปที่ 2.16 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบโคจรตรง	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.17 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบ โคยอ้อม	24
รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ	26
รูปที่ 2.19 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโอดีโค โอด	27
รูปที่ 2.20 โครงสร้างและแถบพลังงานของโฟโอดีคอนคัคเตอร์	28
รูปที่ 2.21 โครงสร้างและแถบพลังงานของพี-เอ็น โฟโอดีโค โอด	29
รูปที่ 2.22 โครงสร้างของอะวาแลนซ์โฟโอดีโค โอด	30
รูปที่ 2.23 โครงสร้างของซีดคักยโฟโอดีโค โอด	31
รูปที่ 2.24 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโอดีโค โอด	32
รูปที่ 2.25 โหมดการไบอัสของโฟโอดีโค โอด	33
(ก) โหมดแบบโฟโอดีโวลตาอิก	
(ข) โหมดแบบโฟโอดีคอนคัคทีฟ	
รูปที่ 2.26 ชนิดของการฉายรังสีเอ็กซ์	34
(ก) การฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรง	
(ข) การฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคยอ้อม	
รูปที่ 2.27 การต่อซิลิคอนโฟโอดีโค โอดเข้ากับวงจรรขยายสัญญาณแบบ photovoltaic mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์	35
รูปที่ 3.1 ลักษณะมาสก์ที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพรสารเจือ	36
รูปที่ 3.2 ลักษณะ มาสก์ที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ	37
รูปที่ 3.3 ลักษณะมาสก์ที่ 3 สร้างลวดลายอลูมิเนียม	37
รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	40
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Dry)	40
รูปที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไอน้ำอ้อมตัว	41
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ (Wet)	42
รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายซิลิคอนโฟโอดีโคชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	53
รูปที่ 4.1 การทดลองหาการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์	54
รูปที่ 4.2 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา และโครงสร้างแบบ Stripe	55

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป(ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.3 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา และโครงสร้างแบบ Stripe	56
รูปที่ 4.4 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและแบบ โดยอ้อม ที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา	57
รูปที่ 4.5 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและแบบ โดยอ้อม ที่มีต่อ โครงสร้างแบบ Stripe	58
รูปที่ 4.6 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและแบบ โดยอ้อม ที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา	59
รูปที่ 4.7 ผลของกระแสแสงกับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	60
รูปที่ 4.8 ผลของกระแสแสงกับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว	61
รูปที่ 4.9 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา Array	62
รูปที่ 4.10 ผลของความหนาของแผ่นอะคริลิกติดต่อแรงดันเอทพุต เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อม	63
รูปที่ 4.11 ผลของความหนาของแผ่นอะคริลิกติดต่อแรงดันเอทพุต เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อม	64

บทที่ 1

บทนำ

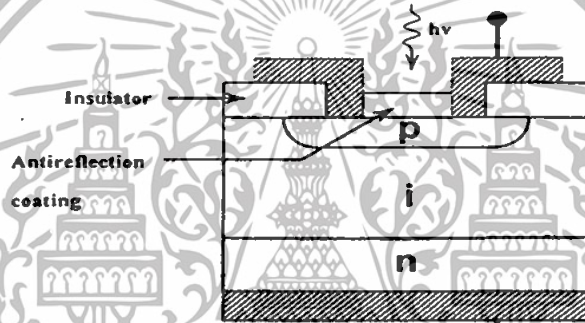
ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพื้นฐานมีความสำคัญและมีบทบาทในงานไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์อย่างสูง โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง (Optical Semiconductor Devices) เป็นกลุ่มหนึ่งที่มีบทบาทและถูกนำไปใช้งานซึ่งเกี่ยวกับแสงงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงเป็นงานที่ได้รับการพัฒนาและก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทั้งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทุก ๆ ด้านอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง (Opto Communication System) การสื่อสารระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าทั้งความเร็ว ความแม่นยำ เทียบตรงและประหยัดเมื่อเทียบกับระบบเดิม ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติและการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ทางแสงจึงจำเป็นอย่างยิ่ง

ในรายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงโฟโอดีไดโอดแบบ PIN ซึ่งเป็นโฟโอดีไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง และอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโอดีไดโอดแบบธรรมดา มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ 3 ส่วน หรือสามชั้นประกอบด้วย สารกึ่งตัวนำชนิด p^+ ส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิด i (intrinsic) และส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิด n^+ แต่มีมีขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้ว คือขั้วของส่วน p^+ เป็นแอโนด และขั้วของส่วน n^+ เป็นขั้วแคโทด ในทางปฏิบัติชั้นสารชนิด i มักถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเจือจางเพื่อทำให้มีสภาพความต้านทานสูงคล้ายกับสารอินทรินซิก ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนและเป็นด้านที่รับแสงจะถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดบางมาก เพื่อให้โฟตอนในลำแสงสามารถทะลุลงไปถึงชั้น i และที่ชั้น i จะมีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดจึงสามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้นหรือมีผลตอบสนองทางด้านเวลาที่รวดเร็ว ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์รับแสงเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแสง ใช้ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง ใช้ในระบบการสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์ และใช้ในการตรวจจับรังสีเอกซ์ เป็นต้น นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ ส่วนใหญ่ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงคือ แกลเลียมอาร์เซไนด์เพราะว่ามีคุณสมบัติที่ดีคือ มีแถบพลังงานแบบช่องตรง (Direct Band Gap) ซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนที่มีแถบพลังงานเป็นแบบช่องไม่ตรง (Indirect Band Gap) พลังงานแสงที่ต้องการจะให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในการนำกระแสของแกลเลียมอาร์เซไนด์จึงน้อยกว่าของซิลิคอนและการตอบสนองความถี่ก็ดีกว่า แต่ถึงอย่างไรซิลิคอนก็มีข้อดีที่น่าสนใจหลายอย่างเช่นกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า ราคาที่ถูกกว่าอีกทั้งกระบวนการสร้างวงจรรวมที่ใช้ในปัจจุบันก็ใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.1 ความเป็นมาของการทำโครงการ

การสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN นั้นเราอาจจะนำไปใช้วัดกับรังสีเอ็กซ์ซึ่งไม่ใช่แสงธรรมดาแต่เป็นแสงที่มีความถี่สูง มีพลังงานมากและไม่สามารถมองเห็นได้ โดยเราจะฉายรังสีเอ็กซ์ ในสอง รูปแบบ คือ ฉายแบบโดยตรงและฉายแบบโดยอ้อมโดยการฉายแบบโดยอ้อมนั้นจะผ่านชั้นกรองแสงที่เรียกว่า ซินทิลเลเตอร์ โดยเมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านไปทั้งชั้นกรองแสงก็จะเรืองแสงขึ้นในช่วงที่ตามองเห็นได้ เพราะโฟโตไดโอดนั้นดูดกลืนได้ดีในช่วงที่ตามองเห็นได้ในรายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาลักษณะโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาวที่มีผลต่อรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 1.1 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว
2. ศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว
3. ศึกษาคุณสมบัติทางการตอบสนองของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาวที่มีต่อรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับรังสีเอ็กซ์และทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น

2.1 พื้นฐานของรังสีเอ็กซ์

รังสีเอ็กซ์ คือ รังสีหรือแสงชนิดหนึ่งที่เราไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าเช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา รังสีเอ็กซ์นี้มีลักษณะเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค ของแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีช่วงคลื่นสั้นมาก ความยาวคลื่นตั้งแต่ 0.001 ถึง 10 นาโนเมตร อยู่ระหว่างรังสีแกมมา กับรังสีอัลตราไวโอเล็ต คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ คล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดาเป็นส่วนใหญ่ แต่คุณสมบัติพิเศษของมันคือ มีอำนาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่าง ๆ ได้มากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นและน้ำหนักอะตอมของวัตถุที่มันผ่าน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งทางเคมี ชีวะ และอื่น ๆ อีกด้วย

2.1.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์

ผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก คือ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมันชื่อ วิลเฮลม คอนราด เรินท์เก้น (Wilhelm Conrad Roentgen) การพบนี้เกิดขึ้นในตอนเย็นของวันที่ 8 พฤศจิกายน ค.ศ. 1895 ภายในห้องทดลอง ณ มหาวิทยาลัยวูซบรุค ประเทศเยอรมัน เรินท์เก้น ได้พบรังสีเอ็กซ์โดยบังเอิญ คือ ขณะที่เขากำลังทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่อง "Absorption of Cathode Rays" โดยใช้หลอดทดลองที่เรียกว่า Crookes' tube เขาสังเกตเห็นว่า Cathode rays ที่ออกมาจากหลอดทดลอง ทำให้กระดาษแข็งที่ฉาบด้วย แบเรียมปลาตินิกไซยาไนด์ (Barium Platinocyanide) เกิดเรืองแสงขึ้น ระยะเวลาที่สั้นที่สุด



รูปที่ 2.1 วิลเฮลม คอนราด เรินท์เก้น ผู้ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรกเมื่อปี ค.ศ. 1895

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



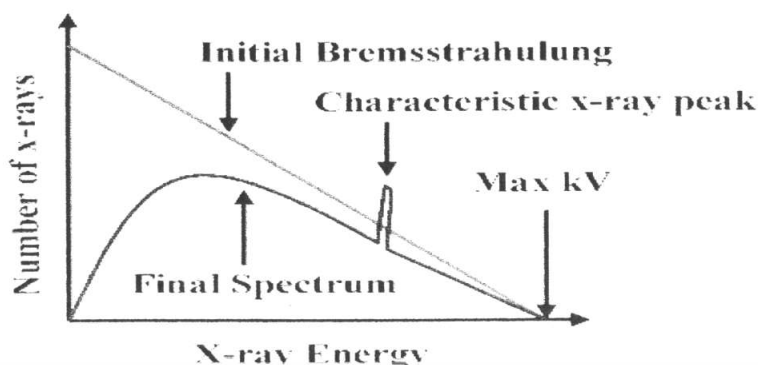
รูปที่ 2.2 ภาพถ่ายรังสีเอกซ์ภาพแรกซึ่งเป็นภาพมือภรรยาของ วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น

ที่ยังมีการเรืองแสงบนกระดาษแข็ง คือ 120 เซนติเมตร ในขณะเดียวกัน เขาสังเกตเห็นอีกว่า ตัวอักษร A ที่ทำด้วยแบเรียมพลาคินไซยาไนด์ อยู่ห่างออกไปเกือบสิบฟุตเกิดเรืองแสงขึ้นด้วย ทั้ง ๆ ที่ไม่อยู่ในระยะของ Cathode Rays เรินท์เก้น จึงคิดว่า เขาได้ค้นพบรังสีชนิดใหม่ขึ้นแล้ว และให้ชื่อว่า "X-Rays" และเขาได้ใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ต่อมา เขาทำการสังเกตถึงการทะลุทะลวง (Penetration) ของรังสีเอกซ์ผ่านกระดาษผ่านโลหะ และแม้กระทั่งผ่านเนื้อหนังของคน และเขาได้ถ่ายภาพรังสีของมือของภรรยาของเขาไว้ด้วย ดังรูปที่ 2.2 ในที่สุดเขาจึงประกาศให้โลกได้รู้ว่า เขาได้ค้นพบรังสีเอกซ์เป็นคนแรก

2.1.2 การเกิดรังสีเอกซ์

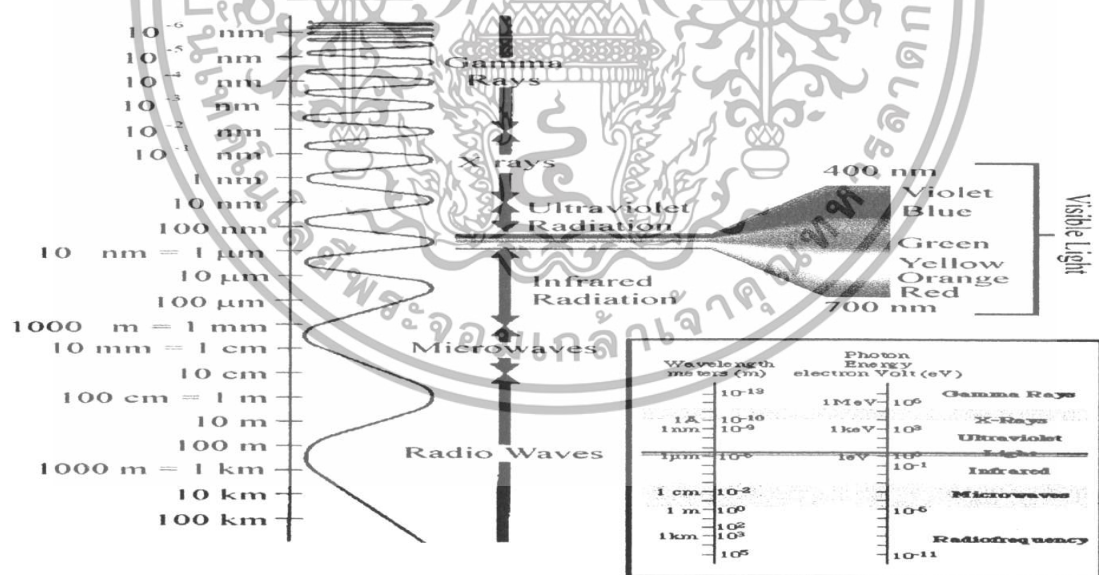
รังสีเอกซ์ไม่ใช่รังสีที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ แต่เป็นรังสีที่เกิดจากการสร้างของมนุษย์ โดยใช้ปรากฏการณ์เบรมสตราลุงต์ (Bremsstrahlung) ซึ่งแปลว่า การสกัดกั้น การทำให้ช้าลงหรือการทำให้หยุด (Breaking Radiation) รังสีเอกซ์เกิดขึ้นจากการที่อิเล็กตรอนซึ่งเป็นอนุภาคที่มีมวล (อิเล็กตรอน 1 ตัว มีมวล 9.11×10^{-31} กิโลกรัม) วิ่งไปกระทบกับเป้าโลหะซึ่งทำมาจากทั้งสแตนและถูกทั้งสแตนสกัดกั้นไว้ มีผลทำให้อิเล็กตรอนวิ่งช้าลงหรือหยุดและคายพลังงานจลน์ (kinetic energy) ออกมา ในขณะที่อิเล็กตรอนกำลังวิ่ง จะมีพลังงานอยู่ 2 รูป คือ พลังงานศักย์ (potential energy) และ พลังงานจลน์ พอถูกทั้งสแตนสกัดกั้นไว้จนหยุด อิเล็กตรอนจะคงเหลือแต่ พลังงานศักย์ ส่วนพลังงานจลน์ไม่สูญหายแต่เปลี่ยนไปเป็นพลังงานใหม่อีก 2 รูป คือ มากกว่า 99 เปอร์เซ็นต์จะเปลี่ยนเป็นความร้อนและน้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ จะเปลี่ยนเป็นพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่เรียกว่า รังสีเอกซ์ที่เกิดขึ้นจะเป็นส่วนผสมของรังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 สเปกตรัมของรังสีเอกซ์

ตั้งแต่ความยาวคลื่นสั้นที่สุดซึ่งมีพลังงานสูงสุดที่เกิดจากอิเล็กตรอนที่ถูกทำให้หยุดและความยาวคลื่นปานกลางขนาดต่างๆ ไปจนถึงความยาวคลื่นที่สูงสุดซึ่งเป็นรังสีเอกซ์ที่มีพลังงานต่ำและยังมีพลังงานจลน์เหลืออยู่ ส่วนผสมของรังสีเอกซ์นี้เรียกว่า รังสีเอกซ์สเปกตรัม(X-Ray Spectrum) รังสีเอกซ์ที่มีความยาวคลื่นสั้นจะมีพลังงานสูงและมีอำนาจทะลุทะลวงมากกว่ารังสีเอกซ์ที่มีค่าความยาวคลื่นยาว



รูปที่ 2.4 แถบความถี่ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

นอกจากวิธีการข้างต้น รังสีเอกซ์ยังสามารถเกิดขึ้นได้อีกวิธีหนึ่ง คือเมื่ออิเล็กตรอนหลาย ๆ วงที่วิ่งรอบนิวเคลียสของอะตอม เกิดการกระโดดข้ามจากวงโคจรที่มีระดับพลังงานสูงกว่าไปสู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานที่ต่ำกว่าจะเกิดการคายพลังงานออกมาในรูปของรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานเฉพาะ และคงที่ โดยขึ้นอยู่กับลักษณะอะตอมของธาตุนั้น ๆ รังสีเอ็กซ์ที่ได้มาด้วยวิธีนี้ จึงเรียกว่ารังสีลักษณะเฉพาะ (Characteristic Radiation)

การเกิดของรังสีเอ็กซ์นี้อาศัยองค์ประกอบสำคัญ 5 ประการคือ

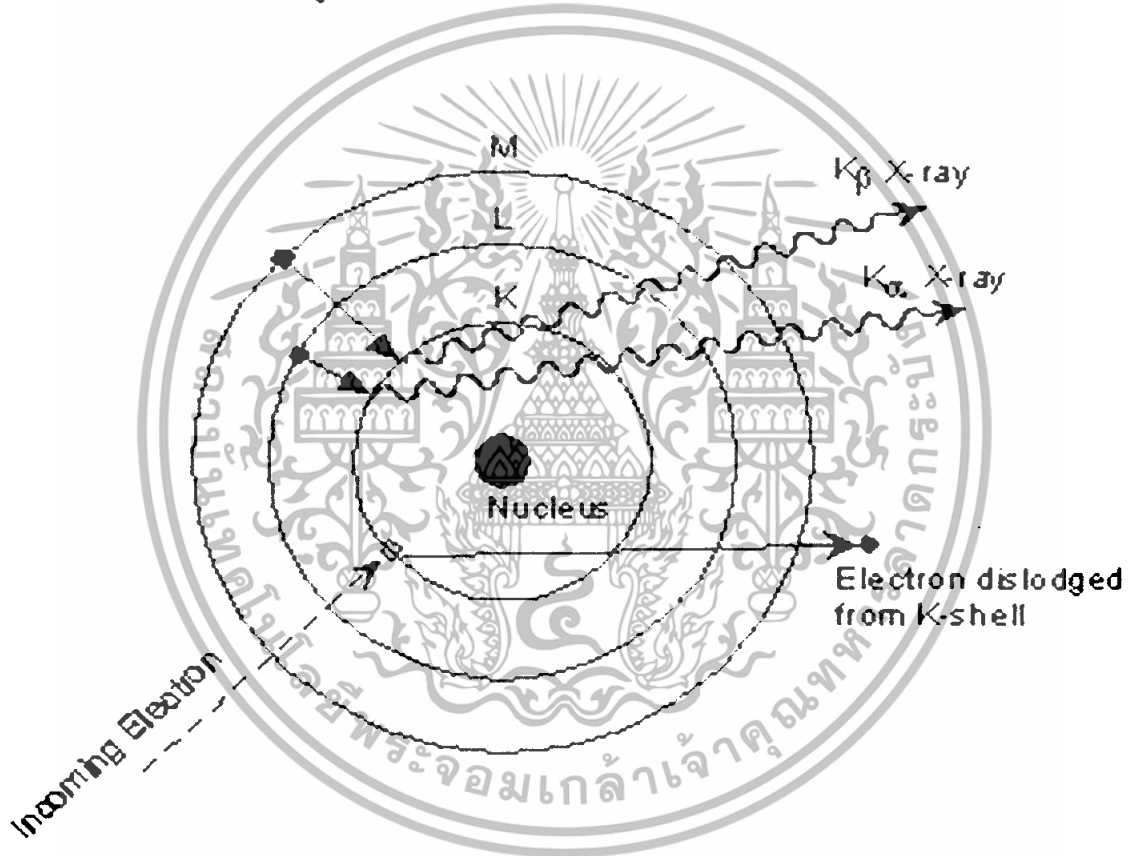
1. ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน หรือ การแยกอิเล็กตรอนนอกจากอะตอมของโลหะ อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้น หรือแยกจากอะตอม ของโลหะ ที่ทำเป็นไส้หลอดรังสีเอ็กซ์ โดยการที่เราผ่านกระแสไฟฟ้า เข้าไปในไส้หลอด (Filament) จนกระทั่ง ไส้หลอดร้อนขึ้น ประมาณ 2000°C หรือมากกว่านั้น จะมีผลทำให้เกิด เทอร์มิโอนิกอิมิชัน (Thermionic Emission) คือ อิเล็กตรอน หลุดออกจากเซลล์หรือวงโคจรของมัน เมื่อถูกความร้อนอิเล็กตรอนที่หลุดออกมานี้ จะมาออกกันอยู่รอบๆ ผิวหน้าของโลหะ จนกลายเป็นกลุ่ม (Cloud) เรียกว่า Space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอน ไม่สามารถหลุดพ้น ไปจากผิวหน้าโลหะ เพราะว่าแรงดึงดูดระหว่าง อิเล็กตรอน และอะตอม ของโลหะยังมีอยู่

2. การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุด และเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูงวิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอน หลุดจากอะตอมไปได้ คือ ต้องหาสิ่งที่มีพลังงาน หรือแรงดึงดูด มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอน กับ อะตอม ของโลหะ มาดึงดูดอิเล็กตรอน สิ่งนั้นก็ คือ ไฟฟ้าแรงสูง (High Voltage) ไฟฟ้าแรงสูงนี้ นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอน หลุดจากผิวหน้าของโลหะ แล้ว ยังทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือวิ่ง ไปด้วยความเร็วสูง กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ ต้องทำให้ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบให้ต่างกัน ความต่างศักย์นี้ ถ้ายังมีค่ามากขึ้นเท่าใด ก็ยิ่งทำให้อิเล็กตรอน หลุดจากผิวหน้าของไส้หลอด ได้มาก และวิ่ง ไปด้วยความเร็วสูงขึ้น ความต่างศักย์ 100 Kilo-Voltage จะทำให้อิเล็กตรอน มีความเร็ว เท่ากับประมาณ 165 กิโลเมตรต่อวินาที

3. การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไป ต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง จึงจะทำให้ อิเล็กตรอนวิ่งไป ด้วยความเร็วสูง ดังนั้น ภายในหลอดรังสีเอ็กซ์ จึงเป็นสุญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศ หรือก๊าซอยู่ภายในหลอด แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลงเนื่องจากเกิดไอออนไนเซชัน (Ionization)

4. การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้มข้น (Concentration of Electron)จะต้องมีวิธีการที่จะให้อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางเดียวกัน คือ พุ่งไปหาจุดโฟกัสของเป้าด้วยปริมาณ (ความเข้มข้น) ที่มากพอสมควร ซึ่งทำให้ได้โดยการใช้ เครื่องมือที่เรียกว่า "Electron focusing device" คอยควบคุม ให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ไปตกในบริเวณจุดโฟกัสของเป้า

5. การทำให้อิเล็กตรอนหยุดวิ่งในทันทีทันใดนั้น เราจะต้องทำให้อิเล็กตรอนที่วิ่งมาด้วยความเร็วสูงนี้หยุดวิ่ง ในทันทีทันใด ทำได้โดยหาวัตถุมาถนัด หรือขวางอิเล็กตรอนวัตถุนั้นก็คือเป้า (Target) ผลที่เกิดขึ้น คือ เกิดการชน หรือ กระแทกกันระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าอย่างแรง อิเล็กตรอนดังกล่าว จะไปชนอิเล็กตรอน ที่อยู่ในวงโคจร ของอะตอมของเป้านั้น ให้หลุดกระเด็น ออกนอกวงโคจร และจะมีอิเล็กตรอน จากวงโคจรอื่นๆ ที่อยู่ถัดไป วิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจากพลังงาน ของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจร จะไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปของรังสีเอ็กซ์และความร้อน (ส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนมากกว่า) กล่าวคือ จากพลังงาน ของอิเล็กตรอนทั้งหมด ที่วิ่งไปสู่เป้านั้น 99.8% จะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2 % เป็นรังสีเอ็กซ์



รูปที่ 2.5 การเกิดของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์

1. เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นสั้นมาก คืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.01 ถึง 100 Å หรือ อยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมมาที่รังสีอัลตราไวโอเล็ต
2. มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เป็นต้น ว่าเดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสุญญากาศแล้วเดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ 186,000 ไมล์ต่อวินาที หรือ 3×10^8 เมตรต่อวินาที นอกจากนั้นแล้ว ยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และเบี่ยงเบนได้เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา
3. ไม่หักเหโดยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า
4. เกิดจากการที่อนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งไปชนเป้าโลหะ (Target) อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้ จะไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่น ๆ ที่อยู่ในวงโคจร อะตอมของเป้าให้หลุดกระเด็นออกนอกวงโคจร
5. ทำให้เกิดการเรืองแสง (Fluorescence และ Phosphorescence) ในสารพิเศษบางอย่าง
6. ดูดกลืน (Absorbed) โดยสสาร (Matter) ทุกชนิดมากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และน้ำหนักของอะตอมของสสารนั้น
7. ทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า (Ionization) เมื่อผ่านไป ในอากาศหรือก๊าซ
8. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อรังสีเอ็กซ์ไปถูกฟิล์มถ่ายรูป จะทำให้ฟิล์มนั้นดำ จึงนำผลอันนี้มาใช้ในการบันทึกภาพรังสีลงบนแผ่นฟิล์มเอ็กซ์เรย์
9. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ เป็นต้นว่า ทำให้เซลล์ของร่างกายเปลี่ยนแปลง หรือเกิดการผ่าเหล่า (Genetic Mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็นจำนวนมากและนานพอ
10. มีอำนาจในการทะลุทะลวง (Penetration) สูง สามารถทะลุผ่านเนื้อหนังของมนุษย์ และสัตว์ได้แต่ไม่สามารถทะลุผ่าน แผ่นตะกั่ว หรือคอนกรีตหนา ๆ ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 การประยุกต์ใช้งานรังสีเอ็กซ์

2.1.4.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

ตั้งแต่การค้นพบของ Roentgen ว่ารังสีเอ็กซ์สามารถบอกรูปร่างของกระดูกได้รังสีเอ็กซ์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการถ่ายภาพในการแพทย์ นำไปสู่สาขาที่เรียกว่า รังสีวิทยา โดยนักรังสีวิทยาได้ใช้ ภาพถ่าย (Radiography) ที่ได้มาใช้ในการช่วยการวินิจฉัยโรคนั้นเอง

รังสีเอ็กซ์มักถูกนำมาใช้ในการตรวจหาสภาพทางพยาธิวิทยาของกระดูก แต่ก็สามารถหาความผิดปกติของบางโรคที่เป็นที่เนื้อเยื่อทั่วไปได้ ตัวอย่างที่พบเห็นได้ทั่วไป เช่น การเอ็กซ์เรย์ปอด ซึ่งสามารถบอกถึงความผิดปกติได้หลายโรค เช่น โรคปอดบวม (Pneumonia) โรคมะเร็งปอด (Lung Cancer) หรือน้ำท่วมปอด (Pulmonary Edema) รวมถึงการเอ็กซ์เรย์ช่องท้อง เช่น การตรวจภาวะอุดตันในลำไส้เล็ก (Ileus) ภาวะลมหรือของเหลวคั่งในช่องท้อง ในบางครั้งยังใช้ในการตรวจหาเนื้องอกในตับหรือเนื้องอกในกระเพาะปัสสาวะได้ รวมทั้งในบางกรณีสามารถใช้ในการถ่ายภาพเนื้อเยื่อบางชนิด เช่น สมองและกล้ามเนื้อได้ แต่นับแต่ในปี ค.ศ. 2005 รังสีเอ็กซ์ถูกขึ้นบัญชีในรัฐบาลสหรัฐอเมริกาว่าเป็นสารก่อมะเร็ง การถ่ายภาพเนื้อเยื่อส่วนใหญ่จึงถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิค CAT หรือ CT Scanning (Computed Axial Tomography) หรือใช้เทคนิค MRI (Magnetic Resonance Imaging) หรือ Ultrasound ทดแทน

ปัจจุบัน การรักษาโรคมะเร็งส่วนใหญ่ได้มีการนำรังสีมาช่วยในการรักษาโรค (Radiotherapy) และได้มีการรักษาพยาธิสภาพต่าง ๆ เช่น การรักษาแบบ Real-Time ในการผ่าตัดถุงน้ำดี การขยายหลอดเลือด (Angioplasty) หรือการกลืนสาร Barium Enema เพื่อตรวจสภาพลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ โดยการใช้ Fluoroscopy

2.1.4.2 การประยุกต์ใช้ในด้านอื่น

รังสีเอ็กซ์ได้ถูกพัฒนานำไปใช้ในหลายสาขา เช่น การวิเคราะห์ลักษณะของอะตอมและการผลิต โดยอาศัยการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Crystallography) การวิจัยทางดาราศาสตร์ที่อาศัยการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ที่มาจากในวัตถุ (X-Ray Astronomy) การถ่ายภาพและผลิตภาพในขนาดเล็ก (X-Ray Microscopic Analysis) รวมทั้งการตรวจหารอยร้าวขนาดเล็กในโลหะ การติดตามผลของตัวอย่างในการวิจัยโดยอาศัยคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Fluorescence) รวมถึงใช้ตรวจหาอาวุธปืนหรือระเบิดในกระเป๋าเดินทาง

2.2 ทฤษฎีรอยต่อ พี-เอ็น

รอยต่อพี-เอ็นจะประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำสองส่วนที่เป็นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดเอ็น ขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดพีเรียกว่า “แอโนด” (Anode) หรือขั้วบวก และขั้วของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น เรียกว่า “แคโทด” (Cathode) หรือขั้วลบ บริเวณสัมผัสระหว่างทั้งสองจะถูกเรียกว่า รอยต่อ พี-เอ็น



รูปที่ 2.6 โครงสร้างรอยต่อ พี-เอ็น

2.2.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น และพอสรุปได้ดังนี้คือ เนื่องจากโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นด้วยความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกันนี้เอง จะทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่ซึ่งมีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านที่ซึ่งมีความหนาแน่นประจุพาหะที่น้อยกว่า กล่าวคือโฮลทางด้านพีในบริเวณใกล้กับรอยต่อ จะแพร่เข้าไปในด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้กับรอยต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพีการแพร่นี้จะทำให้เกิดปรากฏการณ์รอยต่อ พี-เอ็น และสิ่งที่ตามมาก็คือจะมีการรวมตัว (recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนผลจากการรวมตัวของประจุพาหะทั้งสองนี้ จะทำให้อะตอมของสารเจือบริเวณใกล้ ๆ กับรอยต่อ พี - เอ็นกลายเป็นไอออน (ion) และแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาได้ กล่าวคืออะตอมของสารเจือทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอนอะตอมนี้ จึงแสดงตัวเป็นไอออนบวก และอะตอมของสารเจือทางด้านพีจะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

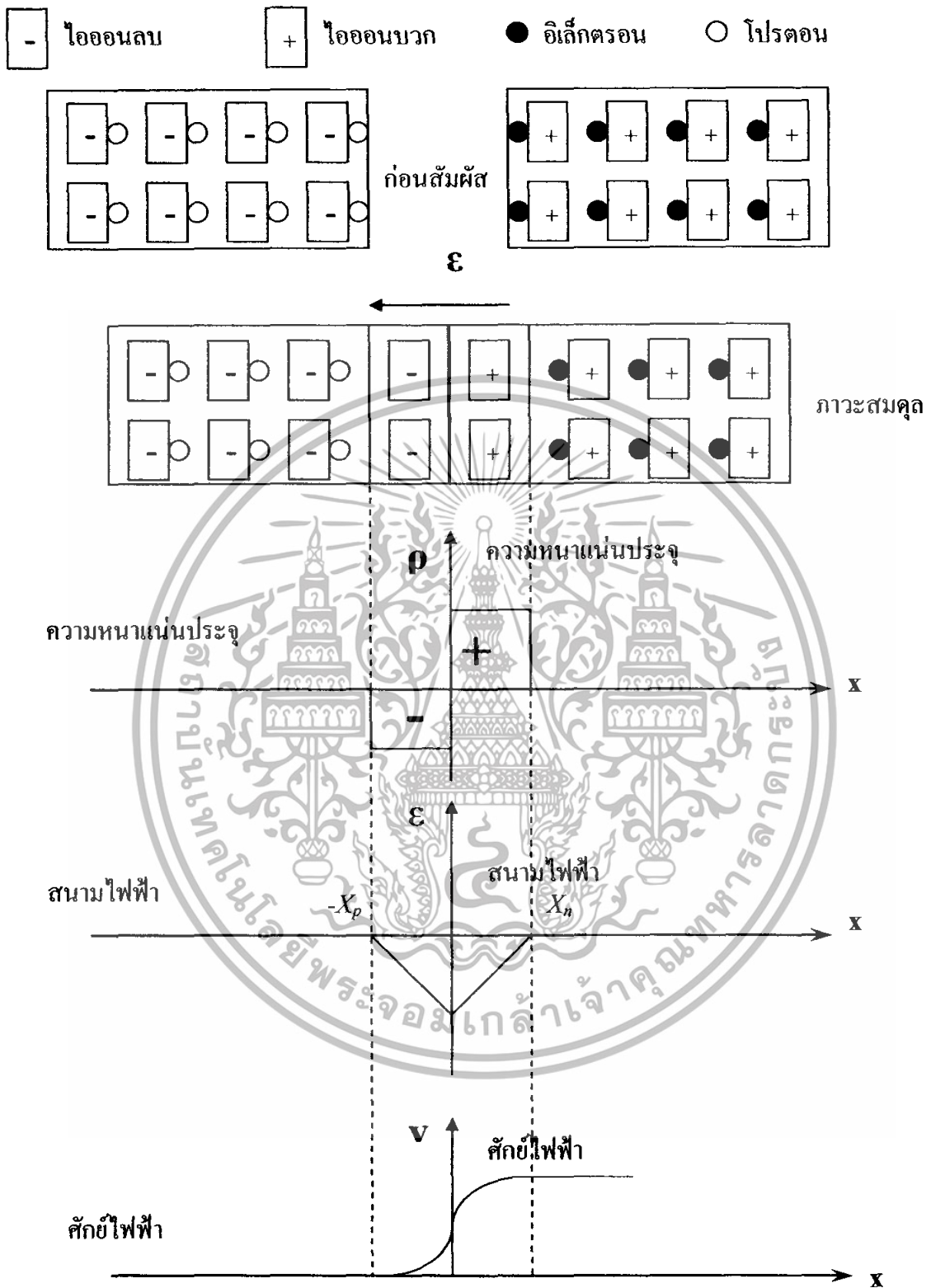
อะตอมนี้แสดงตัวเป็นไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้จะทำให้เกิดประจุไฟฟ้าขึ้น ณ บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.7 โดยที่อำนาจของสนามไฟฟ้านี้จะขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะทั้งสองชนิด จะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีอำนาจมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสองเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้จึงอยู่ในภาวะสมดุล (Equilibrium)

นอกจากนี้แล้ว ปรากฏการณ์ ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อนั้นไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิดคงมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็น ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพไอออนและไอออนที่มีอยู่ในบริเวณดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (Built – In Voltage) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นของประจุ สนามไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อแสดงได้ ดังในรูปที่ 2.7 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อหรือที่เรียกว่า ศักย์สัมผัส (Contact Potential) แสดงได้ด้วยสมการ 2.1

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

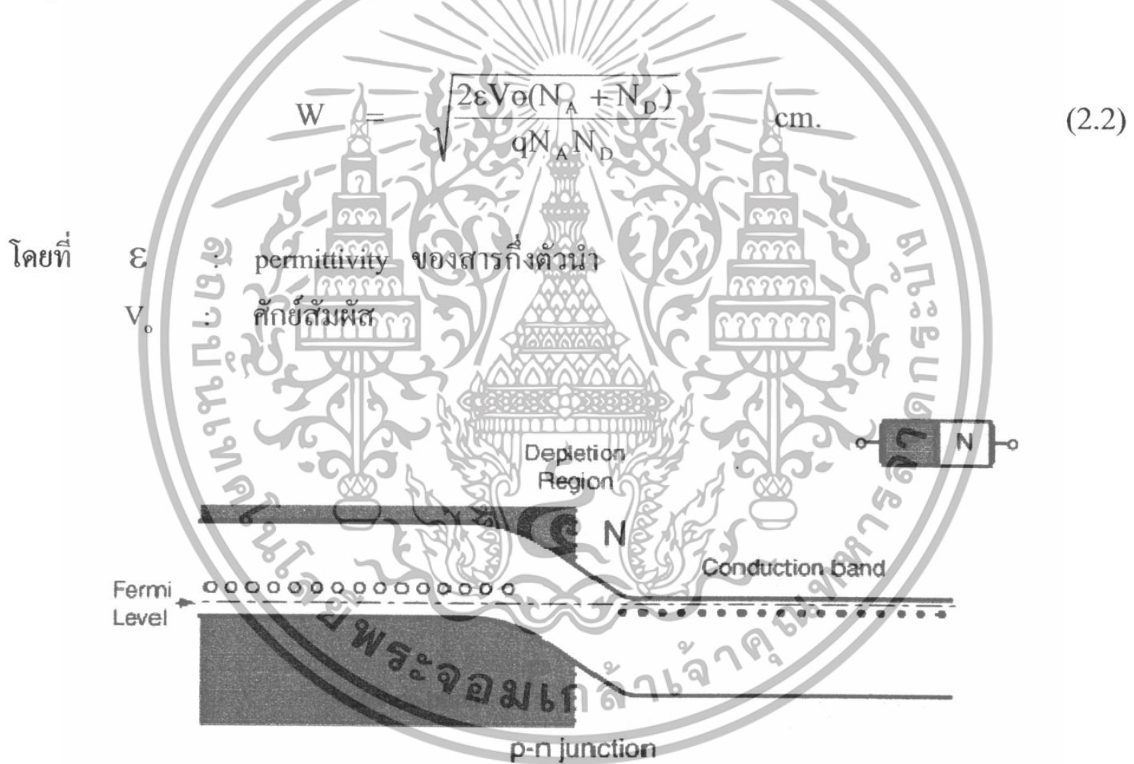
- ซึ่ง
- V_0 : ศักย์สัมผัส (V)
 - k : ค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
 - T : อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ (°K)
 - q : ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์
 - N_A : ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (cm^{-3})
 - N_D : ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (cm^{-3})
 - n_i : ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})



