

**สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง**

การสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน  
ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี

**FABRICATION OF SILICON PIN PHOTODIODE WITH POROUS  
SILICON LAYER FOR X-RAY DETECTORS**



๒๗.  
(๗๔๓๗  
๒๕๕๐  
เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 82435  
วัน,เดือน,ปี 11 ก.ค. 2551

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

b. ๑๑๙ ๒๙๓๘๔  
f.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่หรือใช้ในทางที่ผิด  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างตัวตรวจจذبรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน  
ที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี

FABRICATION OF SILICON PIN PHOTODIODE WITH POROUS  
SILICON LAYER FOR X-RAY DETECTORS



ปริญญาานิพนธ์นี้สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2550

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโท ปีการศึกษา 2550

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี

ผู้จัดทำ

1. นาย วิวัฒน์ อธิธิกุสมาลัย รหัสนักศึกษา 47010716

2. นาย สุวัฒน์ ปุณณรัตน์กุล รหัสนักศึกษา 47010906



.....อาจารย์ที่ปรึกษา  
(รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเกษ)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน ที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี

นาย วิวัฒน์ อธิธิกุสุมาลย์ รหัสนักศึกษา 47010716

นาย สุวัฒน์ ปุณณรัตน์กุล รหัสนักศึกษา 47010906

อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเกษ

ปีการศึกษา 2550

## บทคัดย่อ

ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ในปัจจุบันมีการใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน (PIN Photodiode) ซึ่งมีโครงสร้างเป็นแบบแวนอนไปใช้ตรวจจับรังสีเอ็กซ์ รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอการออกแบบและการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน โดยมีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี ซึ่งพอร์สซิลิคอนนี้มีคุณสมบัติที่ช่วยลดการสะท้อนรังสีได้ ช่วยเพิ่มความไวให้ตัวตรวจจับรังสีเอ็กซ์ให้สูงขึ้น โดยโฟโตไดโอดชนิดพินที่ถูกออกแบบและสร้าง จะถูกนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและรังสีเอ็กซ์ เพื่อเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียกับโฟโตไดโอดชนิดพินที่โครงสร้างไม่มีชั้นพอร์สซิลิคอน ซึ่งผลที่ได้จากโครงการนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการสร้างอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์ เช่น เครื่อง CT scanner (Computed Tomography scanner) หรือการฉายรังสีเอ็กซ์เพื่อวินิจฉัยทางการแพทย์ ฯลฯ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# FABRICATION OF SILICON PIN PHOTODIODE WITH POROUS SILICON LAYER FOR X-RAY DETECTORS

Mr. Wiwat Itthikusumarn ID 47010716

Mr. Suwat Phunarattaanakul ID 47010906

Asso.Prof. Dr. Somkiat Supadech **Advisor**

Education year 2007

## Abstract

Nowadays, a vertical silicon PIN photodiode is used in X-ray detectors. This project presents the design and fabrication of the PIN photodiode for X-Ray detectors which has the porous silicon layer as absorb layer. Porous silicon properties are anti-reflection. So, porous silicon is used for improve sensitivity of X-ray detectors. A fabricated PIN photodiode was measured electrical characteristics and X-ray to compare the advantages and disadvantages with non-porous silicon PIN photodiode. The result of this experiment can apply to X-Ray detector devices usage such as Computed Tomography scanner or X-Ray medical diagnosis, etc.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาที่ช่วยดูแลเอาใจใส่ คอยแนะนำชี้แจงข้อบกพร่องต่างๆ และเป็นที่ศึกษาการทำโครงการ ตลอดจนช่วยดูแลควบคุมกระบวนการในการออกแบบและการสร้าง

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. มนัส สังวรศิลป์ และศาสตราจารย์ ดร. ชูชาติ ปิณฑวิรุจน์ ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องทดลองและเครื่องกำเนิดรังสีเอ็กซ์

ขอขอบคุณพี่นักศึกษาปริญญาโทนายจิรวัดณ์ ปราบเขต ในการช่วยเหลือด้านข้อมูลและเทคนิคกระบวนการออกแบบและการสร้าง และนักศึกษาปริญญาโทนายจักรพันธ์ ศรียากษ์ในการดูแลกระบวนการออกแบบและการสร้างทำให้สามารถจัดทำวิทยานิพนธ์นี้เสร็จได้อย่างสมบูรณ์

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่และรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือและความช่วยเหลือในการปฏิบัติงาน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา และญาติพี่น้อง ตลอดจนเพื่อนๆ ที่น่ารักทุกคน ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

ผู้จัดทำวิทยานิพนธ์

## สารบัญ

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VIII
สารบัญตารางและกราฟ	X
<b>บทที่ 1 บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาของการวิจัย	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	1
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	1
1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย	1
1.5 ขอบเขตการวิจัย	2
1.6 ขั้นตอนของการศึกษา	2
<b>บทที่ 2 รังสีเอ็กซ์</b>	<b>3</b>
2.1 รังสี (Radiation)	3
2.2 ชนิดของรังสี	3
2.2.1. รังสีที่ทำให้เกิดการแตกของประจุ (Ionizing Radiation)	3
2.2.2 รังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ (Non-ionizing Radiation)	4
2.3 หน่วยวัดรังสี	5
2.4 แถบสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แบบต่างๆ	5
2.5 รังสีเอ็กซ์ (X-RAY)	7
2.5.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์	8
2.5.2 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์	9
2.5.3 การเกิดรังสีเอ็กซ์	10
2.6 อันตรายจากรังสี	11
2.7 X-Ray Detectors	11
2.7.1 X-Ray Film	12

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

2.7.2 Resistors	12
2.7.3 Channel Electron Multipliers (CEMs)	12
2.7.4 Gas Detectors	13
2.7.5 Scintillation Detectors	13
2.7.7 Phosphors	14
2.7.8 Silicon Detectors	14
2.8 การนำรังสีเอกซ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ	14
2.8.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์	14
2.8.2 การประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น	15
2.8.3 การประยุกต์ใช้งานใน เครื่อง CT scanner	16
<b>บทที่ 3 ทฤษฎีการตรวจนับแสง</b>	<b>17</b>
3.1 ทฤษฎีควอนตัม	17
3.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)	17
3.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)	18
3.2 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ	19
3.2.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล	19
3.2.2 การรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล	21
3.2.3 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด	23
3.3 โหมดการใช้งานของโฟโตไดโอด	23
3.3.1 โหมดโฟโตโวลโตอิก (Photovoltaic mode)	24
3.3.2 โหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive mode)	24
3.4 ชนิดของโฟโตดีเทกเตอร์	25
3.4.1 โฟโตคอนดักเตอร์	25
3.4.2 พี-เอ็น โฟโตไดโอด	26
3.4.3 อะวาลานซ์โฟโตไดโอด	27
3.4.4 ซีอตกีส์โฟโตไดโอด	28
3.4.5 พินโฟโตไดโอด	29
3.5 โครงสร้างการวัดรังสี	30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

3.6 คุณสมบัติสำคัญของโฟโตลิโธกราฟี	31
3.6.1 ประสิทธิภาพควอนตัม	31
3.6.2 สภาพการตอบสนอง	32
3.6.3 ความเร็วในการตอบสนอง	32
3.6.4 แบนด์วิดท์	33
3.6.5 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัม	33
3.7 พอร์สซิลิคอน	34
3.7.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน	34
3.7.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน	36
3.7.3 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน	37
3.7.4 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน	41
3.7.5 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน	42
3.7.6 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน	42
<b>บทที่ 4 การออกแบบและกระบวนการสร้าง</b>	<b>45</b>
4.1 การสร้างกระจกต้นแบบ	45
4.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบพิน	46
4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง	46
4.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน	46
4.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)	46
4.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)	47
4.2.5 การฉายแสง (Exposure)	47
4.2.6 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)	47
4.2.7 Metallization Process	48
4.2.8 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)	48
4.2.9 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี (Stain etching)	48
4.2.10 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบพินที่มีซิลิคอนออกไซด์เป็นชั้นรับแสง	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

4.2.11	กระบวนการสร้างซิลิคอน โดโด โอดแบบพินที่มีชั้นพอร์สเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง	57
4.3	ลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอน โฟโตโด โอดแบบพิน	
4.3.1	โฟโตโด โอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์ เป็นชั้นรับรังสี	58
4.3.2	โฟโตโด โอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี	60
<b>บทที่ 5</b>	<b>การทดลอง</b>	<b>61</b>
5.1	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั่วไปของโฟโตโด โอด	61
5.2	การทดลองกับรังสีเอ็กซ์	62
5.2.1	การตอบสนองต่อพลังงานของรังสีเอ็กซ์	65
5.2.2	การตอบสนองต่อการลดทอนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีวัสดุตัวอย่างฉากรัน	66
<b>บทที่ 6</b>	<b>สรุปและวิจารณ์</b>	<b>69</b>
<b>บรรณานุกรม</b>		<b>70</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่ 2.1 แสดงแถบสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า	6
รูปที่ 2.2 แสดงภาพที่ได้จากการฉายรังสีเอ็กซ์	12
รูปที่ 2.3 Microchannel Plates (MCPs)	13
รูปที่ 2.4 แสดงหลักการ Gas Detectors	13
รูปที่ 2.5 แสดงวงจร Gas Detectors	13
รูปที่ 2.6 เครื่อง CT scanner	15
รูปที่ 3.1 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก	20
รูปที่ 3.2 ก การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรีนซิก ชนิดเอ็น	20
รูปที่ 3.2 ข การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรีนซิกชนิดพี	21
รูปที่ 3.3 ก กระบวนการการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบโดยตรง	22
รูปที่ 3.3 ข กระบวนการการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบโดยอ้อม	22
รูปที่ 3.4 แสดงหลักการการทำงานของโฟโตไดโอด	23
รูปที่ 3.5 แสดงวงจรการทำงานของโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic mode)	24
รูปที่ 3.6 แสดงวงจรการทำงานของโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive mode)	24
รูปที่ 3.7 โครงสร้างและแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์	25
รูปที่ 3.8 โครงสร้างและแถบพลังงานของพี-เอ็น โฟโตไดโอด	26
รูปที่ 3.9 โครงสร้างของอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด	27
รูปที่ 3.10 โครงสร้างของซีดทีกีโฟโตไดโอด	28
รูปที่ 3.11 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอด	29
รูปที่ 3.12 แสดงโครงสร้างโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง	30
รูปที่ 3.13 แสดงกลไกของอาร์ดริงที่ทำให้เกิดการลดลงของกระแสมีด	31
รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ	33
รูปที่ 3.15 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอด	34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง	34
รูปที่ 3.17 ประเภทของพอร์สซิลิโคนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (ก) ลักษณะหลุมตัน (ข) ลักษณะถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (ง) ลักษณะโพรงปิด (จ) ลักษณะทะลุ	35
รูปที่ 3.18 ประเภทของพอร์สซิลิโคนแบ่งตามรูทรงของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงขวดหมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (ค) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด	36
รูปที่ 3.19 ประเภทของพอร์สซิลิโคนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน	36
รูปที่ 3.20 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิโคนที่จำนวนอะตอมต่างๆ	37
รูปที่ 3.21 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิโคนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการสลาย ตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ	37
รูปที่ 3.22 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิโคนในระดับนาโนเมตรจากคลื่นความถี่สูง ไฟฟ้า-เคมี	38
รูปที่ 3.23 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิโคนด้วยวิธีการกัดทาง	39
รูปที่ 3.24 การสร้างพอร์สซิลิโคนด้วยวิธีการกัดข้อมีสี่	40
รูปที่ 3.25 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิโคนเพื่ออธิบาย คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์	41
รูปที่ 3.26 คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิโคนที่ความพรุนต่างกัน	43
รูปที่ 3.27 อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้ชั้นพอร์สซิลิโคน	44
รูปที่ 4.1 หน้าต่างโปรแกรม CorelDraw Graphics Suite 12 ที่ใช้ในการออกแบบมาสก์	45
รูปที่ 5.1 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล	61
รูปที่ 5.2 วงจรที่ใช้สำหรับทดลอง	63
รูปที่ 5.3 เครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้ทดลอง	63
รูปที่ 5.4 การจัดชุดทดลองกับเครื่องฉายรังสีเอ็กซ์	63
รูปที่ 5.5 สัญญาณ Output ที่วัดได้ที่ทางออกของวงจรรขยาย	64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตารางและกราฟ

ตารางที่ 2.1 แสดงความยาวช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ	6
กราฟแสดงคุณลักษณะ I-V โฟโตไดโอดของพินโฟโตไดโอดที่มี พอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี	61
กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับแสงในกรณีการฉายรังสีโดยอ้อม	64
กราฟแสดงการตอบสนองต่อการสทอนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีสิ่งกีดขวางรังสีของ แบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นรับรังสีในกรณีการฉายรังสีโดยอ้อม	66
กราฟแสดงการตอบสนองต่อการสทอนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีสิ่งกีดขวางรังสีของ แบบที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสีในกรณีการฉายรังสีโดยอ้อม	66