รูปที่ 2.7 ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะสนามไฟฟ้า ภายในบริเวณรอยต่อและศักย์ไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับของ p-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เราพิจารณาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน จะพบว่าขณะที่รอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น เนื่องจากระดับเฟอร์มิ ซึ่งระดับพลังงานที่เรานิยามไว้ว่า โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนี้จะมีค่าเป็น 1/2 ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น ระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองจะต้องปรับให้มีระดับเดียวกัน ขณะที่ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองกำลังปรับให้เท่ากัน จะตรงกับภาวะที่โอส และอิเล็กตรอนแพร่ข้ามรอยต่อ จนกระทั่งเกิดสนามไฟฟ้าภายในต่อต้านการแพร่ของประจุพาหะ และในที่สุดอิเล็กตรอนและโอสก็ไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้ ซึ่งเป็นภาวะสมดุลของรอยต่อ ในขณะนี้เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าระดับเฟอร์มิ (Fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะมีระดับเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.8 และในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังในสมการ 2.2



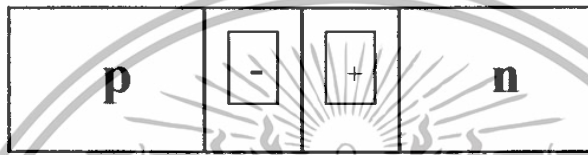
รูปที่ 2.8 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงานในภาวะสมดุล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และนอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับ โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacitor) ค่าความหนาแน่นของประจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังในสมการ 2.3

$$C_j = A \sqrt{\frac{\epsilon q N_A N_D}{2(N_A + N_D)(V_o \pm V_a)}} \quad F/m^2 \quad (2.3)$$

โดยที่ C_j คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ , ฟารัด/ตร.เมตร , V_A คือ แรงดันไบอัส (V)

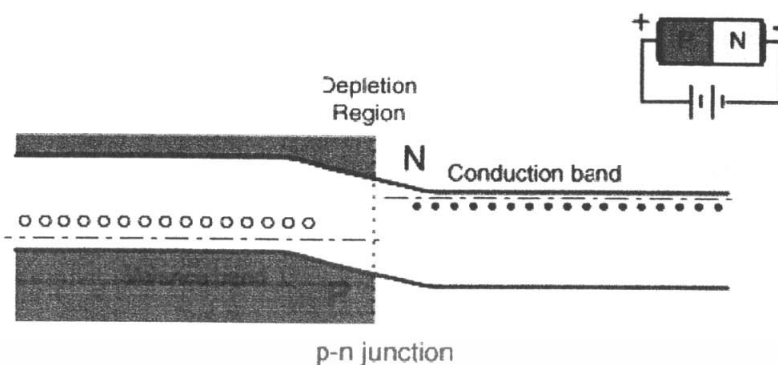


รูปที่ 2.9 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น

2.2.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับไบอัสตรง

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น แรงดัน ไบอัสตรงจากภายนอกจะทำให้สนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อ พี-เอ็น มีค่าลดลง โดยโวลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นจะฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพีเอ็นไปได้โดย ปริมาณของอิเล็กตรอนและ โวลที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนั้นจะขึ้นอยู่กับแรงดัน ไบอัสในลักษณะ เอกซ์โปเนนเชียล (Exponential Function) จากการฉีดของโวลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เอง จะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



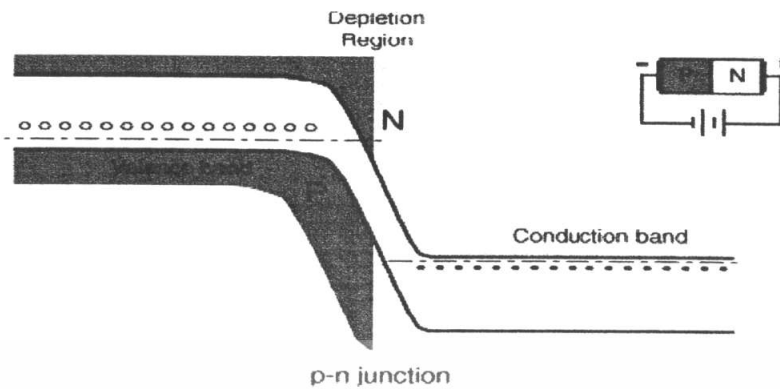
รูปที่ 2.10 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่ยอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังในรูปที่ 2.10 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) ของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และค่าแพ่งศักย์ที่ยอยต่อจะมีขนาดลดลงดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการเคลื่อนที่ของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อได้ จึงเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้ แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับไบอัสตรงนั้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านทั้งสองมีระดับต่างกันพาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากด้านเอ็นข้ามกำแพงศักย์ที่ยอยต่อแล้วแพร่เข้าไปยังด้านพีทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอนไหลลงทางด้านพีไปยังทางด้านเอ็น ส่วนพาหะโฮลจะเคลื่อนที่จากพีข้ามกำแพงศักย์ที่ยอยต่อแล้วแพร่ข้ามไปทางด้านเอ็นทำให้มีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากโฮลไหลจากด้านพีไปยังด้านเอ็น

2.2.3 รอยต่อพีเอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.11 กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพีเอ็น จะพบว่าแรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับสนามไฟฟ้าภายใน ซึ่งจะเกิดขึ้นกับบริเวณรอยต่อ ดังนั้นจะทำให้กำแพงศักย์ (Potential Barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็นและโฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปไต่รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวนไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ แต่อย่างไรก็ดีจะพบว่าในขณะนี้ โฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านพีซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับการไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะรอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

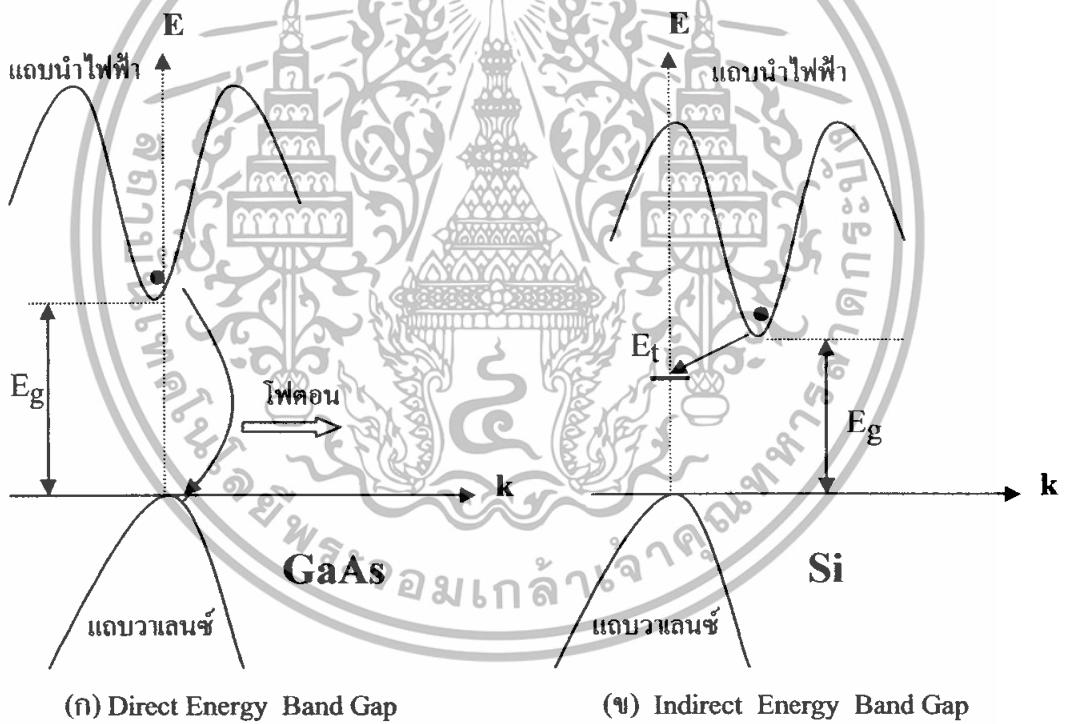
ลักษณะของแถบพลังงานในขณะนี้แสดงได้ดังในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิค่าหนึ่ง ๆ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้การสร้างโฟโตไดโอด

โดยความเป็นจริงนั้นลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่าในรูปที่ 2.7 มากสิ่งสำคัญที่เราสนใจในกราฟ E-k ก็คือ ตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์ หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ เราจะพบว่าสารกึ่งตัวนำบางชนิด ตำแหน่งทั้งสองจะอยู่ตรงกัน เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.12 (ก) เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “แถบพลังงานช่องตรง” หรือ “แถบช่องตรง” (Direct Band Gap) และยังมีสารกึ่งตัวนำอีกกลุ่มหนึ่งซึ่งตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้ จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.12 (ข) เช่น ซิลิคอน ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “แถบพลังงานช่องไม่ตรง” หรือ “แถบช่องไม่ตรง” (Indirect Band Gap)



รูปที่ 2.12 ลักษณะกราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบช่องตรง

(ข) แบบช่องไม่ตรง

โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งที่ $k = 0$ แต่จากรูปที่ 2.12 (ข) จะเห็นว่า จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า จะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือก็คือไม่อยู่ตรงกัน อีกนัยหนึ่งก็คือ จุดสองจุดนี้มีค่า k ที่ต่างกัน หรือก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกันนั่นเอง ดังนั้นคุณสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้ จะแตกต่างกันมาก เช่น คุณสมบัติทางด้านแสง (Optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง (GaAs) พลังงานโฟตอนของแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ $h\nu > E_g$ ก็จะสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง (Direct) และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบโดยตรงเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้ง่าย ทำให้สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้ สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (Optical devices) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง (Si) อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนระดับพลังงานก่อนซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงลดมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อนจึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้นในทำนองเดียวกัน พลังงานโฟตอนจากแสงก็ไม่สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่าย ถึงแม้พลังงานจากโฟตอนจะมีค่ามากเพียงพอก็ตามแต่อิเล็กตรอนก็ยังต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า การดูดกลืนหรือคายพลังงานของแสงของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ เกิดขึ้นได้ไม่ดั่งนั้นเนื่องจากมีคุณสมบัติทางแสงที่ดีกว่าสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง

อย่างไรก็ดีการเลือกใช้ซิลิคอนในการสร้างโฟโตนิกส์ก็ยังมีข้อดีอีกหลายประการ ในการเลือกใช้สร้างโฟโตนิกส์แทน แกลเลียมอาเซไนด์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอยู่มาก ราคาถูก และสามารถสร้างชั้นออกไซด์ SiO_2 ที่ผิวได้ง่ายกว่า โดยวิธีการออกซิเดชันและเป็นชั้นออกไซด์ที่เสถียรภาพกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างวงจรรวม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.5 คุณสมบัติของอุปกรณ์รับแสงที่นำมาใช้งาน

ในการที่เราจะทำการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน จะต้องพิจารณาคุณสมบัติต่าง ๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่สมบูรณ์และ มีความคุ้มค่ากับสิ่งที่เราทำการลงทุนไปควรมีหลักการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. มีความไวสูงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องสร้างให้สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นดังกล่าวได้ดีโดยการเลือกใช้สารที่เหมาะสม
2. ความสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงได้มาก ความสามารถในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสง จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทางควอนตัมของสารที่ใช้สร้าง โดยทั่วไปประสิทธิภาพทางควอนตัมจะถูกกำหนดโดยสัมประสิทธิ์ การดูดกลืน (Absorption Coefficient) ของสารนั้นค่าดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นคือสารแต่ละชนิดจะมีค่าดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ไม่เท่ากัน
3. มีความไวสูงในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต เพื่อให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ เนื่องจากในปัจจุบันแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยนำแสงจะมีค่าตั้งแต่หลายร้อย เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้น อุปกรณ์รับแสงจะต้องมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตสูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ทันกับสัญญาณอินพุตที่ได้รับ
4. สัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์แสงจะต้องมีค่าต่ำ สัญญาณรบกวนที่สำคัญได้แก่ สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise) เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสโฟโต้ โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากแสงที่มาจากกระทบในบางช่วงเป็นแสงที่ไม่มีเฟสเดียวกัน หรือมีหลายความยาวคลื่นทำให้อิเล็กตรอนได้รับพลังงานไม่เท่ากัน จึงทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณกระแสโฟโต้ จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สัญญาณรบกวนควอนตัมนี้จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสกลับ
5. มีขนาดเล็กเพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานได้สะดวก และเชื่อมต่อกับเส้นใยนำแสงซึ่งมีขนาดเล็กได้ง่าย
6. ใช้แรงดันไบอัสต่ำ เพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า
7. มีความเชื่อถือได้สูง อุปกรณ์รับแสงจะต้องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี
8. มีราคาต่ำ เนื่องจากในการออกแบบระบบ ปัจจัยทางการเงินมักจะเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการออกแบบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายใน ประกอบด้วยการดูดกลืนพลังงานของแสงที่มากจนกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-Hole Pairs : EHP) และการรวมตัวของอิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งในสารกึ่งตัวนำ ช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรงจะมีลักษณะที่แตกต่างกัน

2.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (EHP)

คู่อิเล็กตรอน-โฮล (EHP) อิสระนั้นเกิดจากพลังงานความร้อนจากภายนอก นอกจากนี้ยังเกิดจากพลังงานโฟตอนจากแสงได้อีก ซึ่งในทางฟิสิกส์นั้นควอนตัมกลืนแสงจะถูกพิจารณาว่ามีคุณสมบัติเป็นอนุภาค โดยเรียกอนุภาคของแสงว่า "โฟตอน" และพลังงานของโฟตอนจะแปรผันกับความถี่ของคลื่นแสง ดังสมการ

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \text{ eV} \quad (2.4)$$

โดยที่

ν คือ ความถี่

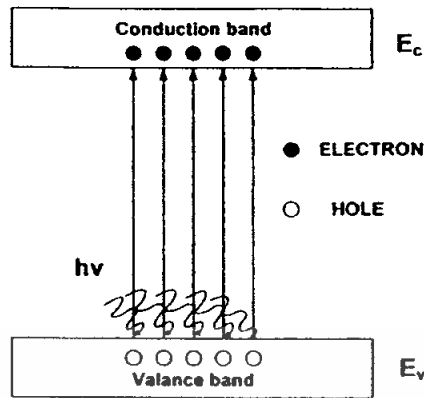
λ คือ ความยาวคลื่นของแสง

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec

c คือ ความเร็วแสงมีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

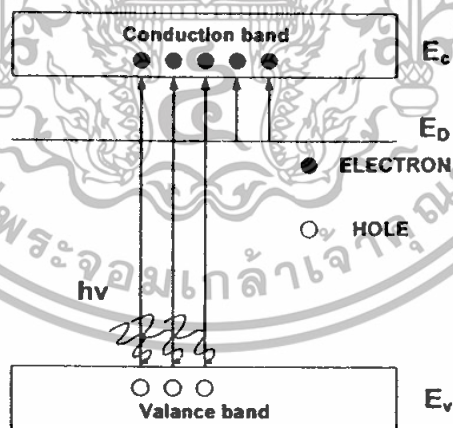
กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (EHP) ในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (intrinsic semiconductor) ก็ต่อเมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและกระตุ้นให้เปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ดังแสดงในรูปที่ 2.13 ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง แต่ถ้า $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น ซึ่งโฟตอนที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะต้องมีพลังงานมากกว่า 1.12 eV หรือ โฟตอนมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1110 nm ซึ่งความยาวคลื่นมากที่สุดที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนนี้เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (Long Wavelength Cutoff : λ_{max})

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.13 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

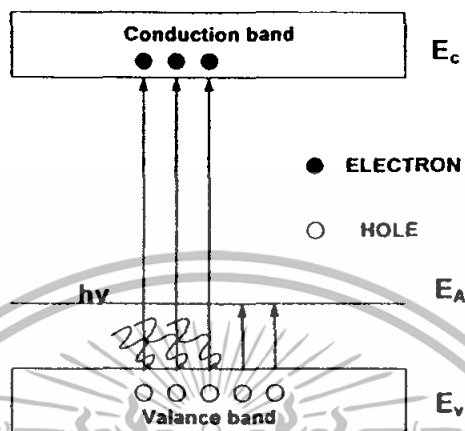
สำหรับ n-type semiconductor จะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (Donor Level: E_D) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้ให้จะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูป 2.14



รูปที่ 2.14 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิกชนิดเอ็น

ส่วน p-type semiconductor จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (Acceptor Level : E_A) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้รับนี้จะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแฉววาเลนซ์ (E_V) ซึ่งจะเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ หลุดไปอยู่ในระดับผู้รับ ได้ดังแสดงในรูป 2.15



รูปที่ 2.15 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสง
ในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิก ชนิดพี

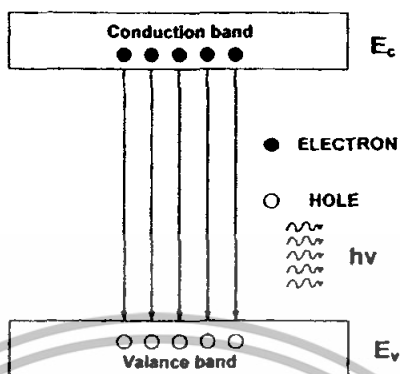
2.3.2 การรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (Recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด กล่าวคือเป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะคืออิเล็กตรอนและโฮลหายไป พลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลง คือ พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการชนกับแลตทิซในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้เกิดขึ้นในสารตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกรวมกันว่า กระบวนการรวมตัวใหม่ และการเกิดของพาหะ (Recombination And Generation Process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุล ความร้อนที่อุณหภูมิใด ๆ พลังงานความร้อนจะทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮล เกิดขึ้นและรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยสามารถแบ่งกระบวนการรวมตัวใหม่ได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

1. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (Direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูป 2.16

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

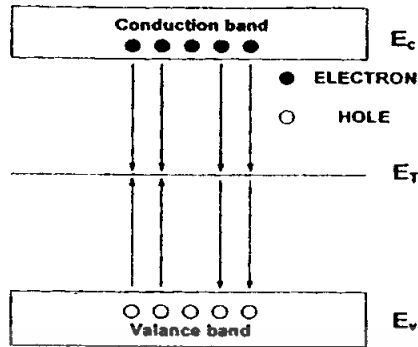
ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอนได้ง่าย