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาของการวิจัย

ปัจจุบันรังสีเอกซ์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์กันอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะการนำไปใช้งานด้านการตรวจสอบภายใน เช่น เครื่องเอกซเรย์วัตถุ (CT scanner) ซึ่งมีหลักการทำงานโดยฉายรังสีเอกซ์แล้วตรวจวัดการทะลุผ่านของรังสี ซึ่งอุปกรณ์ที่ใช้ตรวจวัดนี้มีความสำคัญอย่างมากต่อการตรวจวัด จะต้องมีความสัมพันธ์ที่เหมาะสมต่อการตรวจวัดรังสีเอกซ์ ยิ่งในปัจจุบันมีการสร้างเครื่องเอกซเรย์วัตถุที่สามารถบันทึกเป็นภาพเคลื่อนไหวได้ด้วย ดังนั้นความไวของตัวตรวจวัดรังสีก็มีความสำคัญต่อการวัดอย่างมาก โดยทั่วไปมักจะใช้ซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวตั้งซึ่งมีความสัมพันธ์ที่ดีต่อการตรวจจับพลังงานโฟตอนของแสงอยู่แล้ว

โครงการนี้จึงนำเสนอการออกแบบและการสร้างตัวตรวจจับรังสีเอกซ์แบบซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน โดยมีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี ซึ่งพอร์ซิลิคอนนี้มีความสัมพันธ์ที่ดีช่วยลดการสะท้อนรังสีได้ ช่วยเพิ่มความไวให้ตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ให้สูงขึ้น

### 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มุ่งหวังเพื่อศึกษา การสร้างพินโฟโตไดโอดแบบแนวตั้งมาใช้ตรวจวัดรังสีเอกซ์ โดยมุ่งหวังที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดกลืนรังสีเอกซ์ของพินโฟโตไดโอด ด้วยการนำพอร์ซิลิคอนมาประยุกต์เป็นชั้นลดการสะท้อนของรังสีเอกซ์

### 1.3 สมมติฐานของการศึกษา

สมมติฐานที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ชั้นพอร์ซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมสิ เมื่อนำมาเป็นชั้นลดการสะท้อนรังสีในพินโฟโตไดโอด จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและลดต้นทุนในการผลิตตัวตรวจจับรังสีเอกซ์ชนิดพินได้เช่นเดียวกับที่มีผลต่อประสิทธิภาพของเซลล์แสงอาทิตย์

### 1.4 ทฤษฎีหรือแนวคิดที่ใช้ในการวิจัย

พอร์ซิลิคอน (PS) เป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก นอกจากนี้จะมีคุณสมบัติการเรืองแสง (photoluminescence) และการเปล่งแสง (electroluminescence)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่อุณหภูมิห้องแล้ว ยังมีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงได้ดีและมีการสะท้อนแสงที่ต่ำอีกด้วย ชั้นพอร์สซิติคอนจึงเหมาะอย่างยิ่งที่จะใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

เนื่องจากรังสีเอ็กซ์เป็นรังสีที่มีความถี่อยู่ในย่านที่ใกล้กับรังสีอัลตราไวโอเล็ตในแสงอาทิตย์ ดังนั้นจึงน่าจะมีส่วนช่วยเพิ่มประสิทธิภาพให้กับตัวตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์ด้วย

ชั้นพอร์สซิติคอนสร้างได้หลายวิธีแต่ที่ง่ายและประหยัดที่สุดคือ วิธีการกัดข้อมือ ซึ่งเนื้อซิติคอนบางส่วนจะถูกละลายออกไปด้วยปฏิกิริยาเคมีของสารละลายที่มีกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดไนตริก ( $\text{HNO}_3$ ) ทำให้มีรูพรุนขนาดเล็กๆเกิดขึ้นมากมายกลายเป็นชั้นพอร์สซิติคอน และมองเห็นเป็นสีต่างๆปรากฏขึ้น [1]

### 1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้อยู่ที่การศึกษาการสร้างตัวตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์ของพินโฟโตไดโอดแบบแนวตั้ง โดยมีชั้นพอร์สซิติคอนมาเป็นชั้นลดการสะท้อนรังสี และทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์ของพินโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นพอร์สซิติคอนกับพินโฟโตไดโอดที่มีชั้นพอร์สซิติคอน เพื่อพิสูจน์ว่าชั้นพอร์สซิติคอนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้พินโฟโตไดโอดในการตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์ได้มากน้อยเพียงไร เพื่อให้เป็นแนวทางในการพัฒนาพินโฟโตไดโอดชนิดนี้ต่อไป

### 1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ได้แบ่งเนื้อหาออกเป็น 6 บทด้วยกันคือ

บทที่ 1 กล่าวถึงความเป็นมาของงานวิจัย ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ สมมติฐาน ทฤษฎีที่ใช้ ขอบเขตของการวิจัย และขั้นตอนการศึกษา

บทที่ 2 กล่าวถึงทฤษฎีพื้นฐาน การตรวจวัด รวมไปถึงการใช้งานรังสีเอ็กซ์

บทที่ 3 กล่าวถึงทฤษฎีของตัวตรวจจ็บบโฟโตดีเทกเตอร์ ลักษณะและคุณสมบัติของชั้นพอร์สซิติคอน

บทที่ 4 กล่าวถึงการออกแบบและการสร้างตัวตรวจจ็บบรังสีเอ็กซ์ชนิดพินแบบแนวตั้งที่มีชั้นพอร์สซิติคอนเป็นชั้นลดการสะท้อนรังสี

บทที่ 5 กล่าวถึงการทดลองและผลการทดลอง

บทที่ 6 เป็นบทสรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### รังสีเอ็กซ์

#### 2.1 รังสี (Radiation)

ปกติโลกเราจะได้รับรังสี Cosmic อยู่ตลอดเวลา ในทุกๆ ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น 1,000 ฟุต จะได้รับรังสีที่เพิ่มขึ้น 3 เท่า ดังนั้น ลูกเรือของสายการบินต่างๆ จึงถูกจำกัดให้บินเพียง 1,000 ชั่วโมงใน 1 ปี ซึ่งจะได้รับรังสี 1 millirems (1 rem) สำหรับบุคคลทั่วไปจะได้รับรังสี Cosmic ในแต่ละปีแตกต่างกัน แล้วแต่สถานที่ เช่น ถ้าอยู่ในรัฐฟลอริดาของสหรัฐอเมริกาจะได้รับเพียง 35 mrem และอาจสูงขึ้น ถึง 130 mrem ในรัฐ Wyoming หรือ Colorado เป็นต้น

แหล่งรังสีตามธรรมชาติแหล่งที่ 2 ก็คือมาจากตัวโลกเอง เช่น Uranium-238, Tritanium-232, Potonium-40 ซึ่งอาจจะพบในหินทราย หรือ สถานที่อื่น ๆ รังสีบางชนิดก็พบได้ตามแหล่งต่างๆ เช่น อีฐคอนกรีต ในน้ำ อากาศ ซึ่งปนเปื้อนด้วยก๊าซเรดอน

เนื่องจากรังสีมีอยู่ในดิน ดังนั้นอาหารและน้ำจึงมีรังสีปนเปื้อนกับรังสีนี้ด้วย เช่น Brasil nuts ซึ่งปลูกในประเทศบราซิลที่มีรังสีแกมมาในดิน ทำให้มีรังสีในถั่วชนิดนี้ มากกว่าในถั่วชนิดอื่น หลายพันเท่า ธัญพืชจะมีรังสีมากกว่าผลไม้ 500 เท่า ซึ่งรังสีเหล่านี้จะเปลี่ยนถึงคนได้โดยสัตว์เลี้ยง เช่น วัวกินพืชเหล่านี้ แล้วเราก็กินเนื้อวัวต่อ โดยเฉพาะส่วนของ เครื่องในสัตว์ เช่น ตับ, ไต และ เนยแข็ง น้านมจะมีรังสีปนเปื้อนอยู่ ถึงแม้ปริมาณที่เราได้รับจะไม่มากพอที่จะเป็นอันตรายแก่เราก็ดำ

#### 2.2 ชนิดของรังสี

รังสีเป็นพลังงานที่แพร่กระจายออกมาในลักษณะ ของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ในความยาวของคลื่นที่ แตกต่างกัน พลังงานดังกล่าวจะถูกปล่อยออกจากอะตอม ในหลายรูปแบบ เช่น แสง ความร้อน คลื่นวิทยุ คลื่นโทรทัศน์และกัมมันตรังสี โดยรังสีสามารถแบ่งออกได้ 4 จำแนก ดังนี้

##### 2.2.1. รังสีที่ทำให้เกิดการแตกของประจุ (Ionizing Radiation)

เป็นรังสีที่กระทบกับสารใดๆ แล้วก็ตามจะทำให้เกิดการแตกประจุบวก หรือ ลบที่สารนั้นๆ ซึ่งกลายเป็นมีประจุไฟฟ้าของสารต่างๆ นี้ จะทำให้กระบวนการ ทางชีววิทยาของ สารนั้นตามปกติ ถูกรบกวนไปด้วย รังสีชนิดนี้จัดเป็น พลังงานระดับสูง ที่มีผลต่อสิ่งมีชีวิต โดยทั่วไปเรียกว่า กัมมันตรังสี (Radioactive) จะพบว่ารังสีที่ทำให้เกิดประจุนี้มี 2 ลักษณะ คือ เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มี ความถี่สูงมาก เคลื่อนที่ไปลักษณะของคลื่น เช่น x-ray และรังสีแกมมา หรือ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นอนุภาค เช่น รังสีแอลฟา และ รังสีเบตา การได้รับรังสี ในปริมาณในระดับสูงจะทำให้สิ่งมีชีวิตตายได้ เช่น กรณีของฮิโรชิมา นางาซากิ หรือ เซอร์โนบิล รังสีปริมาณต่ำจะถูกใช้ในด้านการแพทย์ เช่น x-ray หรือ การฉายรังสีถนอมอาหาร รังสีที่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ แบ่งออกเป็น

**อนุภาคแอลฟา (Alpha)** มีประจุไฟฟ้าเป็นบวก เนื่องจาก นิวเคลียร์ของอะตอม ของฮีเลียม ประกอบด้วยโปรตอนสองตัว และ นิวตรอนสองตัว ดังนั้น อนุภาคแอลฟา จึงมีประจุไฟฟ้าเป็นบวก โดยมีประจุเป็นสองเท่า และน้ำหนักอะตอมเป็นสี่เท่า อนุภาคแอลฟา เคลื่อนที่ด้วยความเร็วประมาณ 19,200 กิโลเมตรต่อวินาที หรือ ประมาณ 1 ใน 15 เท่าของความเร็วของแสง เนื่องจากอนุภาคนี้ค่อนข้างใหญ่ เมื่อเทียบกับอนุภาคชนิดอื่น มันจึงไม่สามารถทะลุผ่านเนื้อวัตถุ ได้ง่ายเหมือนอนุภาคอื่น ๆ แต่จะสามารถถูกกั้นให้หยุดได้ โดยใช้กระดาษ 1 ชั้น หรือ 2 ชั้น หรือทะลุผ่านได้ถึงเพียงแต่ผิวหนัง เท่านั้น และโดยปกติ เคลื่อนที่ได้ไม่ไกลเกินกว่า 9 เซนติเมตร ในอากาศ เมื่ออนุภาคแอลฟาชนอะตอมหรือโมเลกุล ของวัตถุ จะทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมาเป็นสาเหตุให้เกิดไอออน

**อนุภาคเบตา (Beta)** เป็นอิเล็กตรอน ที่เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูง มากกว่าความเร็วของอนุภาคแอลฟาถึงสิบเท่า หรือ อาจจะมากกว่าขึ้นไป อนุภาคเบตานั้นมีประจุไฟฟ้าลบ สามารถเบี่ยงเบนได้ในสนามไฟฟ้าหรือสนามแม่เหล็ก เนื่องจาก ขนาดของอนุภาคนี้เล็ก และมีความเร็วสูง จึงสามารถทะลุผ่านวัตถุหนา ได้ดีกว่าอนุภาคแอลฟา โดยสามารถทะลุเข้าในเนื้อเยื่อ ได้ถึง 1-2 เซนติเมตร อาจกั้นอนุภาคเบตานั้นได้ด้วยชั้น โลหะบาง ๆ

**รังสีแกมมา (Gamma rays)** เป็นรังสีช่วงความถี่สูงมากกว่ารังสีเอ็กซ์ ไม่มีน้ำหนักและเคลื่อนที่ด้วยความเร็วเท่ากับแสง คือ ประมาณ 297,600 กิโลเมตรต่อวินาที มีสมบัติเหมือนรังสีเอ็กซ์ คือ สามารถทะลุผ่านร่างกายมนุษย์ หรือเนื้อวัตถุ หนา มาก ๆ เช่น ไม้ หรือ โลหะได้ และยังพบว่า มีอำนาจ ในการทะลุผ่าน ดีกว่ารังสีเอ็กซ์ จากการทดลองพบว่า รังสีแกมมา สามารถทะลุผ่านคอนกรีตหนาประมาณ 1 ฟุต ได้ แต่จะสามารถดูดซับ ได้หมดในคอนกรีตหนา 1 เมตร

**รังสีเอ็กซ์ (X-rays)** เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า เช่นเดียวกับรังสีแกมมา แต่แผ่ออกมาจากวงโคจร ของอิเล็กตรอน รังสีเอ็กซ์ มีพลังงานต่ำกว่ารังสีแกมมา