รูปที่ 2.16 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบโดยตรง

2. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (Indirect Recombination Process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรงคือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับลงไปยังระดับพลังงานหนึ่งในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะลงไปในแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูป 2.17 ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่น ๆ หรืออาจเกิดจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination Center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานเรียกว่า โฟนอน ออกมาในที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบโคออร์ดิเนต

2.4 คุณสมบัติสำคัญของโฟโอดีทีเทคโนโลยี

โฟโอดีทีเทคโนโลยีแต่ละชนิดมีขีดจำกัดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างและวัสดุที่ใช้ทำให้โฟโอดีทีเทคโนโลยีแต่ละชนิดเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกันในการเลือกใช้จึงต้องพิจารณาจากคุณสมบัติของโฟโอดีทีเทคโนโลยี ได้แก่ ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency) สภาพการตอบสนอง (Responsivity) ความเร็วในการตอบสนอง (Bandwidth) และช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนอง (Spectral Response)

2.4.1 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum Efficiency : η) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่วงจรภายนอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (Internal quantum efficiency : η_{in}) คือจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮล ที่เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency : η_{ext}) คือจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อนและค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ (α) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งหาได้จากสมการ 2.5

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / h\nu} = \frac{I_p h\nu}{q P_{inc}} \quad (2.5)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

I คือ กระแสแสงของโฟโตรีเซพเตอร์

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

V คือ ความถี่ของคลื่น

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ ค่าประสิทธิภาพของควอนตัมภายในโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 90 % แต่ถ้าไม่มีการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนบนผิวของโฟโตรีเซพเตอร์ ชั้นสารกึ่งตัวนำจะสะท้อนออกไปประมาณ 30 % เนื่องจากครรชนหักเหของสารกึ่งตัวนำและอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 70 %

2.4.2 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (Responsivity : \mathcal{R}) หมายถึง กระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (2.6)$$

โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

I คือ กระแสแสงของโฟโตรีเซพเตอร์

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์

V คือ ความถี่ของคลื่น

λ คือ ความยาวคลื่น

η คือ ค่าประสิทธิภาพควอนตัม

จากสมการที่ 2.6 พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน

2.4.3 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจจับแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอกตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น(t_r) และช่วงเวลาขาลง(t_f)

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแฟกเตอร์ของ

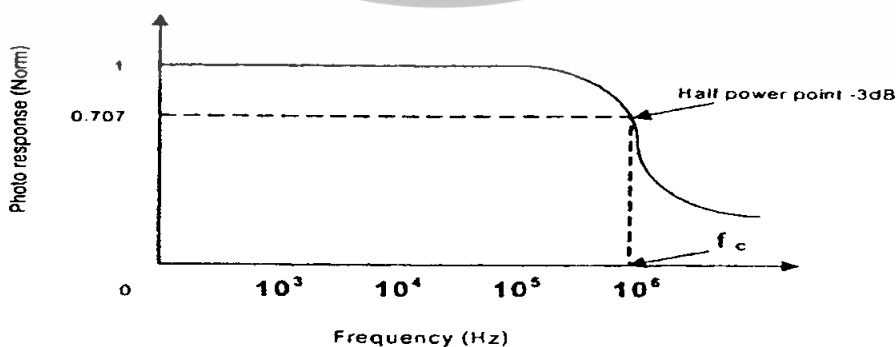
1. เวลาการแพร่ (Diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ
2. เวลาส่งผ่าน (Transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ
3. ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโอดีไดโอดกับ

ค่าโหลดความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโอดีไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูง ๆ จะต้องพิจารณาถึงแฟกเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย

2.4.4 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ (Bandwidth) คือ อัตราเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณค่าความถี่ต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางประการของโฟโอดีไดโอด ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น ดังรูป 2.18 ในทางปฏิบัติ การตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัตออฟ (Cutoff Frequency : f_c) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุด half power point มีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัตออฟจึงหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่โฟโอดีไดโอดสามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานของโฟโอดีไดโอดมีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ



รูปที่ 2.18 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.5 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัม

ผลตอบสนองของสเปกตรัมทางแสง หมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืน โฟตอนที่มีความยาวคลื่นต่าง ๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลง ค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงจะเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการดูดกลืนโฟตอนเฉพาะบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์รวมตัวที่ผิวทำให้ผลการตอบสนองดีเทคเตอร์ลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับโฟโอดีเทคเตอร์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 2.19



รูปที่ 2.19 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอน โฟโอดีไดโอด

จากรูปที่ 2.19 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น โดยมีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด และการตอบสนองจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคลื่นสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถตอบสนองได้คือ 1110 nm

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

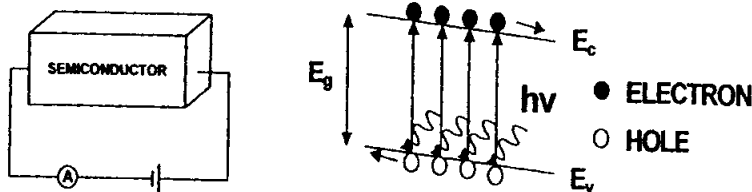
2.5 ชนิดของโฟโตดีเทคเตอร์

โฟโตดีเทคเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ปัจจุบัน โฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างสารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ โฟโตคอนดักเตอร์ และโฟโตไดโอด โดยในกลุ่มของโฟโตไดโอดยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายชนิดตามลักษณะโครงสร้าง เช่น พีเอ็นโฟโตไดโอด อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด ซ็อคทีย์โฟโตไดโอด และพินโฟโตไดโอด

2.5.1 โฟโตคอนดักเตอร์

โฟโตคอนดักเตอร์ เป็นโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด สร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียวโดยไม่ต้องมีการแพร่อะตอมสารเจือทำให้เกิดเป็นรอยต่อ มีการสร้างขั้วไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคขึ้นที่ปลายของสารกึ่งตัวนำเพื่อจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.20 เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนโฟโตคอนดักเตอร์จะทำให้อิเล็กทรอนิกส์ที่รับพลังงานเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้าและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ เมื่อให้แรงดันไบอัสจากภายนอกแก่ขั้วทั้งสองจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตกคร่อมภายในชั้นสารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์จะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศทางของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วบวก ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วลบทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โดยกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงตกกระทบบและความสามารถในการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

คุณสมบัติเด่นของโฟโตคอนดักเตอร์ คือ มีโครงสร้างง่าย และมีราคาถูกแต่ข้อด้อยที่สำคัญของโฟโตคอนดักเตอร์คือ ความเร็วในการตอบสนองช้า ซึ่งใช้เวลาอยู่ในระดับมิลลิวินาที โฟโตคอนดักเตอร์ที่มีขนาดใหญ่จะมีสภาพในการตอบสนองที่คิดจะใช้เวลาในการตอบสนองที่นานขึ้น

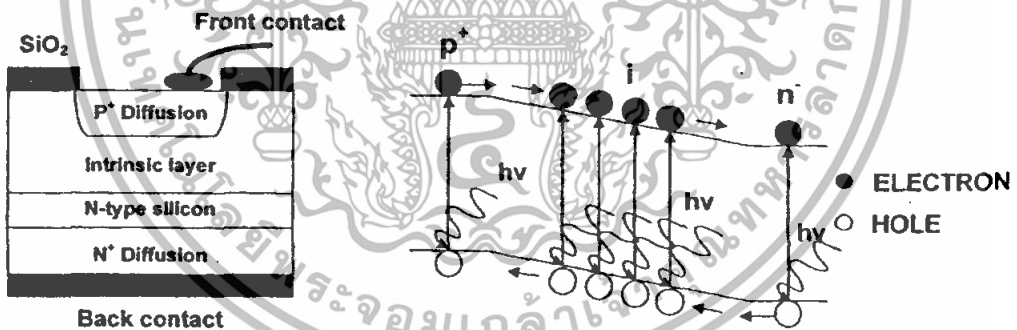


รูปที่ 2.20 โครงสร้างและแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.2 พี-เอ็นโฟโตไดโอด

พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) หรือโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นทั่วไป แต่ได้ถูกออกแบบให้แสงสามารถกระทบลงบนรอยต่อพี-เอ็นได้ โครงสร้างทั่วไปของโฟโตไดโอดและแถบพลังงานของพี-เอ็นโฟโตไดโอดแสดงในรูป 2.21 ในขณะที่ใช้งานจะป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับรอยต่อพี-เอ็นทำให้อิเล็กตรอนในพี-เอ็นโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p บริเวณปลอดพาหะและชั้น n ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าในชั้น p จะแพร่ไปสู่ในชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าที่ปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็ไหลในทิศตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่วงจรภายนอก จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลแปรโดยตรงกับความเข้มแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน



รูปที่ 2.21 โครงสร้างและแถบพลังงานของพี-เอ็น โฟโตไดโอด

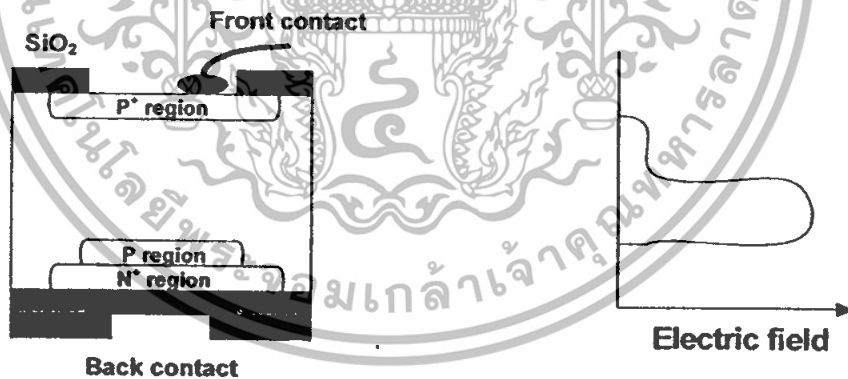
คุณสมบัติเด่นของพี-เอ็นโฟโตไดโอด พบว่าจะทำงานได้เร็วกว่าโฟโตคอนดักเตอร์และมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่า แต่มีข้อด้อยคือ ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภทซึ่งต้องทำงานด้วยความเร็วสูงมากๆ พี-เอ็นโฟโตไดโอดไม่สามารถตอบสนองได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.3 ะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด

อะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด (Avalanche Photodiode : APD) มีโครงสร้างคล้ายพินโฟโต้ไดโอด ดังแสดงในรูป 2.22 แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้โฟโต้ไดโอดทำงานใกล้ ๆ กับจุดพังทลาย (Breakdown Point) ด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 300-500 โวลต์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์อะวาลานซ์ขึ้น

ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามาชั้น p^+ แสงจะถูกดูดกลืนในบริเวณชั้นปลอดพาหะ และเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่อุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น n^+ และโฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น p^+ ในการสร้างโฟโต้ไดโอดชั้น ๆ (สารกึ่งตัวนำชนิด p ที่ถูกโดยอย่างเจือจาง) จะมีความต้านทานสูงกว่าชั้น p และชั้น p^+ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมที่ชั้น p มากที่สุด เป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาสู่ชั้น p จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้และวิ่งไปชนกับโครงร่างผลึกและทำให้ผลึกแตกตัวเกิดเป็นไอออน ซึ่งจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นสู่แถบนำไฟฟ้า และเกิดโฮลขึ้นใหม่ในแถบวาเลนซ์ และจะเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำ ๆ ตลอดเวลาที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้เกิดพาหะอิสระเป็นจำนวนมากมาย จึงทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 2.22 โครงสร้างของอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด

ข้อได้เปรียบของอะวาลานซ์โฟโต้ไดโอด คือ เป็นโฟโต้ไดโอดที่มีการตอบสนองสูง (High Sensitive Photodiode) และมีอัตราขยายสัญญาณ (Gain) ซึ่งมากกว่าพินโฟโต้ไดโอด 50-300 เท่า แต่มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่สูงมาก และสัญญาณเอาต์พุตมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุทและสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัสนอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจากมีอัตราขยายในโฟโตไดโอด

2.5.4 ซ็อดกีย์โฟโตไดโอด

ซ็อดกีย์โฟโตไดโอดสร้างขึ้นจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้น p จะถูกแทนด้วยฟิล์มโลหะที่บางมาก เช่น ทองคำหนาประมาณ 15 nm โครงสร้างของซ็อดกีย์โฟโตไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โครงสร้างของซ็อดกีย์โฟโตไดโอด

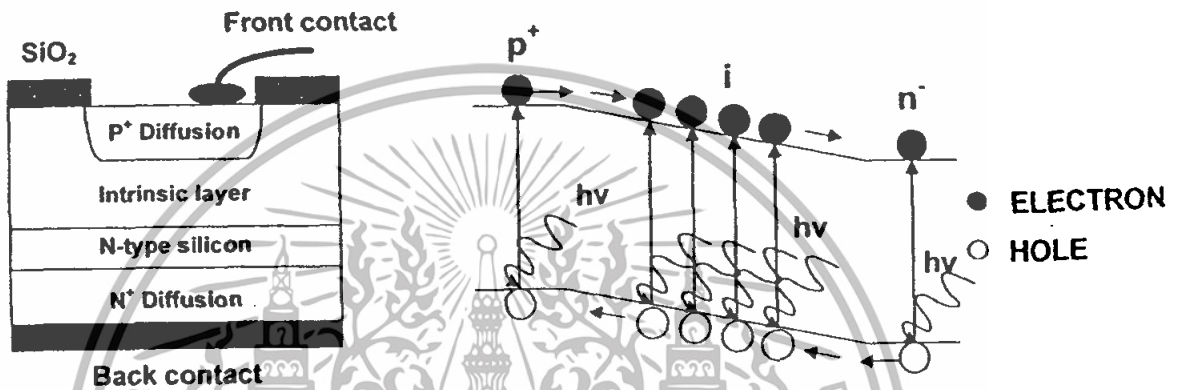
ชั้นฟิล์มโลหะบาง ๆ นี้ จะทำให้แสงสามารถผ่านทะลุชั้นโลหะไปได้ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นใต้ชั้นฟิล์มโลหะ โฟตอนที่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะบาง ๆ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ถ้าเปรียบเทียบกับพินโฟโตไดโอดแล้ว ซ็อดกีย์โฟโตไดโอดจะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้โครงสร้างซ็อดกีย์โฟโตไดโอดยังมีค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูงกว่า สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ได้ดี

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพควอนตัมต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้อีก ทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว ซึ่งทำหน้าที่เป็นดักจับอิเล็กตรอนและดักจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5.5 พินโฟโต้ไดโอด

พินโฟโต้ไดโอด (PIN Photodiode) หรือโฟโต้ไดโอดที่มีรอยต่อชนิด PIN มีการพัฒนาขึ้นจาก P-N โฟโต้ไดโอด โดยภายในโครงสร้างมีการสร้างชั้น i ชั้น ตรงกลางระหว่างชั้น p^+ และชั้น n^+ ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์หรือมีการเจือด้วยสารเจือปริมาณน้อยมาก โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโต้ไดโอด แสดงรูปที่ 2.24



รูปที่ 2.24 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโต้ไดโอด

ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนหรือชั้น p^+ จะถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดที่บางมาก ๆ เพื่อให้โฟตอนในแสงทะลุผ่านไปถึงชั้น i และที่ชั้น i นี้ มีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ เนื่องจากชั้น i มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน p^+ และด้าน n^+ เป็นผลให้เมื่อพินโฟโต้ไดโอดได้รับแรงดันไบอัสจะทำให้เกิดปฏิกิริยาแพร่เข้าไปในส่วนของชั้น i และเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมที่ส่วน i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i

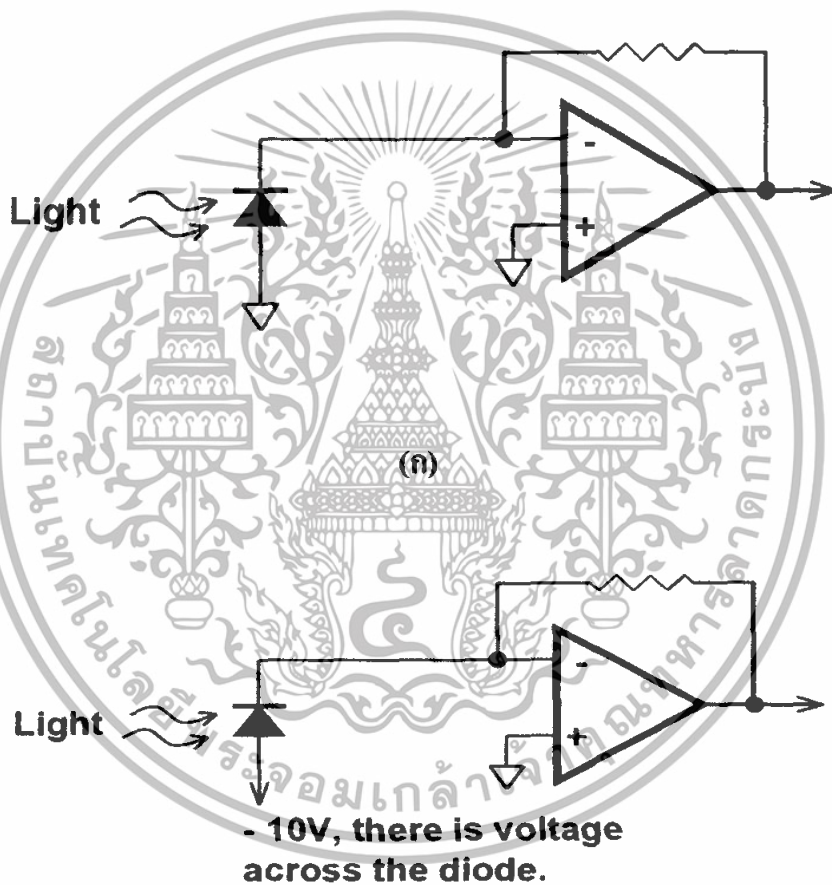
พินโฟโต้ไดโอดมีความเร็วในการทำงานสูงกว่า พี-เอ็น โฟโต้ไดโอด เนื่องจากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการการทำงานที่รวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสง เป็นต้น นอกจากนี้จะมีผลการตอบสนองด้านเวลารวดเร็วแล้ว พินโฟโต้ไดโอดยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่า พี-เอ็น โฟโต้ไดโอด เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสง (i) ที่กว้างกว่า บริเวณปฏิกิริยาที่เกิดจากรอยต่อ พี-เอ็น แต่ข้อด้อยของพินโฟโต้ไดโอดก็คือ ถ้าสร้างให้มีพื้นที่ใหญ่จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง และกระบวนการสร้างของพินโฟโต้ไดโอดมีความยุ่งยากเนื่องจากต้องสร้างชั้น i ให้มีความบริสุทธิ์ และต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 โหมดการไบอัสของโฟโต้ไดโอด

เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ

1. โหมดโฟโต้โวลตาอิก โดยในโหมดนี้จะไม่มีการป้อนแรงดันไบอัสที่ตัวโฟโต้ไดโอดในขณะที่ต่อกับวงจรขยาย ดังรูปที่ 2.25 (ก)
2. โหมดโฟโต้คอนดัคทีฟ โดยในโหมดนี้จะมีการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าหนึ่งทีโฟโต้ไดโอดในขณะที่ต่อกับวงจรขยาย ดังรูปที่ 2.25 (ข)



(ข)

รูปที่ 2.25 โหมดการไบอัสของโฟโต้ไดโอด

(ก) โหมดแบบโฟโต้โวลตาอิก

(ข) โหมดแบบโฟโต้คอนดัคทีฟ

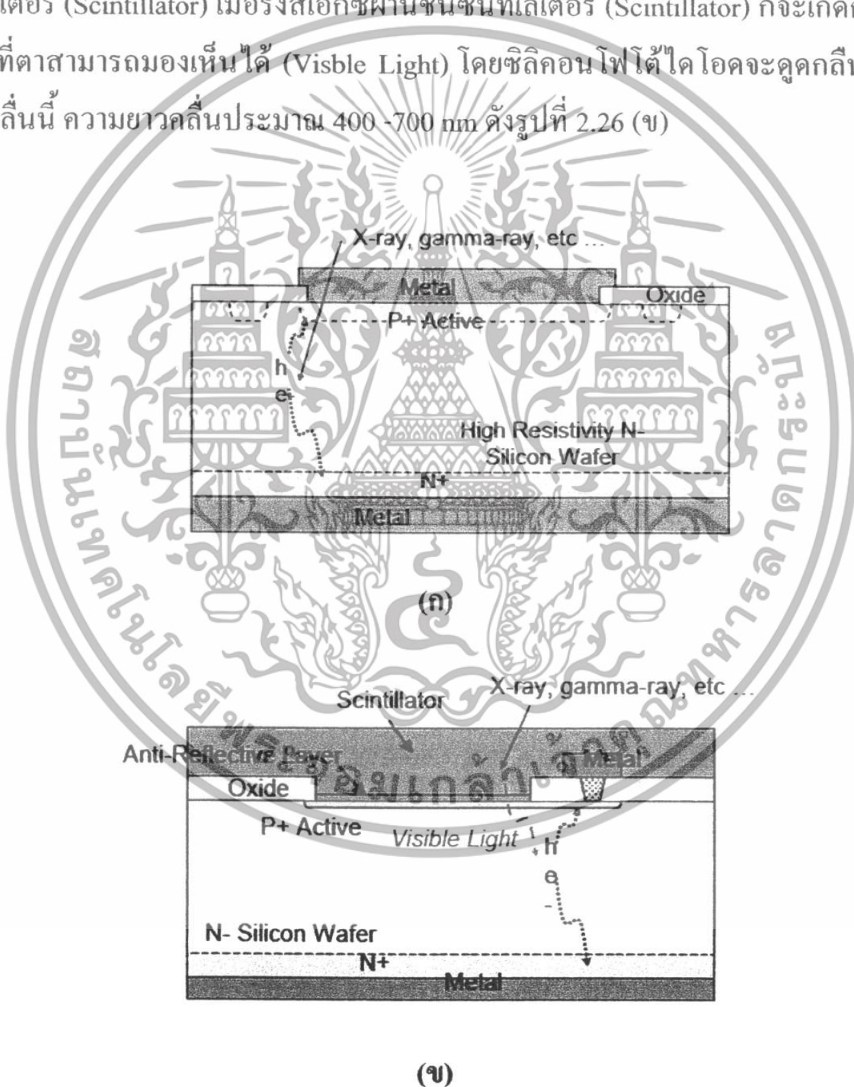
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.7 ชนิดของการฉายรังสีเอ็กซ์

เราสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ

1. การฉายแบบโดยตรง (Direct Exposure) โดยการฉายแบบโดยตรงนั้นจะฉายรังสีเอ็กซ์ไปโดยตรงไปที่ตัวโฟโตไดโอดเลยแต่ตัวโฟโตไดโอดจะดูดกลืนได้ไม่ค่อยดีเพราะรังสีเอ็กซ์มีความถี่ที่สูง จึงมีพลังงานมาก ดังรูปที่ 2.26 (ก)

2. การฉายแบบโดยอ้อม (Indirect Exposure) โดยการฉายแบบโดยอ้อมจะยิงผ่านชั้นซินทิเลเตอร์ (Scintillator) เมื่อรังสีเอ็กซ์ผ่านชั้นซินทิเลเตอร์ (Scintillator) ก็จะเกิดการเรืองแสงขึ้นในช่วงที่ตาสามารถมองเห็นได้ (Visible Light) โดยซิลิกอนโฟโตไดโอดจะดูดกลืนได้ดีในช่วงความยาวคลื่นนี้ ความยาวคลื่นประมาณ 400 -700 nm ดังรูปที่ 2.26 (ข)



รูปที่ 2.26 ชนิดของการฉายรังสีเอ็กซ์

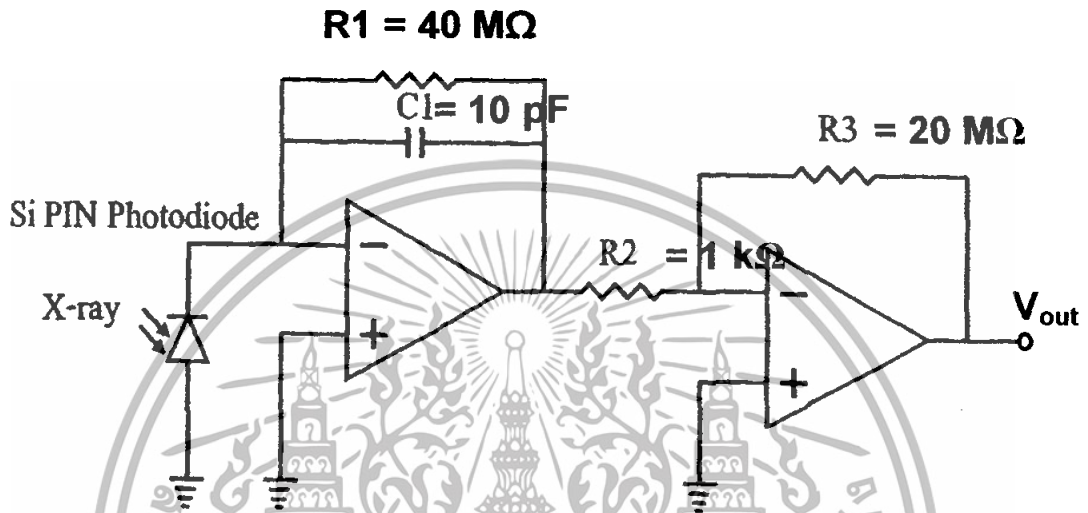
(ก) การฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรง

(ข) การฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 วงจรขยายที่ใช้วัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

ในการทดสอบคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอด ไดโอดจะถูกนำไปต่อเข้ากับวงจรรขยายสัญญาณ ในลักษณะโหมดโฟโตโวลตาอิก ดังแสดงในรูปที่ 2.27



รูปที่ 2.27 การต่อซิลิคอนโฟโตไดโอดเข้ากับวงจรรขยายสัญญาณแบบ Photovoltaic Mode เพื่อวัดคุณสมบัติการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

วงจรรขยายภาคแรกทำหน้าที่เปลี่ยนกระแสที่ได้จากโฟโตไดโอดเป็นแรงดันไฟฟ้า (Transimpedance amplifier) โดยมีอัตราขยาย 40 mV/nA ซึ่ง $R1 = 40 \text{ M}\Omega$ และ $C1 = 10 \text{ pF}$ วงจรรขยายภาคที่สองเป็นวงจรรขยายแรงดัน (Voltage amplifier) โดยมีอัตราขยาย 20000 เท่าโดยที่ $R2 = 1 \text{ k}\Omega$ และ $R3 = 20 \text{ M}\Omega$ ตามลำดับ วงจรรขยายใช้ออปแอมป์เบอร์ LF 442 ซึ่งมีกระแสอินพุต แรงดันออฟเซต และใช้พลังงานต่ำมาก

บทที่ 3

กระบวนการออกแบบและการสร้างโฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

ในการสร้างซิลิคอนโฟโต้ไดโอดแบบ PIN แบบแนวตั้ง เพื่อการศึกษาคุณสมบัติต่าง ๆ การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบโครงสร้างและกระบวนการสร้าง โดยการออกแบบจะกล่าวถึงการออกแบบกระจกต้นแบบเพื่อใช้ในการสร้าง และรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโต้ไดโอดแบบ PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

3.1 การสร้างกระจกต้นแบบ

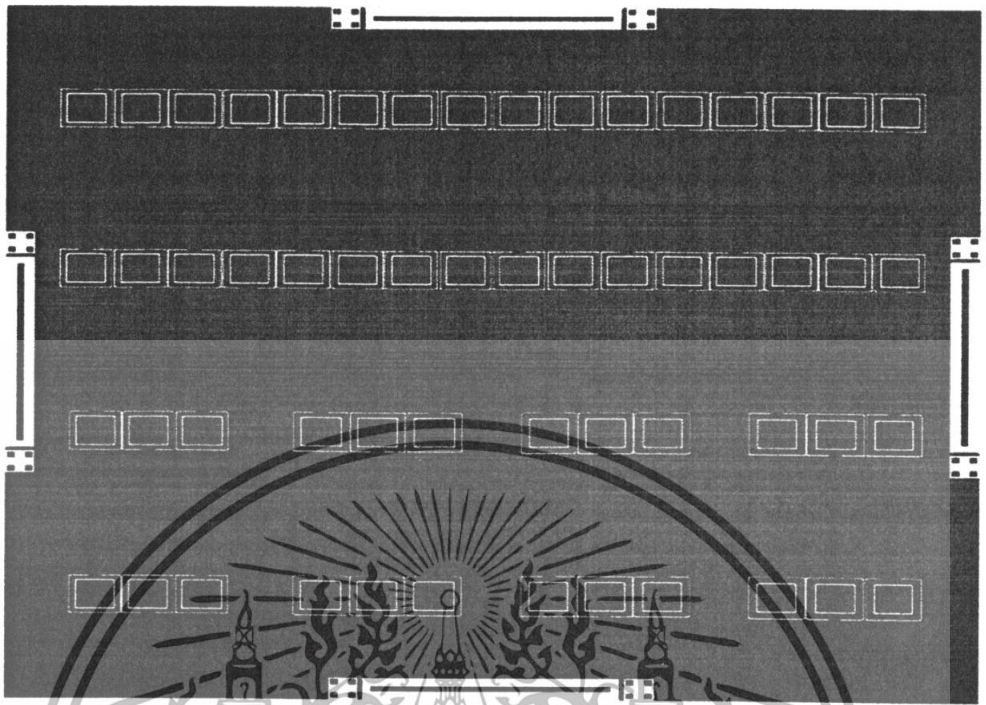
ทำการออกแบบ โครงสร้างของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดและทำการถ่ายลงฟิล์มแล้วนำมาติดบนกระจกโฟโตมาส์ กระจกต้นแบบทั้งหมดมี 3 มาส์คือ

- มาส์ที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ
- มาส์ที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ
- มาส์ที่ 3 สร้างลวดลายอลูมิเนียม

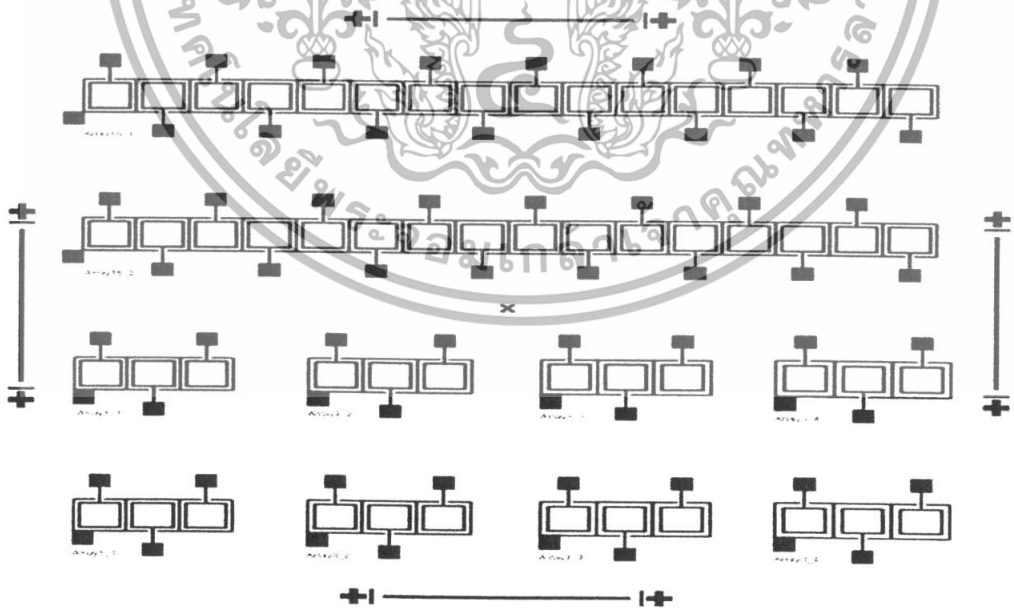


รูปที่ 3.1 ลักษณะมาส์ที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ลักษณะ มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำทั่วโลก



รูปที่ 3.3 ลักษณะ มาส์กที่ 3 สร้างลดตายอดูมินิยม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขอบเขตในการออกแบบและสร้างของโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

การออกแบบที่ 1 เป็นการออกแบบเพื่อทดลองผลของโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาวกับแสงปกติ โดยกำหนดให้โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว 16 ตัว มีพื้นที่รับแสง 1 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสง 200 ไมโครเมตร

การออกแบบที่ 2 เป็นการออกแบบเพื่อทดลองผลของโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาวกับรังสีเอ็กซ์ โดยกำหนดให้โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว 16 ตัว มีพื้นที่รับแสง 1 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสง 200 ไมโครเมตร

3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

ปัจจุบันโฟโตไดโอดชนิด PIN ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ที่ต้องการความรวดเร็วในการทำงานสูง ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีและมีราคาถูก เราจึงนำซิลิคอนมาเป็นวัสดุในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด PIN โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์รับแสง เมื่อถูกแสงจะทำให้เกิดกระแสไหลหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสที่ไหล ซึ่งจะใช้เป็นตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแสงหรือโฟโตเซนเซอร์ (Photo Sensor) และใช้เป็นตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ (X-Ray Detector)

3.2.1 แผ่นผลึกที่ใช้สร้างโฟโตไดโอดชนิด PIN

การสร้างโฟโตไดโอด และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทต่างๆ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแผ่นผลึกโดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ดังนี้ จะต้องเป็นแผ่นผลึกรูปเดี่ยว ชนิดของสารเจือในแผ่นผลึก ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ความหนาของแผ่นผลึก และระนาบของแผ่นผลึก

3.2.1.1 ระนาบของผลึก (Orientation)

ผลึกซิลิคอนที่มีระนาบ (100) และ (111) ถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมากที่สุด เนื่องจากมีความเหมาะสมหลายประการ ในการสร้างโฟโตไดโอด จะใช้แผ่นผลึกที่มีระนาบ (111) เป็นหลัก เพราะมีความหนาแน่นอะตอมที่ผิวสูงที่สุด ดังนั้นในการปลูกผลึกระนาบ (111) จะทำได้ง่ายกว่าระนาบอื่น และระนาบ (111) นี้จะมีปฏิกิริยาต่อสารเคมีที่ใช้ในการ Etching น้อยที่สุด นอกจากนี้ระนาบ (111) ยังมีคุณสมบัติแมคคานิกส์ที่ดีคือ มีความทนแรงดึง (Tensile Strength) ของ SiO_2 ได้สูงถึง 0.35×10^{10} dyne/cm² และแผ่นผลึกระนาบ (111) จะเกิดชั้น SiO_2 ได้เร็วกว่าระนาบ (100) เนื่องจากมีจำนวนอะตอมที่ผิวสูงกว่าคุณสมบัติทางไฟฟ้าคือ ค่าความคล่องตัวของพาหะ (mobility carrier) ของระนาบ (111) จะสูงกว่าระนาบ (100) และระนาบ (111) จะมีราคาที่ถูกกว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.1.2 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

โดยเริ่มต้นการเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิด i ระบาย (111) ความหนาของแผ่นซิลิคอนประมาณ 275 ไมครอน และมีสภาพความต้านทาน 2,000 โอห์ม-เซนติเมตร การตัดแบ่งแผ่นซิลิคอน จะใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษที่เรียกว่า Diamond-edged saw การลดความคมของแผ่นซิลิคอน โดยการใช้ผงขัดของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีหลายเบอร์หลายขนาดดังนี้

600 เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน

1000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 ไมครอน

2000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.9 ไมครอน

4000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ไมครอน

สุดท้ายใช้ผงอลูมินา (Al_2O_3) ขัดเพื่อให้เป็นเงาคล้ายกระจก โดยผงอลูมินามีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน

3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน

การทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- การทำความสะอาดครั้งแรก เพื่อดำรงสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนแผ่นซิลิคอน
- การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอน และกำจัดไขมัน และสิ่งแปลกปลอม

3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน (oxidation)

ซิลิคอน ไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะ โปร่งแสง ใช้เป็น Field Oxide ใช้เป็น มาส์ก ในกระบวนการ Lithography ใช้เป็น มาส์ก ในกระบวนการแพร่สารเจือ โดยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้า เพื่อปกป้องผิวหน้าของ Si และ Thermal Oxidation คือ การก่อตัวของ SiO_2 บนพื้นผิว Si โดยที่ Si อยู่ในบรรยากาศของ O_2 หรือ H_2O ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งระบบของการออกซิเดชันด้วยความร้อนมีอุปกรณ์ในระบบส่วนใหญ่โดยหลักคือ

1. Oxidation Furnace
2. Boat
3. Quartz Tube ซึ่งส่วนปลายจะต่อกับระบบก๊าซ
4. ตัววัดอุณหภูมิ Pt / Pt-Rh

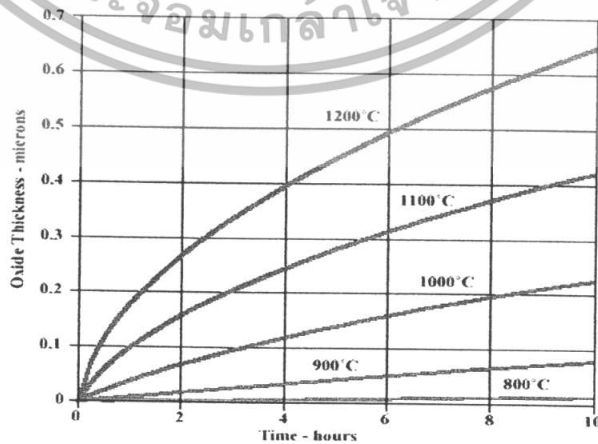
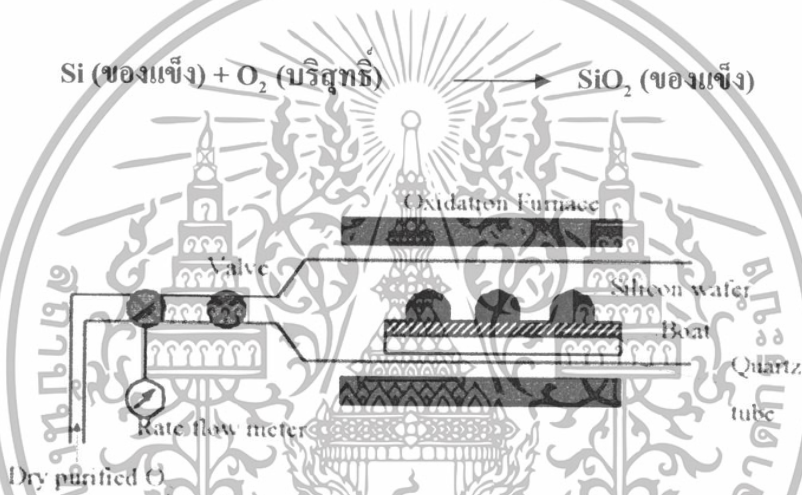
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ระบบควบคุมอุณหภูมิ ความดัน