### 2.2.2 รังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุ (Non-ionizing Radiation)

เป็นรังสีที่พบในชีวิตประจำวัน เช่น คลื่นวิทยุ และ โทรทัศน์ แสงอาทิตย์ วิดีโอ การฉายภาพข้ามศีรษะ, สายส่งไฟฟ้า ตลอดจนการใช้ผ้าห่มไฟฟ้า แสงอุลตราไวโอเล็ตจัดเป็นรังสีที่ไม่ทำให้เกิดการแตกตัวของประจุที่มีพลังงานสูง และเป็นอันตรายต่อชีวิต ทำให้เกิดโรคมะเร็งของผิวหนัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.3 หน่วยวัดรังสี

การวัดรังสีสามารถวัดได้ใน 2 ลักษณะ

1. ปริมาณและชนิดรังสีที่มนุษย์สัมผัส (Exposed radiation)
2. ปริมาณรังสีที่ถูกดูดกลืนเข้าสู่ร่างกาย (Absorbed radiation)

หน่วยวัดต่าง ๆ ได้แก่

1. **คูรี (Curie, Ci)** เป็นหน่วยวัดที่ใช้กันทั่วไป โดยตั้งชื่อขึ้น หลังจากมาดามแมรี คูรี และสามี ปีแอร์ คูรี ได้ค้นพบธาตุเรเดียม คูรี เป็นหน่วยวัดความแรงของรังสี โดยกำหนดว่า สารกัมมันตรังสี ที่สลายตัวในอัตรา  $3.7 \times 10^{10}$  ครั้งต่อ 1 วินาที จะมีความแรงเท่ากับ 1 คูรี ตัวอย่างเช่น EPA (Environmental Protection Agency ใน USA) เปรียบเทียบการ หายใจเอาสารเรดอน (เป็นธาตุกัมมันตรังสีชนิดหนึ่ง) เข้าไปวันละ 10 ปีแอร์คูรีต่อลิตรของอากาศ ( $1 \text{Pci} = 1$  ส่วนล้านล้านส่วน Ci) จะเกิดอัตราเสี่ยง ต่อการเป็นโรคมะเร็งพอ ๆ กับการสูบบุหรี่วันละ 1 ซอง (1 pack)

2. **แรด (Radiation absorbed dose, Rad)** คือ ปริมาณรังสี ที่ถูกดูดกลืน โดยสิ่งมีชีวิต ในรูปของพลังงานที่สะสมในช่วงเวลาหนึ่ง

3. **เรม (Radiation equivalent man, Rem)** หน่วยวัด 'เรม' ถูกนำมาใช้ เนื่องจากความแตกต่างของรังสี แต่ละชนิด โดยรังสี ขนาด 1 แรดเท่ากันแต่เป็นรังสี คนละชนิดกัน จะมีผลต่อเนื้อเยื่อ ของสิ่งมีชีวิต ต่างกัน ดังนั้น 'เรม' จึงเป็นหน่วยวัดที่ ถูกตั้งขึ้นเพื่อให้ สามารถอธิบายผลกระทบด้านชีววิทยา จากการดูดกลืนรังสี ชนิดต่าง ๆ ให้อยู่บนฐานเดียวกัน ตัวอย่าง เช่น รังสีแอลฟา 1 แรด จะเป็นอันตรายต่ออวัยวะมากกว่ารังสีเอ็กซ์ 1 แรดถึง 10 เท่า ดังนั้น เมื่อคำนึงถึงอันตรายทางด้านชีววิทยาของรังสีแอลฟา แรดจะเท่ากับ 10 เรม

4. **เรินท์เก้น (Roentgens, R)** เป็นชื่อที่ได้มาจาก Wilhelm Roentgen ซึ่งเป็นผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์ R เป็นหน่วยวัดปริมาณ รังสีสัมผัส (Exposed Radiation) ที่ใช้วัดรังสีเอ็กซ์ และรังสีแกมมา โดยวัดเป็นปริมาณพลังงานที่ทำให้อากาศ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตรแตกตัวเป็นไอออน

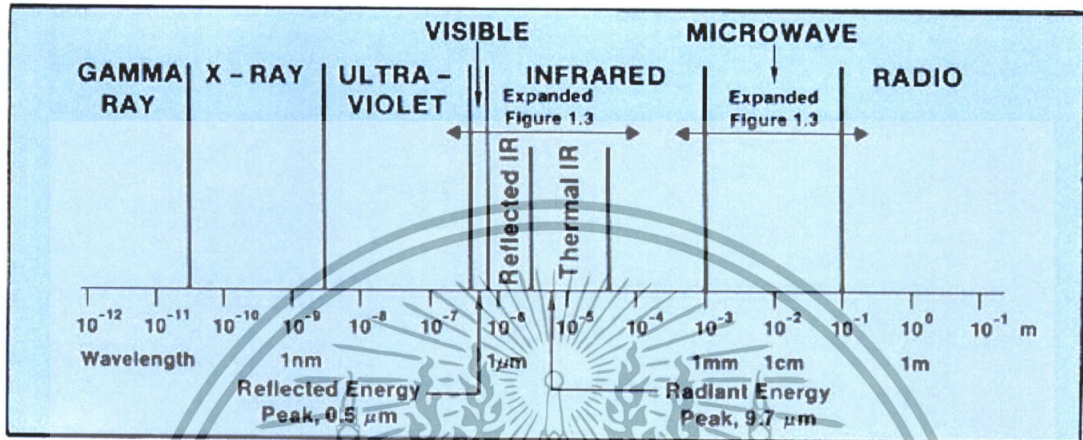
$$1 \text{Roentgen} = 2.58 \times 10^{-4} \frac{\text{Coulomb}}{\text{Kg} - \text{air}} = 0.3336 \frac{nC}{cc} \quad \text{at STP}$$

## 2.4 แถบสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า แบบต่างๆ

คลื่นแม่เหล็ก ไฟฟ้า แบ่งออกได้ตามความยาวของคลื่นที่เรียกว่า ช่วงคลื่น (Band) ตั้งแต่ช่วงคลื่นที่มีความยาวสั้นที่สุด คือ รังสีคอสมิก (Cosmic ray) มีความยาวคลื่นน้อยกว่า  $10^{-10}$  ไมครอน จนถึงช่วงคลื่นวิทยุที่มีความยาวคลื่นหลายกิโลเมตร สำหรับคุณสมบัติของช่วงคลื่น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประกอบไปด้วยช่วงคลื่นตามลำดับของความยาวดังนี้ รังสีแกมมา รังสีเอ็กซ์ อุลตราไวโอเล็ต ตา มองเห็น อินฟราเรด ไมโครเวฟ และคลื่นวิทยุ



รูปที่ 2.1 แสดงแถบสนามคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า

ตารางที่ 2.1 แสดงความยาวช่วงคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าต่างๆ

ช่วงคลื่น	ความยาวช่วงคลื่น	รายละเอียด
รังสีแกมมา (Gamma ray)	$< 0.03$ ไมครอน	รังสีแกมมาถูกดูดซึมทั้งหมดโดยบรรยากาศชั้นบน จึงไม่ได้ใช้ในการสำรวจระยะไกล
รังสีเอ็กซ์ (X-ray)	$0.03 - 3.1$ ไมครอน	รังสีเอ็กซ์รัยถูกดูดซึมทั้งหมดโดยชั้นบรรยากาศเช่นกัน
รังสีเหนือม่วงหรือรังสีอุลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet)	$0.03 - 0.4$ ไมครอน	ช่วงคลื่นสั้นกว่า $0.3$ ไมครอน ถูกดูดซึมทั้งหมดโดยโอโซน ( $O_3$ ) ในบรรยากาศชั้นบน
ช่วงคลื่นไวโอเล็ตภาพถ่าย (Photographic UV band)	$0.3 - 0.4$ ไมครอน	ช่วงคลื่นสามารถผ่านชั้นบรรยากาศ สามารถถ่ายภาพด้วยฟิล์มถ่ายรูปแต่การกระจายในชั้นบรรยากาศเป็นอุปสรรคมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วงคลื่น	ความยาวช่วงคลื่น	รายละเอียด
ช่วงคลื่นตามองเห็นได้ (Visible)	0.4 - 0.7 ไมครอน	บันทึกภาพด้วยฟิล์มและอุปกรณ์บันทึกภาพได้รวมทั้งช่วงคลื่นโลกมีการสะท้อนพลังงานสูงสุด (reflected energy peak) ที่ 0.5 ไมครอน ช่วงคลื่นแคบที่มีผลตอบสนองสายตามนุษย์แบ่งได้ 3 ช่วงย่อย คือ 0.4-0.5 ไมครอน สีน้ำเงิน 0.5-0.6 ไมครอน สีเขียว 0.6-0.7 ไมครอน สีแดง
อินฟราเรด (Infrared)	0.7 - 100 ไมครอน	มีปฏิสัมพันธ์กับวัตถุตามความยาวคลื่นและการผ่านชั้นบรรยากาศ มีการดูดซึมในบางช่วงคลื่น
ช่วงคลื่นอินฟราเรดชนิดสะท้อน (Reflected IR band)	0.7-3.0 ไมครอน	สะท้อนรังสีดวงอาทิตย์ ซึ่งไม่มีรายละเอียดเกี่ยวกับช่วงความร้อนของวัตถุช่วงคลื่น 0.7-0.9 ไมครอน สามารถถ่ายภาพด้วยฟิล์มเรียกว่าช่วงคลื่นอินฟราเรด photographic IR band
ช่วงคลื่นอินฟราเรดชนิดความร้อน (Thermal IR band)	3-5 ไมครอน 8-14 ไมครอน	การบันทึกภาพต้องใช้อุปกรณ์พิเศษ เช่น ตัวกวาดตรวจ (scanners) ไม่สามารถบันทึกภาพได้ทั้งระบบ active และ passive
คลื่นสั้น (Microwave)	0.1-30 cm	ช่วงคลื่นยาวสามารถทะลุผ่านหมอกและฝนได้บันทึกภาพได้ทั้งระบบ active และ passive
เรดาร์ (Radar)	0.1-3.0 cm	ระบบ Active มีความยาวช่วงคลื่นต่างๆ เช่น Ka band (10 mm), X band (30 mm.) และ L band (25 cm.)
วิทยุ (Radio)	> 30 cm	ช่วงคลื่นที่ยาวที่สุด บางครั้งมีเรดาร์อยู่ในช่วงนี้ด้วย

## 2.5 รังสีเอ็กซ์ (X-RAY)

รังสีเอ็กซ์ (X-ray หรือ Röntgen ray) เป็นรังสีแม่เหล็กไฟฟ้า ที่มีความยาวคลื่นในช่วง 10 ถึง 0.01 นาโนเมตร ตรงกับความถี่ในช่วง 30 ถึง 30,000 พิโคเฮิร์ตซ์ (10<sup>15</sup> เฮิร์ตซ์) คุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ คล้ายคลึงกับแสงสว่างธรรมดา เป็นส่วนใหญ่ แต่คุณสมบัติพิเศษ ของมัน คือ มีอำนาจทะลุทะลวงผ่านวัตถุต่าง ๆ ได้มากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับ ความหนาแน่น และน้ำหนักอะตอมของวัตถุที่มันผ่าน นอกจากนั้น ยังทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง ทั้งทางเคมีชีวและอื่น ๆ อีกด้วย ใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เบื้องต้นมีการใช้รังสีเอ็กซ์สำหรับถ่ายภาพเพื่อการวินิจฉัยโรคและงานผลึกศาสตร์ (crystallography) รังสีเอ็กซ์เป็นการแผ่รังสีแบบแตกตัวเป็นไอออน และมีอันตรายต่อมนุษย์

ทฤษฎีอิเล็กตรอนสมัยปัจจุบัน อธิบายถึงการเกิดรังสีเอ็กซ์ว่า ธาตุประกอบด้วยอะตอมจำนวนมากในอะตอมแต่ละตัวมีนิวเคลียสเป็นใจกลาง และมีอิเล็กตรอนวิ่งวนเป็นชั้นๆ ธาตุเบาจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่น้อยชั้น และธาตุหนักจะมีอิเล็กตรอนวิ่งวนอยู่หลายชั้น เมื่ออะตอมธาตุหนักถูกยิงด้วยกระแสอิเล็กตรอน จะทำให้อิเล็กตรอนที่อยู่ชั้นในถูกชนกระเด็นออกมาวิ่งวนอยู่รอบนอกซึ่งมีภาวะไม่เสถียรและจะหลุดตกไปวิ่งวนอยู่ชั้นในอีก พร้อมกับปล่อยพลังงานออกในรูปรังสี ถ้าอิเล็กตรอนที่ยิงเข้าไปมีพลังงานมาก ก็จะเข้าไปชนอิเล็กตรอนในชั้นลึกๆ ทำให้ได้รังสีที่มีพลังงานมาก เรียกว่า ฮาร์ดเอ็กซ์เรย์ (Hard x-ray) ถ้าอิเล็กตรอนที่ใช้ยังมีพลังงานน้อยเข้าไปได้ไม่ลึกนัก จะให้รังสีที่เรียกว่า ซอฟต์เอ็กซ์เรย์ (soft x-ray)

กระบวนการเกิดหรือการผลิตรังสีเอ็กซ์ทั้งโดยฝีมือมนุษย์และในธรรมชาติ มีอยู่ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ

วิธีที่ 1 เป็นวิธีผลิตรังสีเอ็กซ์โดยการยิงลำอนุภาคอิเล็กตรอนใส่แผ่นโลหะ เช่น ทังสเตน อิเล็กตรอน ที่เป็นกระแสจะวิ่งไปชนอิเล็กตรอนของอะตอมโลหะที่เป็นเป้า ทำให้อิเล็กตรอนที่ถูกชนเปลี่ยนตำแหน่ง การโคจรรอบนิวเคลียส เกิดตำแหน่งที่ว่างของอิเล็กตรอนในวงโคจรรอบนิวเคลียสเดิม อิเล็กตรอนตัวอื่นที่อยู่ตำแหน่งวงโคจรมีพลังงานสูงกว่า จะกระโดดเข้าไปแทนที่ของอิเล็กตรอนเดิมแล้วปล่อยพลังงานออกมาในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าคือ รังสีเอ็กซ์ เครื่องฉายรังสีเอ็กซ์ที่ใช้งานกันทั่วไปในโรงพยาบาลและในโรงงานอุตสาหกรรม ล้วนเป็นเครื่องผลิต รังสีเอ็กซ์จากวิธีการนี้

วิธีที่ 2 เป็นวิธีผลิต หรือ กำเนิดรังสีเอ็กซ์จากการเคลื่อนที่ของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้า เช่น อิเล็กตรอน โพรตอนหรืออะตอม อย่างมีความเร่ง คือ อนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงขึ้นแล้วก็ เป็น ธรรมชาติของอนุภาคที่มีประจุไฟฟ้าเหล่านี้เอง ที่ต้องปล่อยพลังงานออกมาในรูปของ คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า อย่างที่ไม่มียอะไรไปห้ามได้ ซึ่งถ้าคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ถูกปล่อยออกมามีความถี่สูงพอก็จะเป็นรังสีเอ็กซ์ กำเนิดรังสีเอ็กซ์วิธีนี้เป็นวิธีที่นักวิทยาศาสตร์ที่นิยมใช้ในการผลิตรังสีเอ็กซ์ในห้องทดลองวิทยาศาสตร์

### 2.5.1 ประวัติการค้นพบรังสีเอ็กซ์

ผู้ที่ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก คือ นักฟิสิกส์ชาวเยอรมัน ชื่อ วิลเฮม คอนราด เรินท์เก้น (Wilhelm Conrad Roentgen) ภายในห้องทดลอง ณ มหาวิทยาลัยวูร์ซบวร์ค (Wurzburg) ประเทศเยอรมัน เรินท์เก้น ได้พบรังสีเอ็กซ์โดยบังเอิญ คือ ขณะที่เขากำลังทำการทดลองเกี่ยวกับเรื่อง "Absorption of cathode rays" โดยใช้หลอดทดลองที่เรียกว่า Crookes' tube เขาสังเกตเห็นว่า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Cathodes rays ที่ออกมาจากหลอดทดลอง ทำให้กระดาดแข็งที่ฉาบด้วย แบเรียมปลาติโนไซยาไนด์ (Barium platincyanoide) เกิดเรืองแสง (Fluoresce) ขึ้นในระยะ โกลที่สุกที่ยังมีการเรืองแสงบนกระดาดแข็ง คือ 120 เซนติเมตร ในขณะที่เดียวกัน เขาสังเกตเห็นอีกว่า ตัวอักษร A ที่ทำด้วยแบเรียมปลาติโนไซยาไนด์อยู่ห่างออกไปเกือบสิบฟุตเกิดเรืองแสงขึ้นด้วย ทั้ง ๆ ที่ไม่อยู่ในระยะของ Cathode rays เริ่นท์เกินจึงคิดว่า เขาได้ค้นพบรังสีชนิดใหม่ขึ้นแล้ว และให้ชื่อว่า "X-rays" และเขาได้ใช้เวลาอีกหลายสัปดาห์ต่อมาทำการสังเกตถึงการทะลุทะลวง (Penetration) ของรังสีเอ็กซ์ผ่านกระดาดผ่านโลหะ และแม้กระทั่งผ่านเนื้อหนังของคน และเขาได้ถ่ายภาพรังสีของมือของภรรยาเขาไว้ด้วย ในที่สุดเขาจึงประกาศให้โลกได้รู้ว่า เขาได้ค้นพบรังสีเอ็กซ์เป็นคนแรก

ในปี พ.ศ. 2444 เริ่นท์เกินได้รับรางวัลโนเบลสาขาฟิสิกส์ซึ่งเป็นรางวัลแรกสุด รางวัลนี้ให้อย่างเป็นทางการเพื่อ "เป็นการรับรู้และยกย่องในความวิริยอุตสาหะที่เขาได้ค้นพบรังสีที่มีความสำคัญและได้รับการตั้งชื่อตามเขา" เริ่นท์เกินได้บริจากรางวัลที่ได้รับให้แก่มหาวิทยาลัยที่เขาสังกัด และได้ทำเช่นเดียวกับที่ บีแอร์ คูรี ได้ทำบ้างในหลายปีต่อมา คือการปฏิเสธไม่ถือลิขสิทธิ์ในสิ่งประดิษฐ์ต่างๆ ที่สืบเนื่องมาจากผลงานที่เขาค้นพบด้วยเหตุผลทางจริยธรรม เริ่นท์เกินไม่ยอมแม้แต่จะให้ใช้ชื่อเขาเรียกรังสีที่เขาเป็นผู้ค้นพบ อย่างไรก็ตาม ในปี พ.ศ. 2547 IUPAC ได้ตั้งชื่อธาตุใหม่ว่า "เริ่นท์เกินเนียม" (Roentgenium) เพื่อเป็นเกียรติแก่เริ่นท์เกิน

## 2.5.2 ลักษณะและคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์

1. เป็นรังสีคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า มีช่วงคลื่นสั้นมาก คืออยู่ในช่วงตั้งแต่ 0.04-1000 Å หรือ อยู่ในช่วงระหว่างรังสีแกมมากับรังสีอัลตราไวโอเล็ต
2. มีคุณสมบัติเหมือนแสงสว่างธรรมดา เป็นต้นว่า เดินทางเป็นเส้นตรง ถ้าเดินทางในสุญญากาศแล้ว เดินทางด้วยความเร็วเท่ากับแสงคือ  $3 \times 10^8$  m/s นอกจากนั้นแล้ว ยังมีการสะท้อนกลับ หักเห และ เบี่ยงเบนได้ เช่นเดียวกับแสงสว่างธรรมดา
3. ไม่หักเห โดยสนามแม่เหล็กหรือสนามไฟฟ้า
4. เกิดจากการที่อนุภาคอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงวิ่งไปชนเป้า (Target) อิเล็กตรอนดังกล่าวนี้ จะไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่นๆ ที่อยู่ในวงโคจรของอะตอม ของเป้า ให้หลุดกระเด็น ออกนอกวงโคจร
5. ทำให้เกิดการเรืองแสง (Fluorescence และ Phosphorescence) ในสารพิเศษบางอย่าง
6. ถูกกลืน (Absorbed) โดยสสาร (Matter) ทุกชนิดมากบ้างน้อยบ้าง ขึ้นอยู่กับความหนาแน่น และน้ำหนักของอะตอมของสสารนั้น
7. ทำให้เกิดการปล่อยประจุไฟฟ้า (Ionization) เมื่อผ่านไปในอากาศหรือก๊าซ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี เช่น เมื่อรังสีเอกซ์ไปถูกฟิล์มถ่ายรูป จะทำให้ฟิล์มนั้นดำ จึงนำผลอันนี้ มาใช้ในการบันทึกภาพรังสีลงบนแผ่น ฟิล์มเอ็กซ์เรย์

9. ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางชีวะ เป็นต้นว่า ทำให้เซลล์ของร่างกายเปลี่ยนแปลง หรือเกิดการผ่าเหล่า (Genetic mutation) ถ้าได้รับรังสีเป็น จำนวนมาก และนานพอ

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

### 2.5.3 การเกิดรังสีเอกซ์

รังสีเอกซ์เกิดขึ้น โดยที่อนุภาคของอิเล็กตรอนที่มีความเร็วสูงไปชนเป้า (Target) ผลทำให้เกิดเป็นรังสีเอกซ์และความร้อน การเกิดของรังสีเอกซ์นี้อาศัยองค์ประกอบสำคัญ 5 ประการ คือ

#### 1. ทำให้เกิดอนุภาคอิเล็กตรอน หรือ การแยกอิเล็กตรอนออกจากอะตอมของโลหะ

อิเล็กตรอนจะเกิดขึ้น หรือแยกจากอะตอม ของ โลหะ ที่ทำเป็นไส้หลอดรังสีเอกซ์ โดยการที่ผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปในไส้หลอด (Filament) จนกระทั่ง ไส้หลอดร้อนขึ้น ประมาณ 2000 C หรือมากกว่านั้น จะมีผลทำให้เกิด เทอร์มิโอนิกอิมิชัน (Thermionic Emission) คือ อิเล็กตรอน หลุดออกจาก เซลล์ หรือวง โคจรของมัน เมื่อถูกความร้อน อิเล็กตรอนที่หลุดออกมา นี้ จะมาออกันอยู่รอบๆ ผิวหน้าของโลหะ จนกลายเป็นกลุ่ม (Cloud) เรียกว่า Space charge สาเหตุที่อิเล็กตรอน ไม่สามารถหลุดพ้น ไปจากผิวหน้าโลหะ เพราะว่ามีแรงดึงดูดระหว่าง อิเล็กตรอน และอะตอม ของ โลหะยังมีอยู่

#### 2. การทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุด และเคลื่อนที่ไปด้วยความเร็วสูง

วิธีที่จะทำให้อนุภาคอิเล็กตรอนหลุดจากอะตอมไปได้ คือ ต้องหาสิ่งที่มีพลังงานหรือแรงดึงดูด มากกว่าแรงดึงดูดระหว่างอิเล็กตรอนกับอะตอมของ โลหะมาดึงดูดอิเล็กตรอนส่งนั้นก็ คือ ไฟฟ้าแรงสูง (High voltage) ไฟฟ้าแรงสูงนี้ นอกจากจะทำให้อิเล็กตรอน หลุดจากผิวหน้าของโลหะ แล้ว ยังทำให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่หรือวิ่งไปด้วยความเร็วสูง กล่าวอีกอย่างหนึ่งคือ ต้องทำให้ไฟฟ้าระหว่างขั้วบวกและขั้วลบให้ต่างกัน ความต่างศักย์นี้ ถ้ายังมีค่ามากขึ้นเท่าใด ก็ยิ่งทำให้อิเล็กตรอน หลุดจากผิวหน้าของไส้หลอด ได้มาก และวิ่งไปด้วยความเร็วสูงขึ้น ความต่างศักย์ 100 Kilo-voltage จะทำให้อิเล็กตรอน มีความเร็ว เท่ากับประมาณ 165 กิโลเมตรต่อวินาที

#### 3. การทำให้เส้นทางที่อิเล็กตรอนวิ่งผ่านไปต้องไม่มีสิ่งกีดขวาง

- จึงจะทำให้อิเล็กตรอนวิ่งไปด้วยความเร็วสูง

- ดังนั้น ภายในหลอดเอ็กซ์เรย์จึงเป็นสุญญากาศ เพราะถ้ามีอากาศหรือก๊าซอยู่ภายในหลอด แม้เพียงเล็กน้อยก็ตาม ความเร็วของอิเล็กตรอนจะลดลง เนื่องจากเกิด ไอออนไนเซชัน (Ionization)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. การทำให้อิเล็กตรอนมีความเข้มข้น (Concentration of electron)

- จะต้องมีวิธีการที่จะให้อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ไปในแนวทิศทางเดียวกัน คือ พุ่งไปหาจุดโฟกัสของเป้าด้วยปริมาณ (ความเข้มข้น) ที่มากพอสมควร ซึ่งทำให้ได้โดยการใช้ เครื่องมือที่เรียกว่า "Electron focusing device" คอยควบคุม ให้อิเล็กตรอนส่วนใหญ่ ไปตกในบริเวณจุดโฟกัสของเป้า

#### 5. การทำให้อิเล็กตรอนหยุดวิ่งในทันทีทันใด

- การที่จะให้อิเล็กตรอนที่วิ่งมาด้วยความเร็วสูงนี้หยุดวิ่งในทันทีทันใดทำได้โดยหาวัสดุมาถนัด หรือขวางอิเล็กตรอน วัสดุนั้นก็คือ เป้า (Target) ผลที่เกิดขึ้น คือ เกิดการชน หรือ กระแทกกันระหว่างอิเล็กตรอนกับเป้าอย่างแรง อิเล็กตรอนดังกล่าวจะไปชนอิเล็กตรอน ที่อยู่ในวงโคจรของอะตอมของเป้านั้น ให้หลุดกระเด็นออกนอกวงโคจร และจะมีอิเล็กตรอน จากวงโคจรอื่นๆ ที่อยู่ถัดไปวิ่งเข้ามาแทน แต่เนื่องจาก พลังงาน ของอิเล็กตรอนในแต่ละวงโคจร จะไม่เท่ากัน ดังนั้น จึงมีการคายพลังงานส่วนเกินออกมา ในรูปของรังสีเอ็กซ์และความร้อน (ส่วนใหญ่จะเป็นความร้อนมากกว่า) กล่าวคือ จากพลังงาน ของอิเล็กตรอนทั้งหมดที่วิ่ง ไปสู่เป้านั้น 99.8% จะเปลี่ยนเป็นความร้อน และ 0.2 % เป็นรังสีเอ็กซ์