เตาสำหรับ Oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกันและการสร้างชั้น (SiO_2) ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation Process)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของฟลักซิลิคอนและอะตอมของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1100°C ทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งมีสมการเคมีดังนี้



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Dry)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

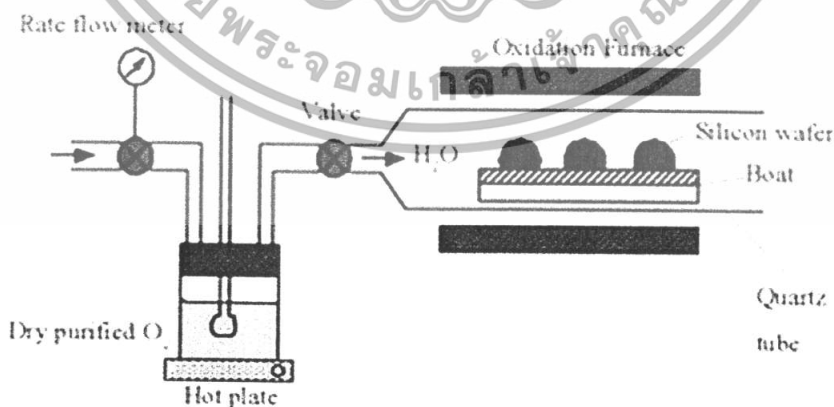
จากกราฟดังกล่าวนี้ ทำให้เราสามารถควบคุมความหนาของชั้น SiO_2 ได้โดยการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา และเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน นอกจากนี้แล้วปริมาณของก๊าซออกซิเจนจะต้องมีมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับซิลิคอน ลักษณะพื้นผิวของออกไซด์ที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่าแบบ Wet Oxidation แต่ปฏิกิริยาการเกิดช้า และอัตราการเกิดต่ำกว่า

2. กระบวนการออกซิเดชันแบบไอน้ำอิ่มตัว (Wet Oxidation Process)

เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งมีปฏิกิริยาทางเคมีแสดงได้โดยสมการ

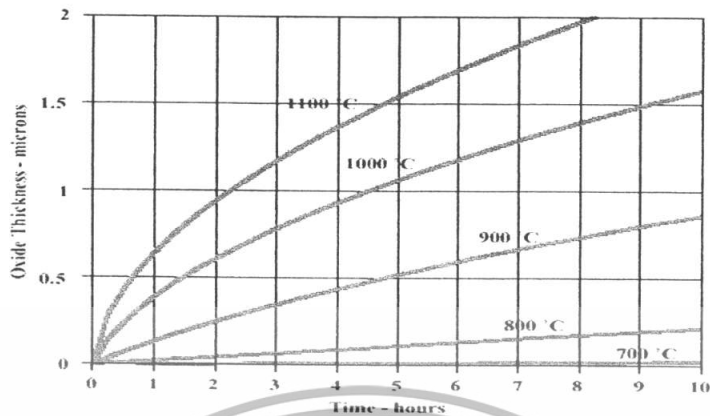


การออกซิเดชันแบบไอน้ำอิ่มตัวนี้ จะกล่าวเฉพาะเทคนิคที่ใช้ระบบไอน้ำคือ ระบบไอน้ำ (Steam System) เป็นวิธีการปล่อยก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้ว (bubbler) ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนแต่มีค่าต่ำกว่าจุดเดือดราว $90-95^\circ\text{C}$ ที่ก๊าซออกซิเจนจะถูกจุ่มลงในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งร้อน ทำให้เกิดฟองอากาศผุดขึ้น ซึ่งฟองอากาศที่ผุดขึ้นมานี้ก็คือ ก๊าซออกซิเจนซึ่งอิ่มตัว (มีไอน้ำด้วย) และจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในช่องควอทซ์ ระยะห่างระหว่างทางออกของก๊าซในขวดแก้วและท่อควอทซ์ของเตาออกซิเดชันที่ไม่ควรอยู่ใกล้กัน เพราะอาจจะเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำได้ ซึ่งควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้



รูปที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไอน้ำอิ่มตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่าง ๆ (Wet)

การเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้เร็วกว่าแบบ Dry Oxidation ทั้งนี้เนื่องจาก โมเลกุลของน้ำเล็กกว่า โมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับ ione น้ำ ได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation ก็คือคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ไม่ดี จึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือปนน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์คือ เกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) เกิดมีรูพรุนขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ

3.2.4 การเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)

ภายหลังจากผ่านขบวนการออกซิเดชันจะเกิดชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์เคลือบผิวซิลิคอนทั้งหมดเพื่อป้องกันไม่ให้อะตอมสารใดเข้าไปถึงซิลิคอนได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเปิดช่องออกไซด์นี้ออก เพื่อแพร่สารเจือเรียกขบวนการนี้ว่า Photolithography หรือ Photo-Etching

ขบวนการ Photolithography เป็นขั้นตอนการถ่ายแบบจากมาสก์ไปยังผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน โดยจะต้องเคลือบผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยน้ำยาที่ไวต่อแสง (Photo - Resist) โดยใช้เครื่องมือที่เรียกว่า สปินเนอร์ (Spinner) โดยสารที่ไวต่อแสงนี้ แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ

1. สารไวแสงแบบลบ (Negative Photo Resist) จะใช้ Way Coat สารไวต่อแสงชนิดนี้ เมื่อถูกแสงจะเกาะติดกับผิวของแผ่นผลึกแน่น ไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (Developer)
2. สารไวแสงแบบบวก (Positive Photo Resist) จะใช้ AZ และมีคุณสมบัติตรงข้ามกับแบบที่ 1 กล่าวคือ เมื่อถูกแสงจะมีคุณสมบัติละลายความเหนียว และหลุดออกจากผิวแผ่นผลึกได้โดยง่าย เมื่อดำน้ำยา Developer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การฉายแสง (Exposure)

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

Negative resist ไวต่อสเปกตรัม 405 nm

Positive resist ไวต่อสเปกตรัม 365 nm

3.2.6 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การเติมสารเจือลงในแผ่นผลึกซิลิกอน สามารถกระทำได้โดยการแพร่ (Diffusion) ปกติการแพร่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำซึ่งเป็นการแพร่ภายในของแข็ง (Solid State Diffusion) จะเกิดขึ้นในสภาวะอุณหภูมิสูงๆ (900 - 1200° C) จะถูกกำหนดได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusivity ;D) ตามสมการที่ 3.2

$$D = \frac{\mu kT}{q} \quad \text{Cm}^2/\text{sec} \quad (3.2)$$

โดยที่ q คือ ประจุอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.6×10^{-19} คูลอมบ์

k คือ ค่าคงที่ของ โบล์ตซ์มันน์มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/°K

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (°K)

μ คือ ค่าความคล่องตัวของอนุภาค

3.2.6.1 กลไกของการแพร่ (Diffusion mechanism)

1. การแพร่เข้าไปแทนที่ (Substitutional Diffusion)

การแพร่แบบนี้เป็นการแทนที่อะตอมของซิลิกอนและเมื่อการแพร่ยังดำเนินต่อไปนั้น อะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอนซึ่งอยู่ใกล้และว่างอยู่ดังรูป การแพร่ดังกล่าวนี้จะเกิดในกรณีของการแพร่อะตอมสารเจือ เช่น โบรอน ฟอสฟอรัส และสารหนู

2. การแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial Diffusion)

การแพร่แบบนี้มักเกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการแพร่ของไอออนโลหะของธาตุที่หนัก เช่น ทองคำ นิเกิล เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอะตอมของสารเจือมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของสารตั้งตัวนำ อะตอมสารเจือนี้สามารถที่จะเคลื่อนที่ต่อไปได้เมื่อได้รับพลังงานมากกว่ากำแพงศักย์ของแลตทิซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.6.2 เทคนิคการแพร่สารเจือ

สำหรับเทคนิคการแพร่สารเจือกระทำสองขั้นตอน ทั้งนี้ก็เพื่ออำนวยความสะดวกควบคุมและแก้ไขให้การกระจายของสารเจือเป็นไปตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพโดยที่

ขั้นที่ 1 เรียกว่า กระบวนการ Pre-Deposition กระทำโดยการแพร่สารเจือในเงื่อนไขที่ว่ปริมาณจำนวนอะตอมของสารเจือที่ผิวมีค่าคงที่ตลอดไปไม่จำกัด การแพร่ขั้นนี้ทำให้ช่วงเวลาสั้นๆ และอุณหภูมิไม่สูงนัก (ราว 1000°C)

ขั้นที่ 2 เรียกว่า กระบวนการ Drive In ในขั้นนี้จำนวนอะตอมสารเจือที่ผิวจะถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด (คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน เนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1) การแพร่ขั้นนี้ทำที่อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรก คือ (1200°C) และสามารถควบคุมการกระจายและความลึกในการแพร่ของสารโดยควบคุมเวลาในการแพร่ นอกจากนี้ขณะที่ทำการแพร่ก็จะทำการออกซิเดชันไปพร้อมๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดชั้นของออกไซด์เคลือบที่ผิวบนสุดของแผ่นผลึก ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือแพร่ออกมาจากแผ่นผลึก (Out Diffusion)

3.2.7 กระบวนการเมทัลไลเซชัน

เมื่อสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จนได้ชิ้นส่วนต่างๆ ครบแล้ว แต่ส่วนต่างๆ เหล่านี้ยังแยกกันอยู่ทางไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องต่อส่วนต่างๆ เหล่านี้เข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ จึงจะได้อุปกรณ์ที่สมบูรณ์ โดยการสร้างรอยต่อสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contact) เงื่อนไขการเลือกใช้สารโลหะในกระบวนการเมทัลไลเซชัน

- รอยต่อสัมผัสกับผิวซิลิคอนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ
- มีค่าความนำไฟฟ้าสูง
- ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิคอนไดออกไซด์
- ภาพแบบแผนจะต้องทำให้มีความคมชัด
- สามารถต่อเข้ากับลวดลายความนำภายนอกได้ดี

3.2.8 กระบวนการซินเทอริง (Sintering)

เพื่อสร้างรอยสัมผัส โอห์มมิกระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอน และทำให้เกิดส่วนอัลลอยระหว่างอลูมิเนียม และซิลิคอนขึ้นในขณะเดียวกัน โดยให้นำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในเตาแพร่สารในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ซีซี / นาที เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 500°C

3.2.9 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

1. การเตรียมแผ่นซิลิกอน และ การตรวจสอบคุณสมบัติ

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

2. ทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน

- Ultrasonic ในน้ำ DI (น้ำบริสุทธิ์) 2 นาที (เพื่อกำจัดฝุ่นละออง)
- ล้างในน้ำ DI เป่าแห้งด้วยก๊าซ (N_2)
- ดมใน $\text{HNO}_3 \cong 10$ นาที (เพื่อกำจัดโลหะหนัก เช่น เศษ Si)
- ล้างในน้ำ DI
- ดมน้ำ DI (I) 5 นาที
- ดมน้ำ DI (II) 5 นาที
- ล้าง ในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

3. ทำความสะอาดผิวด้านหน้า

- ดมใน Trichol 5 นาที (กำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน)
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

4. Slice etching (เพื่อกำจัด SiO_2 ที่อยู่บนผิว Si ก่อนการ Oxidation)

- ล้างใน HF 5% 10 นาที
- ดมน้ำ DI (I)
- ดมน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

5. Oxidation อุณหภูมิเตา 1050°C , อุณหภูมิน้ำ 90°C

- Dry ด้วย O_2 1200 cc / min 1 ชั่วโมง
- Wet ด้วย O_2 1000 cc / min 2 ชั่วโมง
- Dry ด้วย O_2 1200 cc / min 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

- อบแผ่นไต่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120 °C 30 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95 °C 30 นาที

7. การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching) (ด้านหลัง)

- จุ่มในสารละลาย Buffer
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N₂

8. ลอกฟิล์ม (ด้านหลัง)

- ต้มใน H₂SO₄ (I) 5 นาที
- ต้มใน H₂SO₄ (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI
- ต้มในน้ำ DI (I) 5 นาที
- ต้มในน้ำ DI (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย N₂

9. ทำความสะอาดผิวหน้า (ด้านหลัง)

- ต้มใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N₂

10. Slice etching (ด้านหลัง)

- จุ่มใน HF 5 % 11 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N₂

11. Pre - Deposition (ด้านหลัง) Phosphorus (สารเจือชนิด n)

- Pre - Dep 1000 °C ด้วย N₂ 1000 cc / min , 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

12. ลอกชั้น Phosphorus

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

13. ทำความสะอาดผิว (ด้านหลัง)

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

14. Drive - in (ด้านหลัง)

- Drive - in (Phosphorus) 1000 °C
- Dry O_2 1200 cc / min.

15. Photo Mask # 1 (diffusion) , (ด้านหน้า)

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120 °C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ด้วยการ (spin) 5000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90 °C 30 นาที (Prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟิล์มโดย
- AZ Developer (I) 30 วินาที
- AZ Developer (II) 30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ 120 °C 10 นาที (Post Bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ 90 °C 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

16. Oxide etching

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

17. ลอกฟิล์ม

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

18. ทำความสะอาดผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน

- ดมใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2

19. Slice etching

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

20. Pre - deposition (ด้านหน้า) ด้วย Boron (สารเจือชนิด p)

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

21. ลอกชั้น Pre - deposition , Boron

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

22. ทำความสะอาดผิว (ด้านหน้า)

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

23. Drive - in

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

24. Photo Mask # 2 (contact window)

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120 °C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ด้วยการ (spin) 5000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90 °C 30 นาที (Prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟลิ์ม โดย
 - AZ Developer (I) 30 นาที
 - AZ Developer (II) 30 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 85 °C 30 นาที

25. Oxide etching

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

26. ลอกฟิล์ม

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

27. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

28. Aluminum Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} มม.ปรอท (torr)

29. Photo Mask # 3 (contact mask)

- เคลือบนำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ด้วยการ (spin) 5000 rpm.
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $85^\circ C$ 20 นาที (Prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟิล์มโดย
- AZ Developer (I) 30 วินาที
- AZ Developer (II) 30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $85^\circ C$ 30 นาที

30. Al etching

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

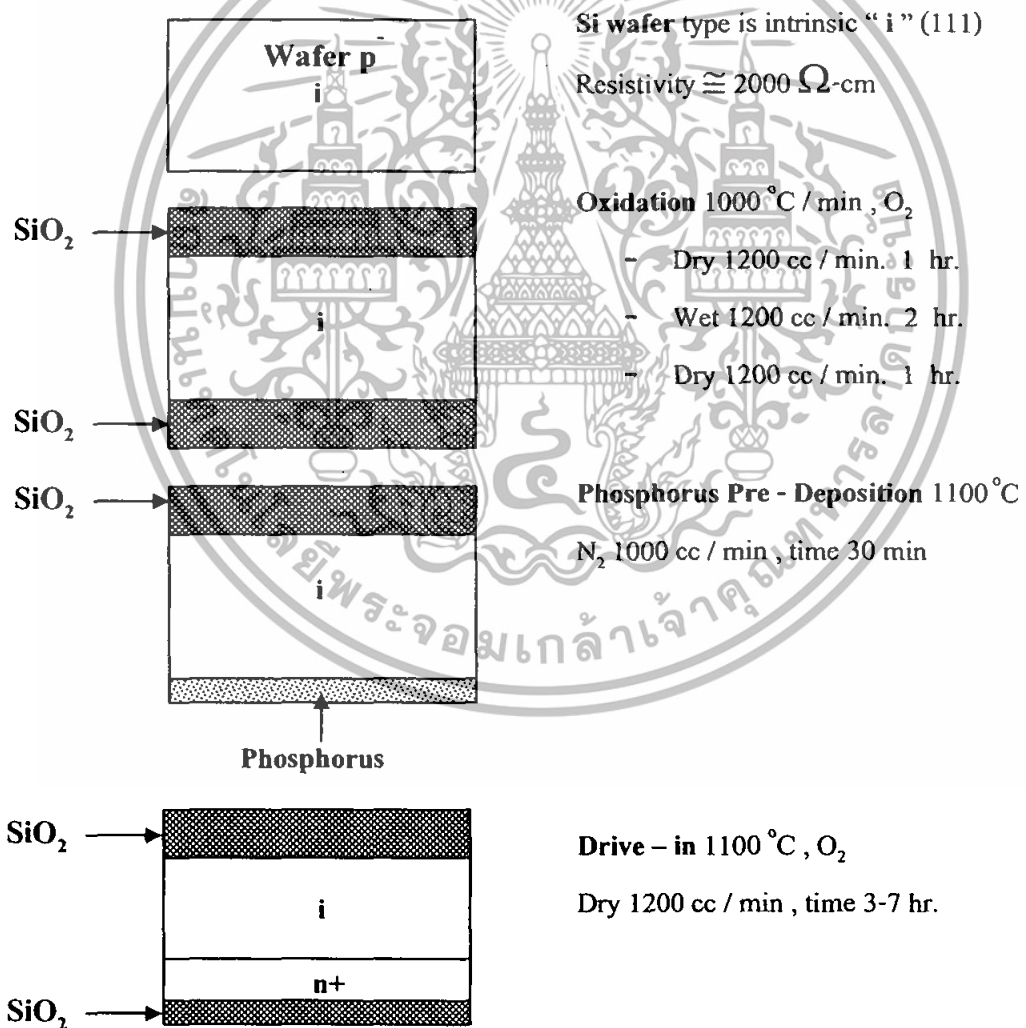
31. ลอกฟิล์ม

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

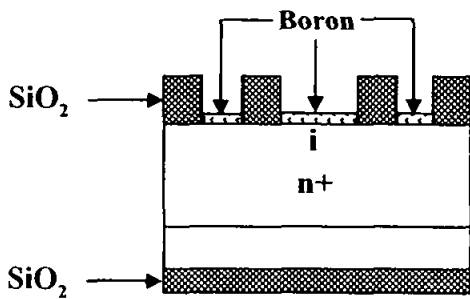
32. Sintering 500 °C

- Dry N_2 1000 cc / min 12 นาที

โดยลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง แสดงดังนี้



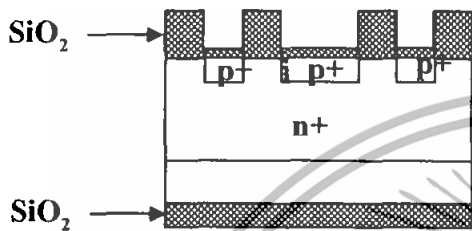
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Mask # 1 Boron diffusion

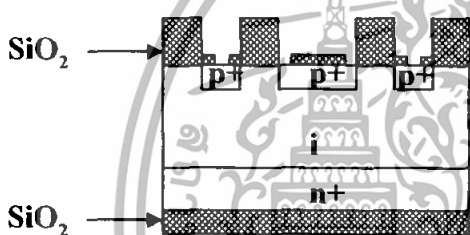
Boron Pre-Deposition 1100 °C

N₂ 1000 cc / min , time 30 min.