### 2.6 อันตรายจากรังสี

ผลของรังสีที่มีต่อร่างกายแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. ผลที่เกิดกับร่างกาย (Somatic effect) หมายถึง ผลที่เกิดขึ้นกับส่วนใดส่วนหนึ่งของร่างกายทั้งนี้ขึ้นอยู่กับว่า การรับรังสี นั้นเป็นแบบเฉียบพลันหรือเรื้อรัง และปริมาณรังสีมากน้อยแค่ไหน ผลของการรับรังสีแบบเฉียบพลันซึ่งมักเกิดจากอุบัติเหตุให้ได้ รับรังสีปริมาณมากทันที ถ้ามากกว่า 50 Rems ขึ้นไป จะมีอาการป่วยเนื่องจากรังสีถ้ามากกว่า 400 Rems อาจทำให้ตายได้ ส่วนการ รับรังสีเรื้อรังในปริมาณต่ำ ๆ เกิดกับผู้ที่มิอาจหลีกเลี่ยงกับรังสีโดยตรง อาจมีผลทำให้อายุเฉลี่ยสั้นกว่าปกติ เป็นมะเร็ง ต้อกระจก เป็นต้น

2. ผลที่เกิดขึ้นทางพันธุกรรม (Genetic effect) หมายถึงผลที่เกิดขึ้นในเซลล์สืบพันธุ์ อาจทำให้เป็นหมัน หรือ เกิดการแตกเหล่า (Mutation) ซึ่งมีผลกระทบต่อรุ่นลูกหลานได้

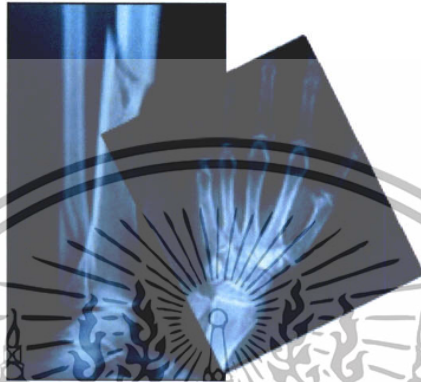
### 2.7 X-Ray Detectors [6]

จากทฤษฎีบทของรังสีเอ็กซ์ เราจะมีอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับรังสีเอ็กซ์ได้อยู่หลายชนิด ซึ่งแต่ละชนิดจะมีเหมาะสมกับรังสีเอ็กซ์ที่มีพลังงานต่างๆ กันไปตามการใช้งาน ซึ่งชนิดของอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอ็กซ์มีดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.7.1 X-Ray Film

อุปกรณ์ชนิดแรกที่จะกล่าวถึงคือ การใช้ฟิล์ม ซึ่งเป็นวิธีที่ยังใช้กันโดยมาก ซึ่งมีหลักการเหมือนกันกับการถ่ายภาพ โดยการใช้งานก็เป็นการให้รังสีเอกซ์ฉายลงไปบนฟิล์มก็จะเกิดเป็นภาพแล้วนำไปล้าง (developed) เช่นเดียวกันกับการได้มาซึ่งภาพถ่าย โดยไม่ต้องมีกระบวนการใดๆอีก



รูปที่ 2.2 แสดงภาพที่ได้จากการฉายรังสีเอกซ์

แม้ว่าฟิล์มจะง่ายต่อการใช้งานและภาพที่ได้มีความละเอียดสูง แต่มันก็มีข้อด้อยตรงที่ว่า มันแสดงระดับความแตกต่างของพลังงานได้น้อยมาก

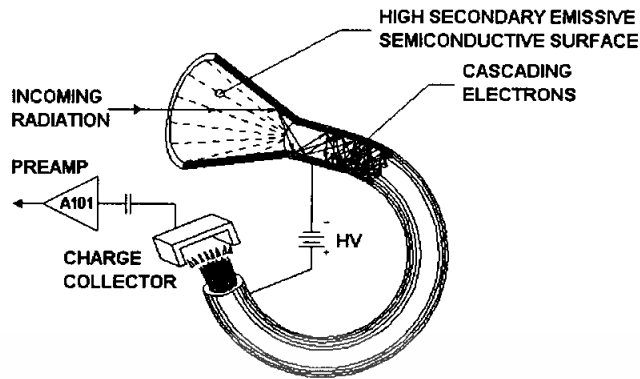
### 2.7.2 Resists

Resists ประกอบด้วย long chain polymers เคลือบอยู่บนชั้นฐานรองด้วยความหนาประมาณ 50-2000 นาโนเมตร โดยมันมีคุณสมบัติที่หลังจากมีการฉายรังสี จะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่ทำให้ผิวมีลักษณะเหมือนรูปร่างของรังสีที่ตกกระทบ

Resists ที่ใช้โดยทั่วไปมีทั้งชนิดบวกและลบ (เหมือนกับน้ำยาไวแสงในกระบวนการ Fabrication) ส่วนในเรื่องของการตอบสนองต่อรังสี Resists มีการตอบสนองไม่เป็นเชิงเส้นอย่างมาก ซึ่งมันเป็นข้อดีสำหรับการบันทึกรูปที่มีเพียงสองระดับสี เช่นการทำแบบมาร์กของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ แต่ข้อเสียของมันก็คือคล้ายกับฟิล์มคือแสดงความแตกต่างของระดับพลังงานได้น้อย

### 2.7.3 Channel Electron Multipliers (CEMs)

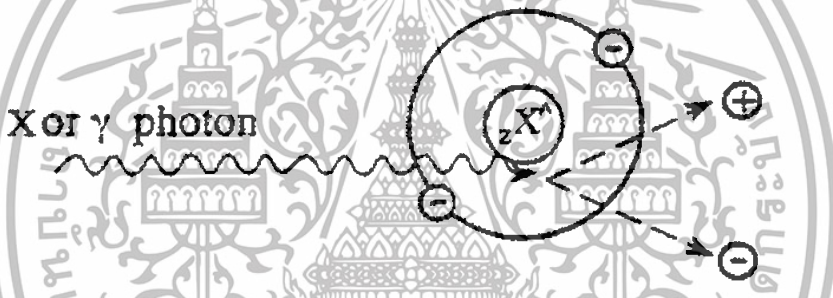
Channel Electron Multipliers ถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการการตรวจนับโฟตอนของรังสีเอกซ์ (ส่วนมากจะใช้กับรังสีเอกซ์ประเภทซอฟท์: Soft X-Rays) เช่น X-Ray spectroscopy และ X-Ray astronomy อาศัยความสามารถในการตรวจจับพลังงานของอนุภาคที่เข้ามา และบางครั้งถูกนำไปใช้เพื่อเพิ่มการปล่อยโฟตอนของไดโอด โดยโฟตอนของรังสีเอกซ์จะสามารถตรวจจับได้โดย photocathode และ electron multiplication scheme ซึ่งต่อมามีการพัฒนา CEMs ให้มีลักษณะเป็นช่องเล็กๆ และมาประกอบกันเป็นอาร์เรย์ ซึ่งมีรูปร่างเป็นเพลต เรียกว่า Microchannel Plates (MCPs) เอกสารนี้ยังเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.3 Microchannel Plates (MCPs)

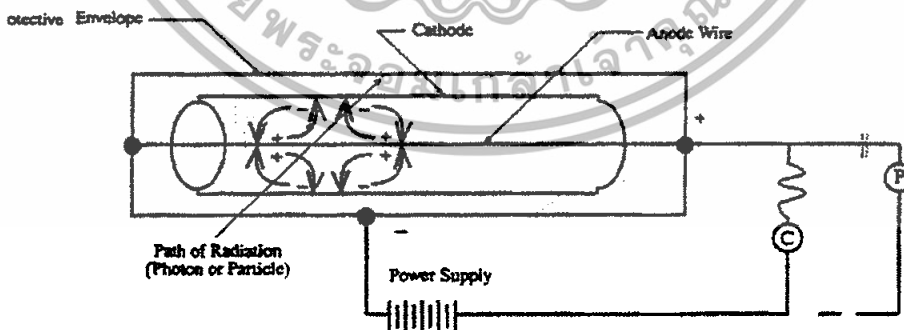
2.7.4 Gas Detectors

เมื่ออะตอมของก๊าซได้รับรังสีเอกซ์จะทำให้เกิดการไอออไนซ์ได้ไอออนออกมา แล้วใช้อุปกรณ์ขยายมาตรวจจับไอออนเหล่านี้



รูปที่ 2.4 แสดงหลักการ Gas Detectors

หลักการนี้ใช้ได้กับรังสีเอกซ์ในทางดาราศาสตร์และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน ก๊าซที่ใช้ในอุปกรณ์นี้ได้แก่ ฮีเลียม (He), นีออน (Ne), อาร์กอน (Ar), คริปทอน (Kr), หรือ ซีซีนอน (Xe)



รูปที่ 2.5 แสดงวงจร Gas Detectors

2.7.5 Scintillation Detectors

ซินทิลเลเตอร์ คือวัสดุที่เมื่อได้ดูดกลืนโฟตอนแล้วจะมีการกระตุ้นสถานะทางอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งภายหลังจะปล่อยโฟตอนของแสงออกมา แล้วแสงนี้จะถูกส่งต่อไปที่โฟโต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แคโทด (Photocathode) ของโฟโตมัลติพลายเออร์ (photomultiplier) ซึ่งจะกำเนิดสัญญาณพัลส์ของอิเล็กตรอนออกมา

วัสดุที่สามารถนำมาใช้เป็นซินทิลเลเตอร์ได้มีอยู่หลายชนิดเช่น พลาสติก (plastics) ของเหลว(liquid) ผลึกสารอินทรีย์ (organic crystals) ผลึกสารอนินทรีย์ (inorganic crystals) และก๊าซ (gases) แต่ที่ให้แสงออกมามากที่สุดคือ ผลึกสารอนินทรีย์

ซินทิลเลชันดีเทคเตอร์สามารถทำงานได้ดีในช่วงพลังงาน keV - MeV แต่มีความละเอียดของตำแหน่งในการตรวจจับต่ำและมีขนาดใหญ่และไม่ทนทาน แต่ด้วยว่าราคาที่ไม่แพงจึงมีการนำไปใช้มาก

### 2.7.7 Phosphors

ฟอสเฟอร์เป็นอีกวัสดุหนึ่งที่สามารถตรวจวัดรังสีเอกซ์ได้โดยมีหลักการเหมือนกับซินทิลเลชันดีเทคเตอร์ คือสามารถเปลี่ยนรูปพลังงาน โฟตอนของรังสีเอกซ์ไปอยู่ในรูปของโฟตอนของแสงที่ตามองเห็น (visible light photon) ฟอสเฟอร์จะถูกใช้ร่วมกับตัวตรวจจับแสงเช่น CCD(charge couple device) หรือ MCP (Microchannel Plates)

### 2.7.8 Silicon Detectors

จากหลักการเกิดกระแสไฟฟ้าแสง (Photoelectric current) สามารถนำมาประยุกต์กับโฟตอนของรังสีเอกซ์ได้ว่า เมื่ออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้ดูดกลืนพลังของโฟตอนของรังสีเอกซ์จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งจะทำให้มีกระแสไฟฟ้าเกิดขึ้น

โดยปกติเราจะใช้งานสารกึ่งตัวนำนี้ในช่วงพลังงานประมาณ 1-100 keV และสามารถปรับปรุงคุณสมบัติการใช้งานต่างให้ดีขึ้นได้ด้วยการออกแบบ โครงสร้างของอุปกรณ์ให้มีโครงสร้างที่เหมาะสมกับการใช้งานในย่านต่างๆ เช่น โครงสร้าง PIN เป็นต้น

อุปกรณ์ประเภทนี้มีประโยชน์ที่เด่นมากในหลายๆ ด้าน เช่น สามารถสร้างให้มีขนาดเล็กและมีความเร็วสูงได้ซึ่งใช้ในงาน CT Scanners โครงสร้างไม่ซับซ้อนสร้างได้ง่าย ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นยุคของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีการพัฒนาและวิจัยกันอย่างกว้างขวาง อีกทั้งยังสามารถบันทึกข้อมูลของภาพรังสีเอกซ์ในรูปของดิจิทัลโดยภาพการประมวลผลทางภาพได้เลย ซึ่งจากข้อดีต่างๆ นี้เราจึงเลือกอุปกรณ์ตรวจจับรังสีเอกซ์ประเภทนี้ มาศึกษาในโครงการวิจัยนี้

## 2.8 การนำรังสีเอกซ์ไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ

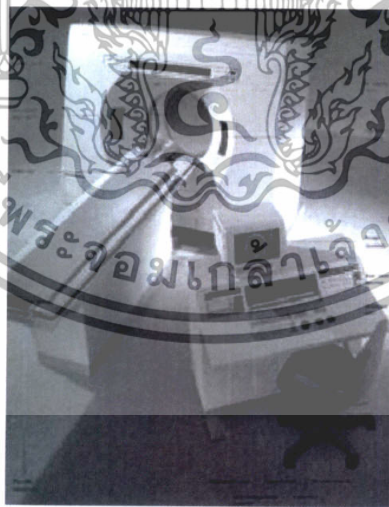
### 2.8.1 การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์