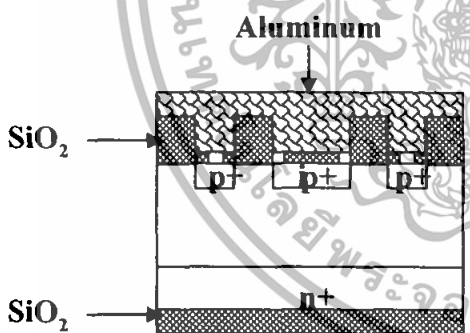
Drive – in 1100 °C , O₂

Dry 1200 cc / min , time 30-70 min.



Mask # 2 Contact window

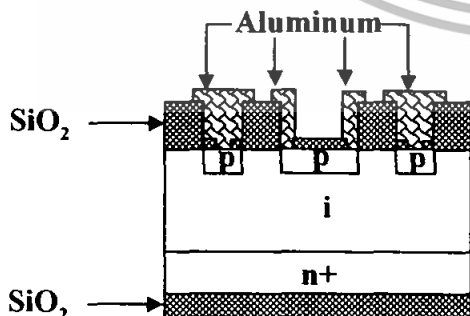
Oxidation – Etching



Metallization

Aluminum Evaporation

ที่ความดัน 2×10^{-6} มม.ของปรอท (torr)



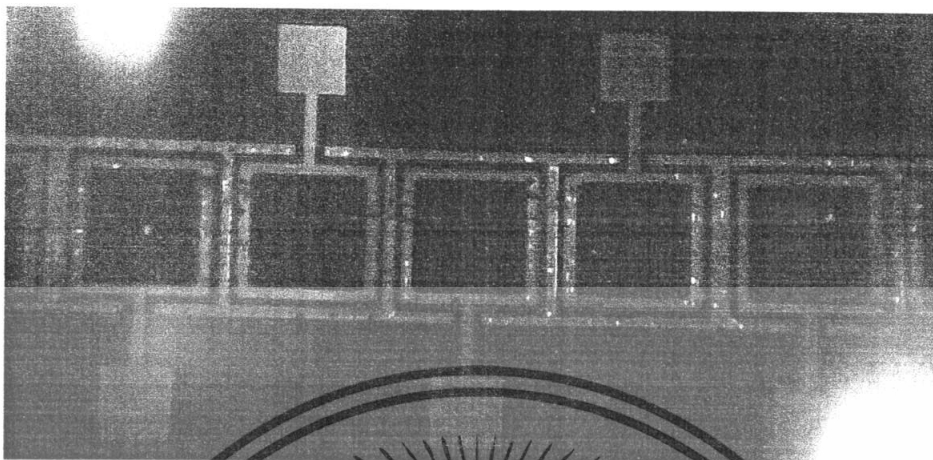
Mask # 3 Contact mask

Al – etching 40 °C , 10-20 sec.

Sintering 500 °C , N₂ 1000 cc / min. ,

Time 12 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ภาพถ่ายชิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว



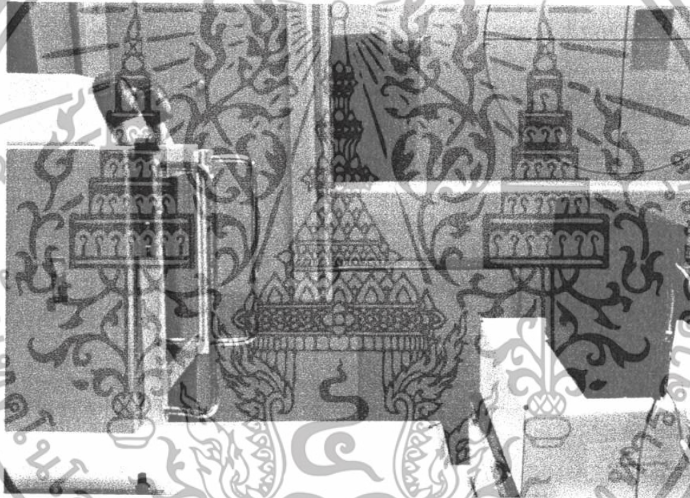
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การทดลองหาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีต่อรังสีเอ็กซ์

เพื่อศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ PIN จึงนำโฟโตไดโอดที่สร้างไปทำการวัดผลหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดที่มีต่อรังสีเอ็กซ์ โดยมีวงจรดังรูปที่ 4.1



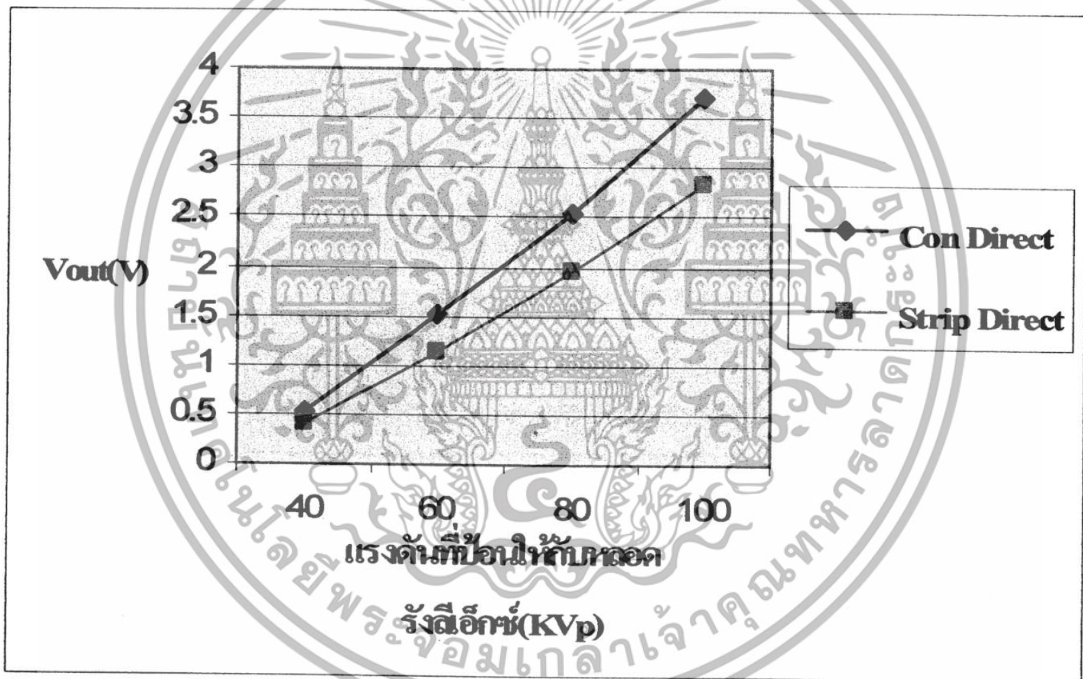
รูปที่ 4.1 การทดลองหาการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงระหว่าง PIN ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา และ โครงสร้างแบบ Stripe

เราจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงของ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ระหว่างโครงสร้างแบบธรรมดากับโครงสร้างแบบ Stripe โดยการป้อนแรงดัน 40 , 60 , 80 และ 100 KVp ให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่กระแส 50 mA

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ แรงดันที่ป้อนให้กับหลอดกำเนิด



รูปที่ 4.2 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe

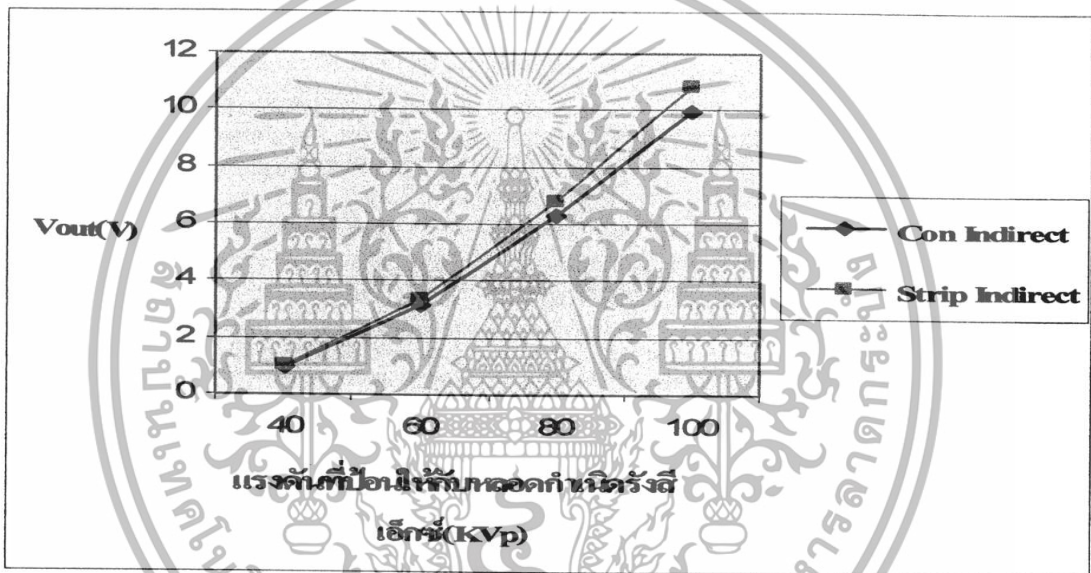
จากรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดาให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่ามากกว่าโครงสร้างแบบ Stripe และแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากทั้งสอง โครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมระหว่าง PIN ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา และโครงสร้างแบบ Stripe

เราจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมของ ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ระหว่างโครงสร้างแบบธรรมดากับโครงสร้างแบบ Stripe โดยการป้อนแรงดัน 40 , 60 ,80 และ 100 KVp ให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่กระแส 50 mA

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง Vout กับ แรงดันที่ป้อนให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์



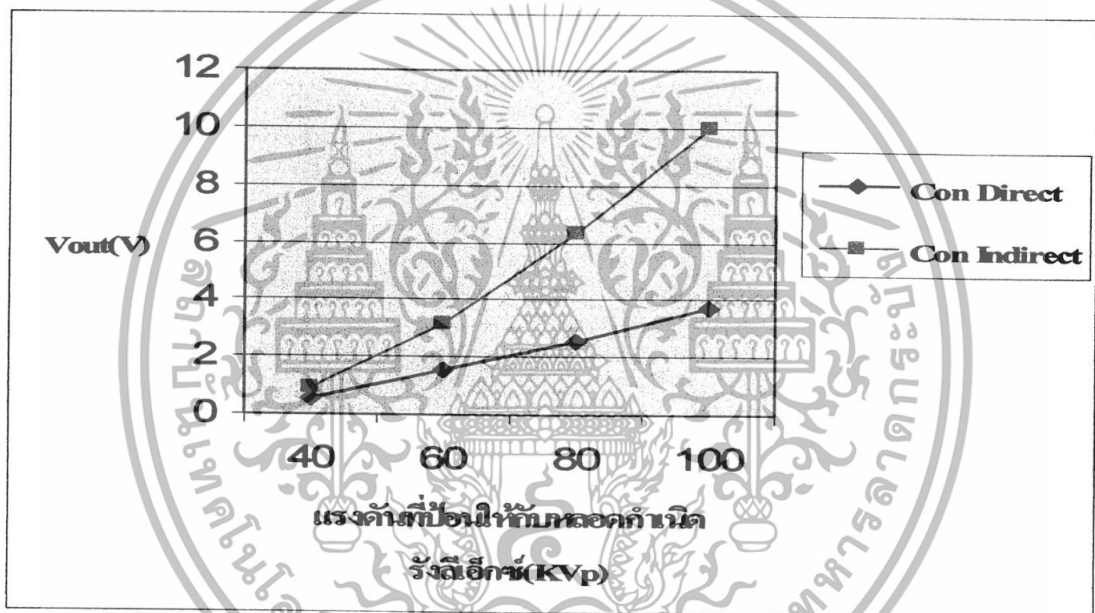
รูปที่ 4.3 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe

จากรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดาให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกันกับ โครงสร้างแบบ Stripe และแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากทั้งสอง โครงสร้างมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นกับความเข้มของรังสีเอ็กซ์

4.1.3 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงและการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา

เราจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงและการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา โดยการป้อนแรงดัน 40, 60, 80 และ 100 KVp ให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่กระแส 50 mA

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} กับ แรงดันที่ป้อนให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์



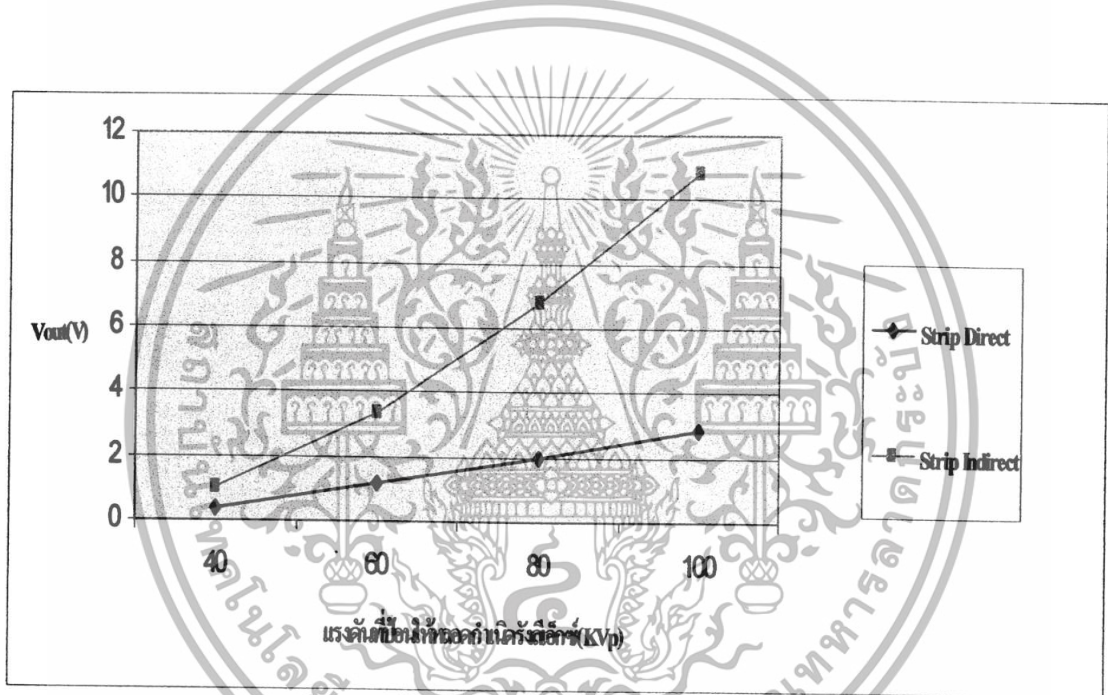
รูปที่ 4.4 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงและแบบโดยอ้อมที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีโครงสร้างแบบธรรมดาที่ฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีค่ามากกว่าการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรง

4.1.4 ศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยตรงและการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีโครงสร้างแบบ Stripe

เราจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมของซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีโครงสร้างแบบ Stripe โดยการป้อนแรงดัน 40 ,60 ,80 และ 100 KVp ให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่กระแส 50 mA

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} กับแรงดันที่ป้อนให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์



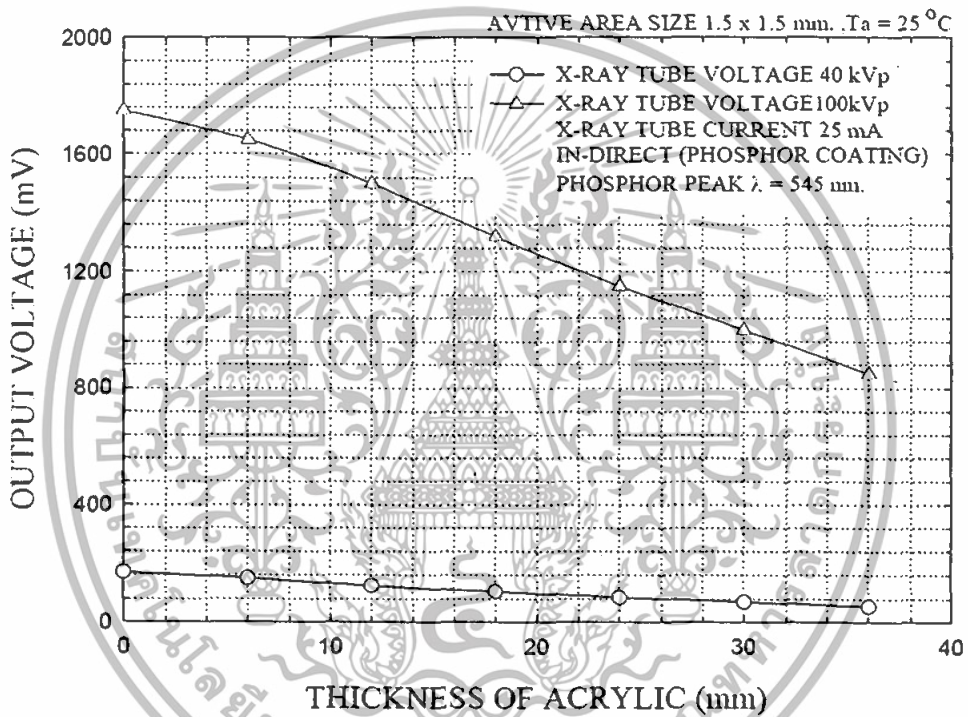
รูปที่ 4.5 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและแบบ โดยอ้อมที่มีต่อ โครงสร้างแบบ Stripe

จากรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอน โฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งที่มีโครงสร้างแบบ Stripe ที่ฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยอ้อมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตที่มีค่ามากกว่า การฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรง

4.1.5 ศึกษาผลของการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อค่าแรงดันเอาต์พุต (V_{out})

เราจะทำการเปรียบเทียบค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา โดยการป้อนแรงดัน 40 KVp และ 100 KVp ให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ ที่กระแส 25 mA