ตั้งแต่การค้นพบของ Roentgen ว่ารังสีเอกซ์สามารถบอกรูปร่างของกระดูกได้ รังสีเอกซ์ได้ถูกพัฒนาเพื่อนำมาใช้ในการถ่ายภาพในการแพทย์ นำไปสู่สาขาที่เรียกว่า รังสีวิทยา โดยนักรังสีวิทยาได้ใช้ ภาพถ่าย (radiography) ที่ได้มาใช้ในการช่วยการวินิจฉัยโรคนั้นเอง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รังสีเอกซ์มักถูกนำมาใช้ในการตรวจหาสภาพทางพยาธิวิทยาของกระดูก แต่ก็สามารถหาความผิดปกติของบางโรคที่เป็นที่เนื้อเยื่อทั่วไปได้ ตัวอย่างที่พบเห็นได้ทั่วไปเช่นการเอกซเรย์ปอด ซึ่งสามารถบอกถึงความผิดปกติได้หลายโรค เช่น โรคปอดบวม (pneumonia) โรคมะเร็งปอด (lung cancer) หรือน้ำท่วมปอด (pulmonary edema) รวมถึงการเอกซเรย์ช่องท้อง เช่นการตรวจภาวะอุดตันในลำไส้เล็ก (ileus) ภาวะลมหรือของเหลวคั่งในช่องท้อง ในบางครั้งยังใช้ในการตรวจหาเนื้องอกในน้ำดี หรือนิวในกระเพาะปัสสาวะได้ รวมทั้งในบางกรณีสามารถใช้ในการถ่ายภาพเนื้อเยื่อบางชนิด เช่น สมองและกล้ามเนื้อได้ แต่นับแต่ในปี 2005 รังสีเอกซ์ถูกขึ้นบัญชีในรัฐบาลสหรัฐอเมริกาว่าเป็นสารก่อมะเร็ง การถ่ายภาพเนื้อเยื่อส่วนใหญ่จึงถูกพัฒนาโดยใช้เทคนิค CAT หรือ CT scanning (computed axial tomography) หรือใช้เทคนิค MRI (magnetic resonance imaging) หรือ ultrasound ทดแทน

ปัจจุบันการรักษาโรคมะเร็งส่วนใหญ่ได้มีการนำรังสีมาช่วยในการรักษาโรค (radiotherapy) และได้มีการรักษาพยาธิสภาพต่างๆ เช่น การรักษาแบบ real-time ในการผ่าตัดถุงน้ำดี การขยายหลอดเลือด (angioplasty) หรือการกลืนสาร barium enema เพื่อตรวจสภาพลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ โดยการใช้ fluoroscopy

### 2.8.2 การประยุกต์ใช้งานใน เครื่อง CT scanner



รูปที่ 2.6 เครื่อง CT scanner

CT scanner เป็นเครื่องที่ใช้ในการวิจัยเกี่ยวกับรูปซึ่งจะใช้รังสีเอกซ์ควบคู่กับเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ เพื่อให้ได้ภาพออกมา ภาพที่ได้ออกมาจะแสดงถึงส่วนต่างๆของร่างกาย เช่น กระดูก, กล้ามเนื้อ, ไขมัน, อวัยวะ และ เส้นเลือด ซึ่ง CT scanner จะบ่งบอกถึงรายละเอียดต่างๆได้ดีกว่าการฉายรังสีเอกซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการฉายภาพของรังสีเอ็กซ์โดยทั่วไป จะฉายรังสีเอ็กซ์ออกไปยังส่วนของร่างกายที่ต้องการจะตรวจสอบ ซึ่งจะมีแผ่นที่ใช้รับรังสีเอ็กซ์วางไว้ด้านหลังของส่วนร่างกายที่ทำการตรวจสอบ รังสีเอ็กซ์ที่ผ่านของส่วนของร่างกายนั้นจะแสดงภาพออกมาที่แผ่นรับรังสีที่อยู่ด้านหลัง โดยภาพที่เห็นจะมีส่วนที่เป็นกระดูก, กล้ามเนื้อ และส่วนที่เป็นเนื้อหนังต่างๆ เป็นต้น ในส่วนที่เป็นอวัยวะจะไม่สามารถรับภาพได้

เครื่อง CT scanner จะมีหลักการคือ ในการฉายภาพของคอมพิวเตอร์ รังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอบๆร่างกายที่ต้องจะตรวจ การที่รังสีเอ็กซ์จะเคลื่อนที่ไปยังบริเวณรอบๆร่างกายจะทำให้มีมุมมองหลายๆ มุมมองที่ตรวจสอบอวัยวะ ซึ่งจะ ได้ภาพที่มีข้อมูลมากกว่าการฉายรังสีเอ็กซ์โดยทั่วไป รังสีเอ็กซ์ทำหน้าที่ในการส่งข้อมูลมายังคอมพิวเตอร์ ซึ่งคอมพิวเตอร์จะทำหน้าที่ในการแปลข้อมูลและแสดงรูปออกมาเป็น 2 มิติ ในอนาคตจะมีเทคโนโลยีที่ออกมาใหม่นั้นคือจะสามารถภาพออกมาเป็นรูป 3 มิติ

เครื่อง CT scanner สามารถจะวินิจฉัยโรค, ตรวจสอบการไหลของเลือด และ เซ็กสภาพร่างกายว่ามีส่วนที่บาดเจ็บภายในร่างกายได้

#### หลักการการทำงานของเครื่อง CT scanner

เครื่อง CT scanner จะใช้ในการสร้างภาพทางการแพทย์ หรือ Medical Imaging ซึ่งหลักการในการสร้างภาพ ซึ่งมีหลักการคือ

เครื่อง CT scanner เป็นการสร้างภาพที่มาจาก การดูดกลืนรังสีที่ผ่านทะลุวัตถุต่าง ๆ ออกมา หรือ โดยใช้การสร้างภาพของการลดทอนรังสี (n) เรียกแบบแรกนี้ว่า Transmission แต่ว่า ค่ามิว ในจินตนาการของทุกคนมันจะแตกต่างกันที่ใช้ในการสร้างภาพคือ มันตรงข้ามกันครับ สิ่งที่เรานำมาใช้ในการสร้างภาพคือ ภาพของอวัยวะที่สามารถดูดกลืนรังสีได้แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของอิเล็กตรอน คุณสมบัติของการดูดกลืนที่แตกต่างกันนี้แหละ ที่ทำให้เกิดคอนทราสต์ของภาพได้

#### 2.8.3 การประยุกต์ใช้งานในด้านอื่น

รังสีเอ็กซ์ได้ถูกพัฒนานำไปใช้ในหลายสาขา เช่น การวิเคราะห์ลักษณะของอะตอมและการผลิตโดยอาศัยการเบี่ยงเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray crystallography) การวิจัยทางดาราศาสตร์ที่อาศัยการปลดปล่อยรังสีเอ็กซ์ที่มาจากวัตถุในวัตถุ (X-ray astronomy) การถ่ายภาพและผลิตภาพในขนาดเล็ก (x-ray microscopic analysis) รวมทั้งการตรวจหารอยร้าวขนาดเล็กในโลหะ การติดตามผลของตัวอย่างในการวิจัยโดยอาศัยคุณสมบัติของรังสีเอ็กซ์ (X-ray fluorescence) รวมถึงใช้ตรวจหาอาวุธปืนหรือระเบิดในกระเป๋าเดินทาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3

## ทฤษฎีการตรวจจับแสง

### 3.1 ทฤษฎีควอนตัม

แมกซ์ พลังค์ ได้เสนอทฤษฎีควอนตัม (Quantum theory) และอธิบายเกี่ยวกับการเปล่งรังสีว่า รังสีแม่เหล็กไฟฟ้าที่เปล่งออกมามีลักษณะเป็นกลุ่มๆ ซึ่งประกอบด้วยหน่วยเล็ก ๆ เรียกว่าควอนตัม (quantum) ขนาดของควอนตัมขึ้นกับความถี่ของรังสี และแต่ละควอนตัมมี พลังงาน (E) โดยที่ E เป็นปฏิภาคโดยตรงกับ ความถี่ ( $\nu$ ) ดังนี้

$$E = h\nu$$

เมื่อ E = พลังงานหนึ่งควอนตัมแสง (J)

$h$  = ค่าคงที่ของพลังค์ ( $6.62 \times 10^{-34}$  Js)

$\nu$  = ความถี่ (Hz)

จากทฤษฎีควอนตัมนี้ กลุ่มของอะตอมที่สั่นด้วยความถี่สูงจะเปล่งแสงที่มีพลังงานสูง ๆ เท่านั้น ที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ โอกาสที่จะพบอะตอมที่สั่นสะเทือนด้วยความสูงมาก ๆ หรือต่ำมาก ๆ นั้นมีน้อย ดังนั้นความเข้ม (ซึ่งขึ้นกับพลังงานและจำนวนอะตอม) ของพวกที่มีความถี่ดังกล่าวจึงน้อยกว่า ซึ่งตรงกับผลการทดลองที่กราฟเส้นโค้งแสดงในบริเวณที่มีความถี่สูงมาก และต่ำมาก (หรือถ้าคิดเป็นความยาวคลื่นก็กลับกัน) นอกจากนี้ แม้อะตอมต่างๆ จะสั่นด้วยความถี่ต่างกัน จะมีความถี่ค่าหนึ่งที่เป็นของอะตอมส่วนใหญ่ ความถี่ค่านี้เพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ซึ่งใช้อธิบายการเปลี่ยนจุดสูงสุดของกราฟกับอุณหภูมิได้

"ทฤษฎีควอนตัม" หรือ Quantum Theory เป็นทฤษฎีพื้นฐานของฟิสิกส์ยุคใหม่ เพิ่งเกิดเมื่อต้นศตวรรษที่ 20 ก่อนทฤษฎีพื้นฐานสัมพันธภาพของไอน์สไตน์ ต่อมาเมื่อมีทฤษฎีสัมพันธภาพของไอน์สไตน์ ทั้งสองทฤษฎีนี้ (คือทฤษฎีควอนตัมและทฤษฎีสัมพันธภาพ) ก็กลายเป็นทฤษฎีที่เป็นหัวใจสำคัญของฟิสิกส์ยุคใหม่ทั้งหมด

#### 3.1.1 ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect)

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก เป็นที่รู้จักกันมาก่อนยุคสมัยทฤษฎีควอนตัม แต่ไม่มีใครสามารถใช้ทฤษฎีคลาสสิกอธิบายผลการทดลองได้ จากการทดลอง เฮิร์ตซ์ (Hertz) เป็นผู้ค้นพบว่าเมื่อแสงตกกระทบผิวโลหะอาจทำให้อิเล็กตรอนหลุดจากผิวโลหะได้ อิเล็กตรอนเหล่านี้เรียกว่า โฟโตอิเล็กตรอน (photoelectron) จากผลการทดลองพบว่า

-พลังงานของโฟโตอิเล็กตรอน ไม่ขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลง 82435 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

-จะไม่มีโฟโตอิเล็กตรอนเกิดขึ้น หากความถี่ของแสงต่ำกว่าระดับช่องว่างพลังงาน

ทฤษฎีคลาสสิกไม่สามารถอธิบาย ผลการทดลองที่เกิดขึ้นได้ เนื่องจาก ตามทฤษฎีแม่เหล็กไฟฟ้าของแมกซ์เวลล์ พลังงานของคลื่นแสงน่าจะแปรตามความเข้มของแสง เมื่อใช้ความเข้มของแสงสูงก็ว่าจะเกิดโฟโตอิเล็กตรอนพลังงานสูง

จนกระทั่ง ไอน์สไตน์ประยุกต์ใช้แนวความคิดของแพลงค์ อธิบายว่า แสงเป็นลำของอนุภาคโฟตอน แต่ละโฟตอนมีพลังงานและมีโมเมนตัม ในการที่แสงตกกระทบโลหะ หากพลังงานของแสงสูงกว่าของโลหะ (ซึ่งเป็นค่าที่บอกว่าโลหะยึดอิเล็กตรอนไว้เหนียวแน่นเพียงใด) จะมีโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมา โฟโตอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะมีพลังงานจลน์ได้สูงสุดเท่ากับ จึงสามารถกล่าวได้ว่าค่า ฟังก์ชันงาน (Work function) คือค่าพลังงานที่แสงต้องเอาชนะในการทำให้โฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมาได้พอดี

ข้อสังเกตทั้งสามข้อจากการทดลอง สามารถอธิบายได้ด้วยทฤษฎีควอนตัม ซึ่งตามทฤษฎีนี้แสงเป็นอนุภาคที่มีพลังงานเพิ่มขึ้นตามความถี่ ไม่ใช่ความเข้ม เมื่อความถี่มาก พลังงานสูงตกกระทบโลหะ ก็จะทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนพลังงานสูงตามไปด้วย ในข้อสองหากแสงที่ตกกระทบมีความถี่ไม่พอที่จะทำให้ พลังงานแสงมากกว่า Work Function ของ โลหะแล้ว แม้จะมีความเข้มเพียงใดก็ไม่สามารถทำให้เกิดโฟโตอิเล็กตรอนหลุดออกมาได้

### 3.1.2 ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect)

หลักฐานชิ้นต่อมาที่สนับสนุนทฤษฎีควอนตัม คือ ปรากฏการณ์คอมป์ตัน ซึ่งก่อนหน้ายุคของทฤษฎีควอนตัม ไม่สามารถอธิบายผลการทดลองด้วยทฤษฎีใดๆ ได้ ในการทดลอง การฉาย X-ray กระแทกกับอิเล็กตรอน จะทำให้ X-ray กระจิง ผลการทดลอง ความถี่ของ X-ray ที่กระจิงมีได้หลายความถี่ที่สัมพันธ์กับมุมกระจิง นอกจากนี้ ทำให้อิเล็กตรอนกระจิงไปด้วย

ตามทฤษฎีคลาสสิก (นิวตัน และ แมกซ์เวลล์) ความถี่ของ X-ray ที่กระจิงควรสัมพันธ์กับความเข้มของคลื่นที่ตกกระทบ และ อิเล็กตรอนจะกระเด็นไปในแนวของคลื่นที่ตกกระทบ การทดลองโฟโตอิเล็กทริกและกราฟที่ได้จากการทดลอง