กราฟความสัมพันธ์ V_{out} กับความหนาของแผ่นอะคริลิก



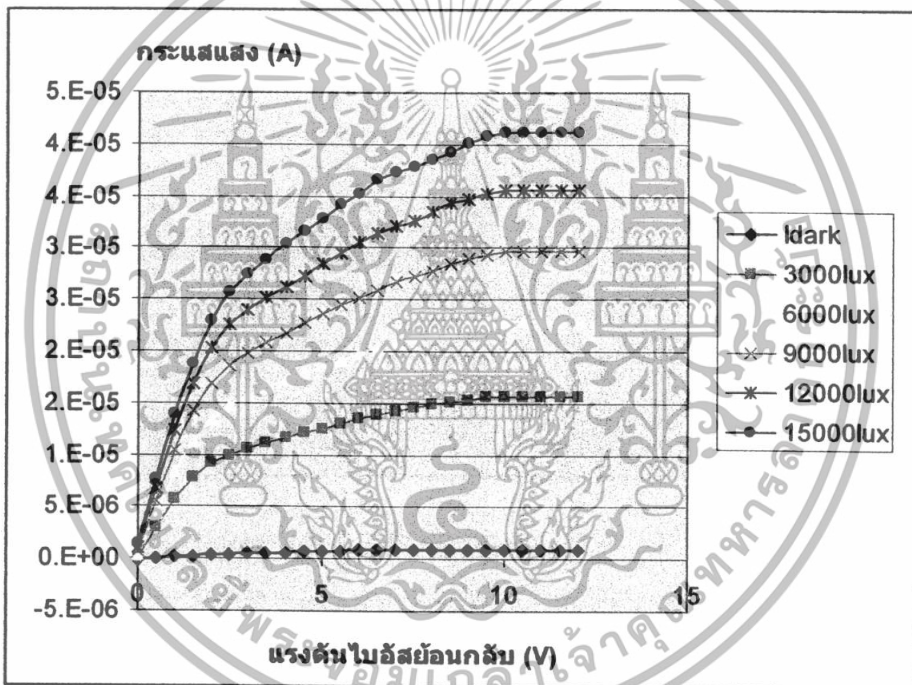
รูปที่ 4.6 ผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โดยตรงและแบบโดยอ้อมที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา ที่ฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นในขณะที่ความหนาของแผ่นอะคริลิกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่ 40 KVp และ 100 KVp ตามลำดับ

4.2 การทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติของกระแสแสงและความเข้มแสงธรรมชาติของ ซิลิคอนโฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

เราจะทำการเปรียบเทียบกระแสแสง(I_p)ของซิลิคอนโฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาวกับความเข้มแสงที่ค่า 3000 lux , 6000 lux , 9000 lux , 12000 lux และ 15000 lux ตามลำดับ

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความเข้มแสงปกติของโฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว



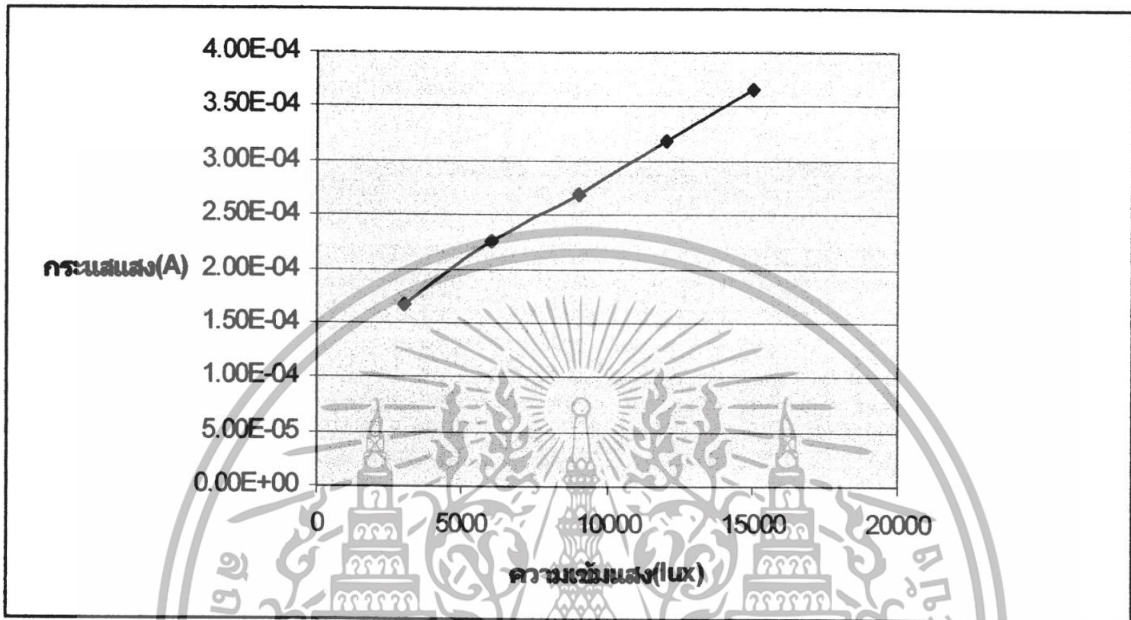
รูปที่ 4.7 ผลของกระแสแสงกับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ของซิลิคอนโฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

จากกราฟรูปที่ 4.7 จะเห็นว่าเมื่อความเข้มของแสงปกติมากขึ้น ค่าของกระแสแสงจากซิลิคอนโฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว ก็มีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย

เมื่อทำการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 10 V คงที่ แล้วนำค่าของกระแสแสงที่ได้จากซิลิคอนโฟโอดีไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว ที่ความเข้มแสง 3000 lux , 6000 lux , 9000 lux , 12000 lux และ 15000 lux ตามลำดับ มาทำการพล็อตกราฟใหม่จะได้กราฟดังรูปที่ 4.8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ



รูปที่ 4.8 ผลของกระแสแสงกับความเข้มแสงค่าต่าง ๆ ของซีลิกอน โฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

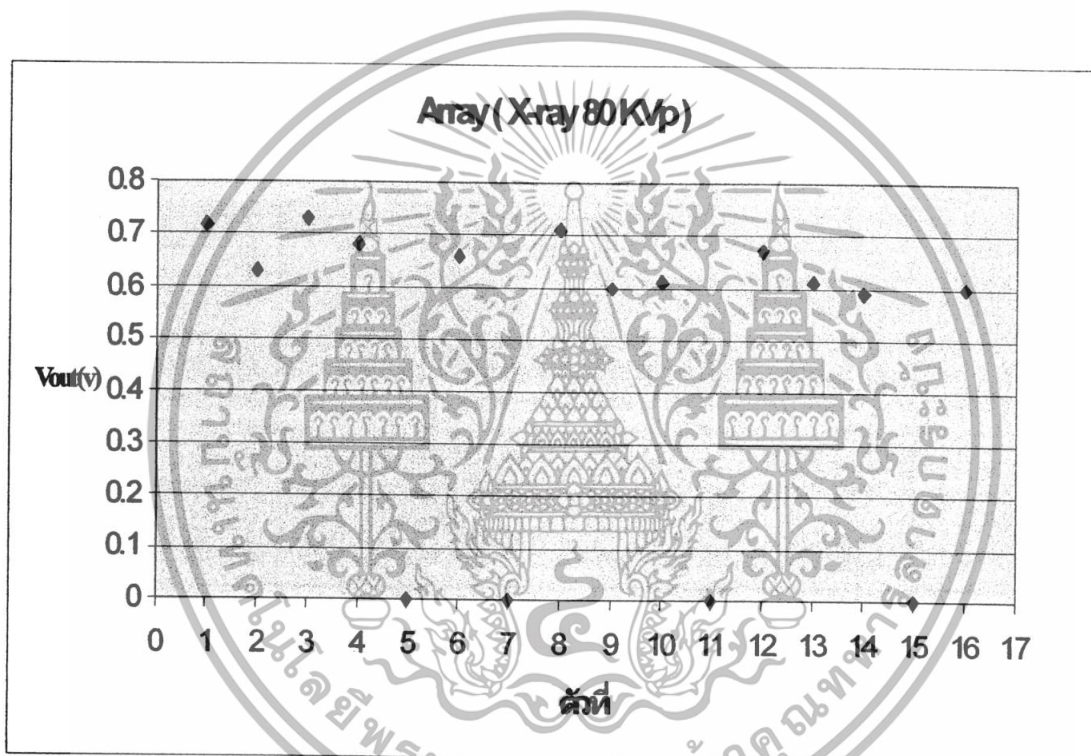
จากกราฟรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าค่าของกระแสแสง (I_p) ของซีลิกอน โฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว จะมีค่าเพิ่มมากขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มขึ้น ในขณะที่ทำการไบอัสแรงดันย้อนกลับค่าต่าง ๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การทดลองเพื่อศึกษาการกระจายของแรงดันเอาต์พุตของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

เราจะทำการศึกษาการกระจายของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว โดยป้อนแรงดันให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอกซ์ที่ 80 KVp และกระแส 50 mA

กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง V_{out} กับ Array ตัวที่ 1-16



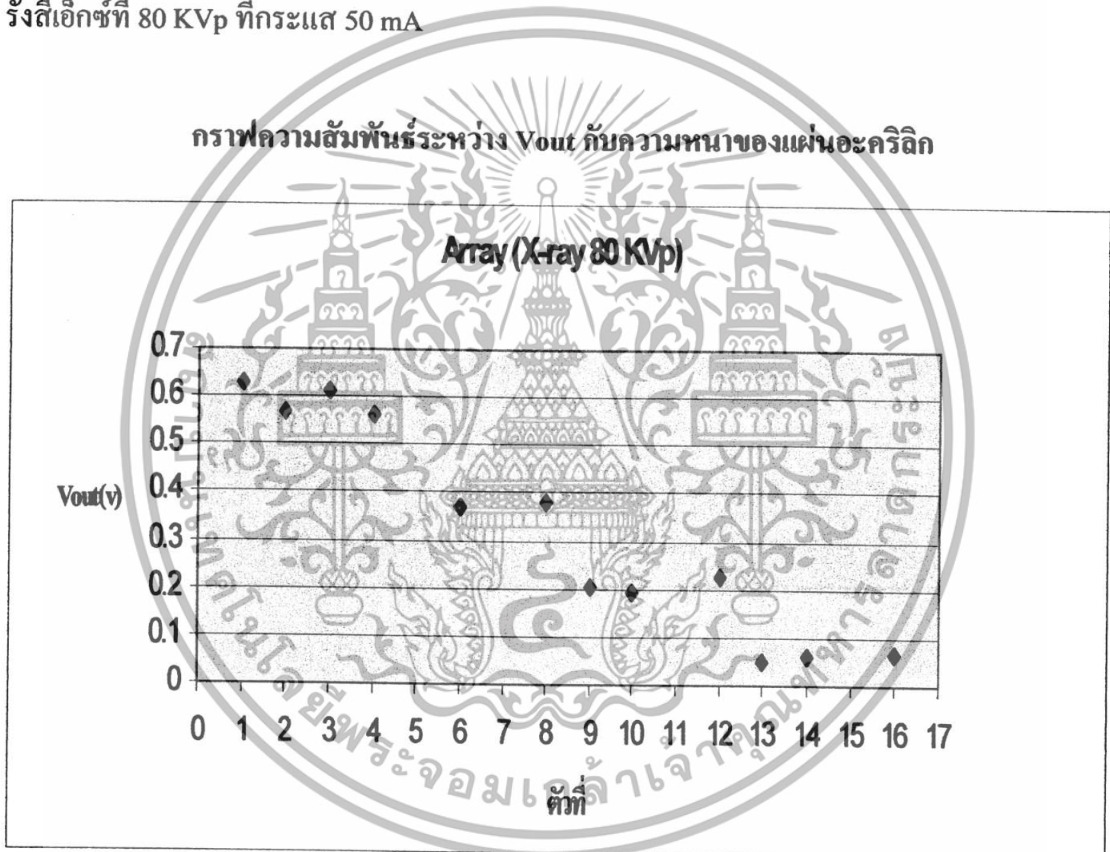
รูปที่ 4.9 ผลของการฉายรังสีเอกซ์แบบ โดยอ้อมที่มีต่อ โครงสร้างแบบธรรมดา Array

จากกราฟรูปที่ 4.9 จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้ มีการกระจายในลักษณะที่เกาะกลุ่มอยู่ในช่วง 0.6V – 0.7V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การทดลองหาคุณสมบัติของแรงดันเอาต์พุตและการตรวจับการลดทอนความเข้มรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาว

เราจะทำการเปรียบเทียบค่าของแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดแต่ละชุด โดยใช้แผ่นอะคริลิกเป็นตัวกั้นรังสีเอ็กซ์ โดยแบ่งไดโอดออกเป็น 4 ชุดดังนี้ ชุดที่ 1 ตัวที่ 1 – 4 ชุดที่ 2 ตัวที่ 5 – 8 ชุดที่ 3 ตัวที่ 9 – 12 และชุดที่ 4 ตัวที่ 13 – 16 ซึ่งให้ความหนาของแผ่นอะคริลิกแต่ละชุดมีค่าเท่ากับ 3 mm , 6 mm , 9 mm และ 12 mm ตามลำดับโดยการป้อนแรงดันให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่ 80 KVp ที่กระแส 50 mA



รูปที่ 4.10 ผลของความหนาของแผ่นอะคริลิกต่อแรงดันเอาต์พุตเมื่อฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคโยฮ้อม

จากกราฟรูปที่ 4.10 เมื่อเรานำค่าแรงดันเอาต์พุตของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแถวยาวในแต่ละชุดมาเฉลี่ย เพื่อหาความเป็นเชิงเส้น จะได้กราฟดังรูปที่ 4.11

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคูณสมบัติของซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบ แนวตั้ง ซึ่งในส่วนแรกเป็นการศึกษาคูณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างการฉายรังสีเอ็กซ์ที่มีลักษณะ การฉายอยู่ 2 แบบ คือ แบบ โคจรตรงและแบบ โคจรอ้อมและแรงดันเอาต์พุตของซิลิคอนโฟโต้ไดโอด ชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มีลักษณะ โครงสร้างเป็นแบบธรรมดาและแบบ Stripe

ในส่วนของการศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคจรตรงระหว่าง โครงสร้างแบบ ธรรมดากับ โครงสร้างแบบ Stripe ทำได้โดยการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคจรตรงให้กับซิลิคอนโฟโต้ ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งทั้ง โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe พบว่า ซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN ที่มี โครงสร้างแบบธรรมดาให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมากกว่า โครงสร้าง แบบ Stripe

ในส่วนของการศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคจรอ้อมระหว่าง โครงสร้างแบบ ธรรมดากับ โครงสร้างแบบ Stripe ทำได้โดยการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคจรอ้อมให้กับซิลิคอนโฟโต้ ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งทั้ง โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe พบว่า ซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN ที่มี โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe ให้ค่าแรงดัน เอาต์พุตมีค่าใกล้เคียงกัน

ในส่วนของการศึกษาผลของการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคจรตรงและแบบ โคจรอ้อมกับ โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe ทำได้โดยการฉายรังสีเอ็กซ์ทั้งแบบ โคจรตรงและ แบบ โคจรอ้อมให้กับซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งทั้ง โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe พบว่าการฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคจรอ้อมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมากกว่าการฉาย รังสีเอ็กซ์แบบ โคจรตรง ทั้ง โครงสร้างแบบธรรมดาและ โครงสร้างแบบ Stripe

ในส่วนของการศึกษาผลของการลดทอนของรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อค่าแรงดันเอาต์พุต (Vout) จะเห็นว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโต้ไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง ที่มี โครงสร้างแบบ ธรรมดา เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์แบบ โคจรอ้อมที่ค่าแรงดันคงที่ 40 และ 100 Kvp ที่กระแส 50 mA พบว่า ในขณะที่ความหนาของแผ่นอะคริลิกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้น ค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้นั้นมีค่า ลดลงอย่างเป็นเชิงเส้นด้วยเช่นกัน

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง แฉวยาว ที่มีต่อแสงปกติและรังสีเอ็กซ์ โดยมีเงื่อนไขการสร้างคือ มีพื้นที่รับแสง 1 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสง 200 ไมโครเมตร

ในส่วนของการศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสแสง (I_p) ทำได้โดยการฉายแสงสีขาวที่ความเข้มแสงค่าต่างๆคือ 3000 lux , 6000 lux , 9000 lux , 12000 lux และ 15000 lux ตามลำดับ จะเห็นว่าค่าของกระแสแสง (I_p) ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแฉวยาว จะมีค่าเพิ่มอย่างเป็นเชิงเส้น ซึ่งถือว่าเป็นคุณสมบัติที่ดีของโฟโตดีเทกเตอร์

ในส่วนของการศึกษาค่าการกระจายแรงดันเอาต์พุตของ array ทั้ง 16 ตัว ทำได้โดยการป้อนแรงดันให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่ 80 KVp และกระแส 50mA ซึ่งทำการฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมให้กับซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแฉวยาว พบว่าค่าการกระจายแรงดันเอาต์พุตของโฟโตไดโอดทั้ง 16 ตัวมีค่าแตกต่างกันไม่มากนักถือว่าอยู่ในย่านที่พอร์รับได้

ในส่วนของการศึกษาประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดในการตรวจจับความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ทำได้โดยแบ่งซิลิคอนโฟโตไดโอดออกเป็น 4 ชุด ชุดละ 4 ตัว ดังนี้ ชุดที่ 1 ตัวที่ 1-4 ชุดที่ 2 ตัวที่ 5-8 ชุดที่ 3 ตัวที่ 9-12 และชุดที่ 4 ตัวที่ 13-16 และใช้แผ่นอะคริลิกเป็นตัวลดทอนความเข้มของรังสีเอ็กซ์ ซึ่งให้ความหนาของแผ่นอะคริลิกแต่ละชุดมีค่าเท่ากับ 3 mm , 6 mm , 9 mm และ 12 mm ตามลำดับ พบว่าค่าแรงดันเอาต์พุตที่ได้จากซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้งแฉวยาว ที่มีโครงสร้างแบบธรรมดา เมื่อฉายรังสีเอ็กซ์แบบโดยอ้อมให้ค่าแรงดันเอาต์พุตมีค่าลดลงอย่างเป็นเชิงเส้น ในขณะที่ความหนาของแผ่นอะคริลิกมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อทำการป้อนแรงดันให้กับหลอดกำเนิดรังสีเอ็กซ์ที่ 80 KVp กระแส 50 mA จากผลการทดลองนี้พบว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดสามารถแยกแยะความแตกต่างของความหนาของวัตถุได้ ซึ่งคุณสมบัตินี้สามารถนำไปใช้ประยุกต์ในเครื่อง CT Scanner ได้

เอกสารอ้างอิง

1. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภคช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2549
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภคช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2549
3. Adir Bar-Lev “Semiconductor and Electronic Devices” Prentice-Hell International Ltd.1993
4. Mauro Zambuto “Semiconductor Devices” McGraw-Hill International edition, Electrical&Electronic Engineering series 1989
5. Sze, “S.M. Physics of Semiconductor Device”, 2nd Edition.1981



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้