ทฤษฎีควอนตัมสามารถอธิบายผลที่เกิดขึ้นได้ โดยแนวคิดว่า X-ray เป็นอนุภาคโฟตอนที่พุ่งเข้าชนอิเล็กตรอน เหมือนลูกบิลเลียดชนกัน ทำให้ X-ray และอิเล็กตรอนต่างกระจิงออกจากแนวการเคลื่อนที่เดิม มุมกระจิงของ X-ray จะขึ้นกับความถี่ที่สามารถพิสูจน์เป็นสูตร Compton Shift Equation ได้

### 3.2 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ [2]

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายใน ประกอบด้วย การดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งจะแตกต่างกันในสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง

#### 3.2.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

คู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระนั้นเกิดจากพลังงานความร้อนจากภายนอก นอกจากนี้ยังเกิดจากพลังงานโฟตอนจากแสงได้อีก ในทางฟิสิกส์ควอนตัมคลื่นแสงจะถูกพิจารณาว่ามีสมบัติเป็นอนุภาค โดยเรียกอนุภาคของแสงว่า "โฟตอน" และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงโดย

จากสมการ

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \text{ eV}$$

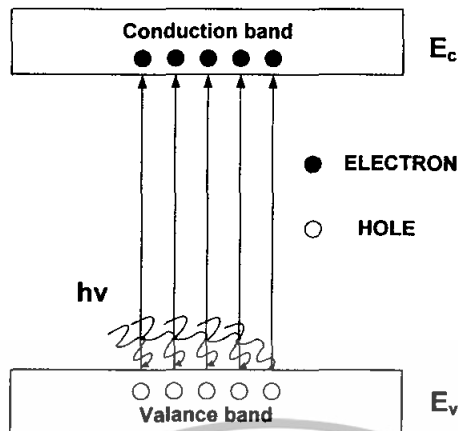
โดยที่  $v$  คือ ความถี่ (Hz)

$\lambda$  คือ ความยาวคลื่นแสง (nm)

$h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $4.136 \times 10^{-15}$  eV-sec

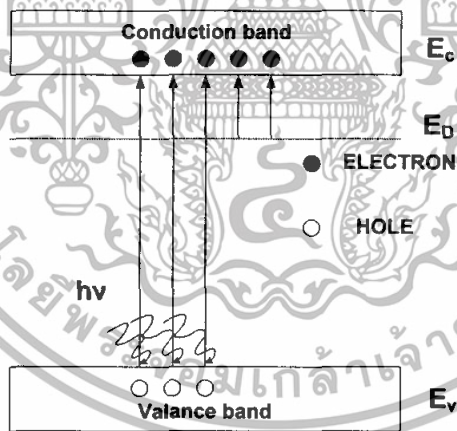
$c$  คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ  $3 \times 10^8$  m/sec

กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก (intrinsic semiconductor) จะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap :  $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง แต่ถ้า  $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{scmi})}$  การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น ซึ่งโฟตอนที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะต้องมีพลังงานมากกว่า 1.12 eV หรือโฟตอนมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1110 nm ซึ่งความยาวคลื่นมากที่สุดที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนนี้เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (long wavelength cutoff :  $\lambda_{\text{max}}$ )



รูปที่ 3.1 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

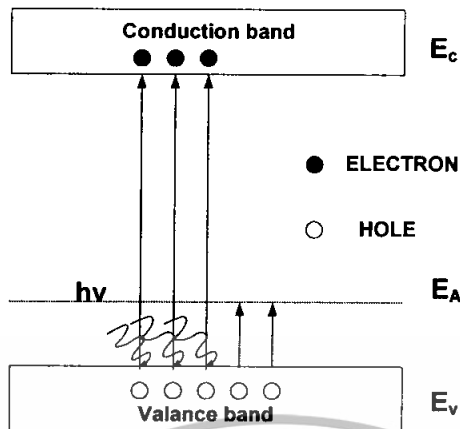
สำหรับ n-type semiconductor จะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (Donor level:  $E_D$ ) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้ให้จะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูป 3.2 ก



รูปที่ 3.2 ก การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิก ชนิดเอ็น

ส่วน p-type semiconductor จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (Acceptor level:  $E_A$ ) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้รับจะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแถบวาเลนซ์ ( $E_V$ ) ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานน้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานจะสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ หลุดไปอยู่ในระดับผู้รับ ได้ดังแสดงในรูป 3.2 ข

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

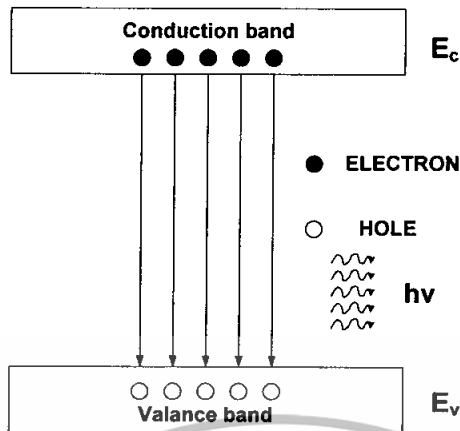


รูปที่ 3.2 ข การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสง  
ในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิกชนิดพี

### 3.2.2 การรวมตัวกันของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

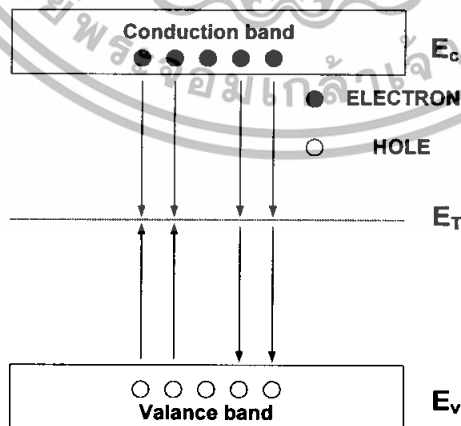
การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด กล่าวคือเป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะคืออิเล็กตรอนและโฮลหายไป พลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลง คือ พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการชนกับแลตทิซในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกรวมกันว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุล ความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานความร้อนจะทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นและรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยสามารถแบ่งกระบวนการรวมตัวใหม่ได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบ โดยตรง (Direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปคล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูป 3.3 ก ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอนได้ง่าย



รูปที่ 3.3 ก กระบวนการการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบโดยตรง

2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (Indirect recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับลงไปยังระดับพลังงานหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะลงไปแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูป 3.3 ข ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆหรืออาจเกิดจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผลทำให้มีการสั้นของเลทที่สได้ และการสั้นของเลทที่สจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานเรียกว่า โฟนอน ออกมาในที่สุด



รูปที่ 3.3 ข กระบวนการการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำแบบโดยอ้อม

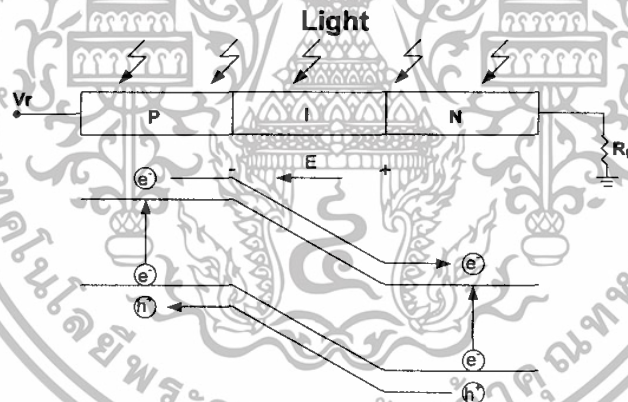
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.3 หลักการทำงานของโฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่ตรวจจับสัญญาณรังสีต่างๆ เช่น แสง, รังสีเอ็กซ์, รังสีอินฟราเรด เป็นต้น นำไปเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า การทำงานโฟโตไดโอดจะมี 3 ขั้นตอนหลักเริ่มจาก

1. เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากการดูดกลืนแสง
2. คู่อิเล็กตรอนที่ผ่านชั้นดูดกลืนแสง
3. คู่อิเล็กตรอนที่ไปยังขั้วไฟฟ้าของอุปกรณ์และเกิดกระแสเอาพุทไหลออกจากอุปกรณ์

เมื่อแสงตกกระทบบนที่รอยต่อพี-เอ็น โฟตอนจากภายนอกเข้ามาบริเวณปลอดพาหะ โดยโฟตอนจะต้องมีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำที่ตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น พาหะที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ผลักให้เคลื่อนที่ในทิศตรงกันข้ามกันข้ามกันโดยโฮลไปทางด้านพี และ อิเล็กตรอนจะไปทางด้านเอ็น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสขึ้นเรียกกระแสนี้ว่า กระแสแสง



รูปที่ 3.4 แสดงหลักการทำงานของโฟโตไดโอด

### 3.3 โหมดการใช้ทำงานของโฟโตไดโอด

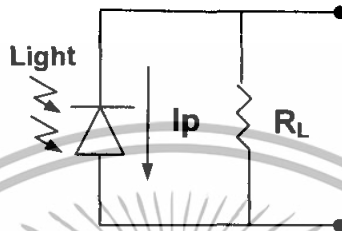
โหมดการใช้งานพื้นฐานของโฟโตไดโอดใช้งานได้เป็น 2 แบบ

1. โหมดโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic mode) คือ ไม่ต้องจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กลับโฟโตไดโอด
2. โหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive mode) คือ ต้องจ่ายแรงดันไบอัสกลับให้กับโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.1 โหมดโฟโตโวลโตอิก (Photovoltaic mode)

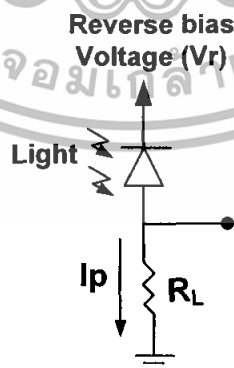
การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลโตอิก ไม่ต้องจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่โฟโตไดโอด ทำให้ไม่เกิดกระแสมีดในโฟโตไดโอด ดังนั้นอัตรา  $\text{signal to noise ratio}$  มีค่ามาก จึงเหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูงความเข้มแสงที่ใช้มีค่าน้อย และ ความถี่ไม่สูงมากนัก



รูปที่ 3.5 แสดงวงจรการทำงานของโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลโตอิก (Photovoltaic mode)

### 3.3.2 โหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive mode)

การใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ จะต้องจ่ายแรงดันไบอัสภายนอกทิศทางไบอัสย้อนกลับให้กลับรอยต่อพี-เอ็น จะทำให้เกิดกระแส 2 ชนิด คือ กระแสที่เกิดจากแสงและ กระแสรั่วไหลย้อนกลับ การจ่ายแรงดันไบอัสย้อนกลับให้แก่ไดโอดทำให้เวลาเคลื่อนที่ของพาหะลดลงเนื่องจากสนามไฟฟ้าภายในอิมิตัว ส่งผลให้ความเร็วการตอบสนองของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้น ทำให้  $\text{signal to noise ratio}$  ของโฟโตไดโอดมีค่าลดลงโดยที่ต่ำกว่าในโหมดโฟโตโวลโตอิก จึงไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความเที่ยงตรงสูง



รูปที่ 3.6 แสดงวงจรการทำงานของโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตคอนดักทีฟ (Photoconductive mode)

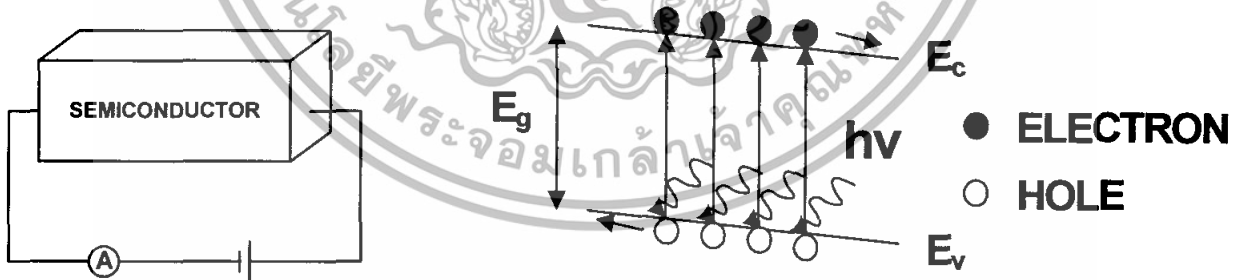
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4 ชนิดของโฟโตดีเทกเตอร์

โฟโตดีเทกเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ปัจจุบัน โฟโตดีเทกเตอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ โฟโตคอนดักเตอร์ และโฟโตไดโอด โดยในกลุ่มของโฟโตไดโอดยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายชนิดตามลักษณะโครงสร้าง เช่น พีเอ็นโฟโตไดโอด อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด ซ็อคกีย์โฟโตไดโอด และ พินโฟโตไดโอด

#### 3.4.1 โฟโตคอนดักเตอร์

โฟโตคอนดักเตอร์เป็นโฟโตดีเทกเตอร์ที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด สร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียวโดยไม่ต้องมีการแพร่อะตอมสารเจือเพื่อให้เกิดเป็นรอยต่อ มีการสร้างขั้วไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิคขึ้นที่ส่วนปลายของสารกึ่งตัวนำเพื่อจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.7 เมื่อมีแสงมาตกกระทบบน โฟโตคอนดักเตอร์จะทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบอะวาแลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้าและทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนในแถบความนำสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของโฮลในแถบวาเลนซ์ เมื่อให้แรงดันไบอัสจากภายนอกแก่ขั้วทั้งสองจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตกคร่อมภายในชั้นสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่กลับทิศกับสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วบวก ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ในทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วลบทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจร โดยกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงตกกระทบบและความสามารถในการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ



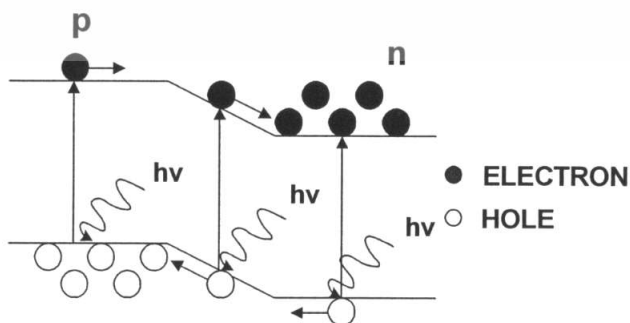
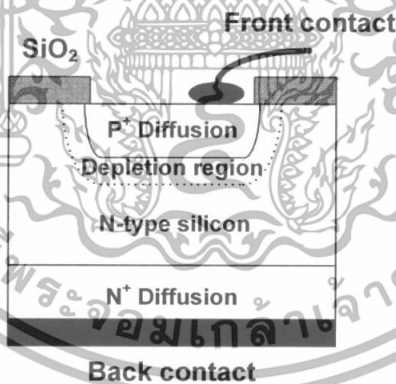
รูปที่ 3.7 โครงสร้างและแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์

คุณสมบัติเด่นของโฟโตคอนดักเตอร์คือ มีโครงสร้างง่าย และมีราคาถูก แต่ข้อด้อยที่สำคัญของโฟโตคอนดักเตอร์คือ ความเร็วในการตอบสนองช้า ซึ่งใช้เวลาอยู่ในระดับมิลลิวินาที โฟโตคอนดักเตอร์ที่มีขนาดใหญ่จะมีสภาพการตอบสนองที่ดีแต่จะใช้เวลาในการตอบสนองที่นานขึ้นด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.2 พี-เอ็นโฟโตไดโอด

พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) หรือโฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นทั่วไป แต่ได้ถูกออกแบบให้แสงสามารถตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็นได้ โครงสร้างทั่วไปของโฟโตไดโอดและแถบพลังงานของพี-เอ็นโฟโตไดโอดแสดงในรูป 3.8 ในขณะที่ใช้งานจะป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับรอยต่อพี-เอ็นทำให้นามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงขึ้นและบริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบบนพี-เอ็นโฟโตไดโอดและถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu \geq E_g$ ) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และทำให้เกิดโฮลขึ้นที่แถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p , บริเวณปลอดพาหะ , และชั้น n ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าในชั้น p จะแพร่ไปสู่ในชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายในทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้นเอ็น ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่วงจรภายนอก จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแปรโดยตรงกับความเข้มแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน



รูปที่ 3.8 โครงสร้างและแถบพลังงานของพี-เอ็น โฟโตไดโอด

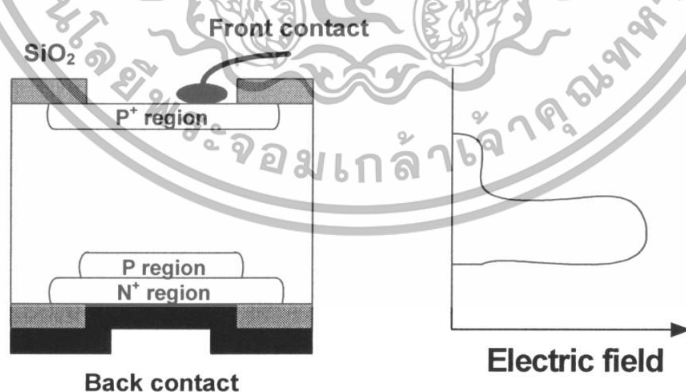
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติเด่นของพี-เอ็นโพโตไดโอด พบว่าจะทำงานได้เร็วกว่าโพโตคอนดักเตอร์ และมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่า แต่มีข้อด้อยคือ ในการประยุกต์ใช้งานบางประเภทซึ่งต้องทำงานด้วยความเร็วสูงมากๆ พี-เอ็นโพโตไดโอดไม่สามารถตอบสนองได้

### 3.4.3 ะวาลานซ์โพโตไดโอด

ะวาลานซ์โพโตไดโอด (Avalanche Photodiode: APD) มีโครงสร้างคล้ายพินโพโตไดโอด ดังแสดงในรูป 3.9 แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้โพโตไดโอดทำงานใกล้ๆกับจุดพังทลาย (breakdown point) ด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 300-500 โวลต์ ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ะวาลานซ์ขึ้น

ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามาชั้น  $p^+$  แสงจะถูกดูดกลืนในบริเวณชั้นปลอดพาหะ และเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่อุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น  $n^+$  และโฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น  $p^+$  ในการสร้างโพโตไดโอดชั้น  $\pi$  (สารกึ่งตัวนำชนิด  $p$  ที่ถูกโดอย่างเจือจาง) จะมีความต้านทานสูงกว่าชั้น  $p$  และชั้น  $p^+$  ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมที่ชั้น  $p$  มากที่สุด เป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดเข้ามาสู่ชั้น  $p$  จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้และวิ่งไปชนกับโครงร่างผลึกและทำให้ผลึกแตกตัวเกิดเป็นไอออน ซึ่งจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นสู่แถบนำไฟฟ้า และเกิดโฮลขึ้นใหม่ในแถบวาเลนซ์ และจะเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำๆ ตลอดเวลาที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้เกิดพาหะอิสระเป็นจำนวนมากมาย จึงทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น



รูปที่ 3.9 โครงสร้างของอะวาลานซ์โพโตไดโอด

ข้อได้เปรียบของอะวาลานซ์โพโตไดโอดคือ เป็นโพโตไดโอดที่มีการตอบสนองสูง (High sensitive photodiode) และมีอัตราขยายสัญญาณ (gain) ซึ่งมากกว่าพินโพโตไดโอด 50-300 เท่า แต่มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่สูงมาก และสัญญาณเอาต์พุตมีลักษณะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุตและสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจากมีอัตราขยายในโฟโตไดโอด

### 3.4.4 ซ็อดทึ่ย์โฟโตไดโอด

ซ็อดทึ่ย์โฟโตไดโอดสร้างขึ้นจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้น p จะถูกแทนด้วยฟิล์มโลหะที่บางมาก เช่น ทองคำหนาประมาณ 15 nm โครงสร้างของซ็อดทึ่ย์โฟโตไดโอดแสดงได้ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 โครงสร้างของซ็อดทึ่ย์โฟโตไดโอด

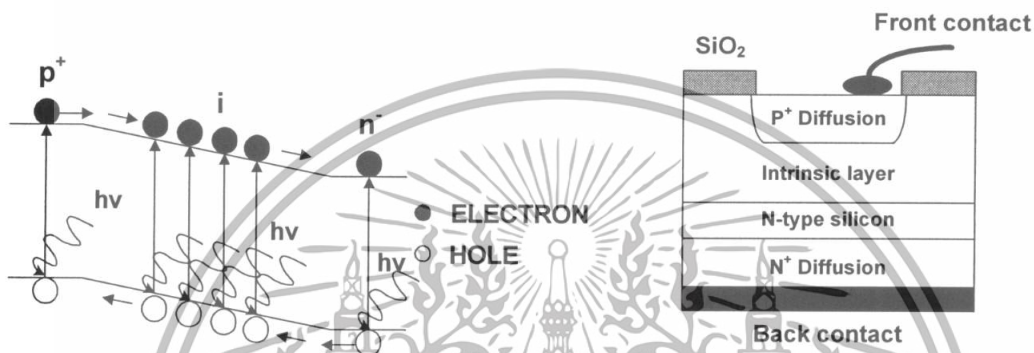
ชั้นฟิล์มโลหะบางๆ จะทำให้แสงสามารถผ่านทะลุชั้นโลหะลงไปได้ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นใต้ชั้นฟิล์มโลหะ โฟตอนที่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะบางๆจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ถ้าเปรียบเทียบกับพินโฟโตไดโอดแล้ว ซ็อดทึ่ย์โฟโตไดโอดจะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้โครงสร้างซ็อดทึ่ย์โฟโตไดโอดยังมีค่าความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูงกว่า สามารถประยุกต์ใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ได้ดี

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพควอนตัมต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอนและระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.4.5 พินโฟโตไดโอด

พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) หรือโฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n มีการพัฒนาขึ้นจาก p-n โฟโตไดโอด โดยภายในโครงสร้างมีการสร้างชั้น i ชั้น ตรงกลางระหว่างชั้น p และชั้น n ชั้น i นี้ หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีการเจือด้วยสารเจือปริมาณน้อยมาก โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอดแสดงรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอด

ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนจะถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดที่บางมาก ๆ เพื่อให้โฟตอนในแสงทะลุผ่านไปถึงชั้น i และที่ชั้น i นี้ มีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ เนื่องจากชั้น i มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน p<sup>+</sup> และด้าน n<sup>-</sup> เป็นผลให้เมื่อพินโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัส จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้น i และเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมที่ส่วน i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i

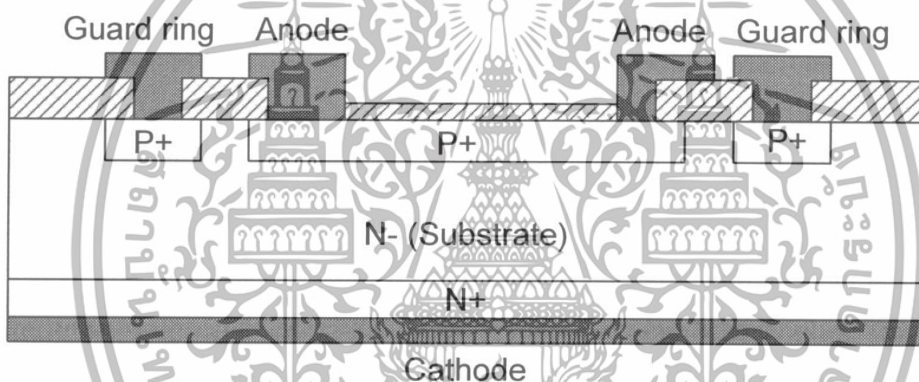
พินโฟโตไดโอดมีความเร็วในการทำงานสูงกว่า p-n โฟโตไดโอด เนื่องจากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองทางด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการการทำงานที่รวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสง เป็นต้น นอกจากนี้จะมีผลการตอบสนองด้านเวลารวดเร็วแล้ว พินโฟโตไดโอดยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่า p-n โฟโตไดโอด เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสง (i) ที่กว้างกว่าบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากรอยต่อ p-n แต่ข้อด้อยของพินโฟโตไดโอดก็คือ ถ้าสร้างให้มีพื้นที่ใหญ่จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง และกระบวนการสร้างของพินโฟโตไดโอดมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องสร้างชั้น i ให้มีความบริสุทธิ์ และต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 โครงสร้างการ์ดริง

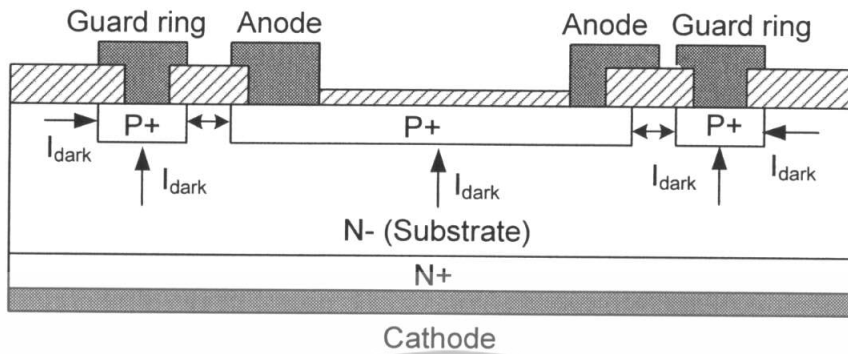
ในขณะที่โฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและไม่ได้รับแสงจะมีกระแสรั่ว หรือ กระแสมืดไหลผ่านไดโอด โดยกระแสรั่วนี้เกิดมาจากในเนื้อสาร และ บริเวณผิวสัมผัส Si/SiO<sub>2</sub> ของตัวตรวจจับ กระแสรั่วเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตไดโอด การสร้างชั้นการ์ดริง (Guard ring) จะช่วยลดกระแสรั่วที่เกิดขึ้นในเนื้อสารและบริเวณผิวสัมผัส Si/SiO<sub>2</sub> ของตัวตรวจจับ

การ์ดริงเป็นชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีเข้มข้น (ชั้น P<sup>+</sup>) เหมือนพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดที่สร้างล้อมรอบโฟโตไดโอดเอาไว้เพื่อช่วยลดกระแสมืด โครงสร้างโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง แสดงได้ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 แสดง โครงสร้างโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวตั้งที่มีการ์ดริง

ในการทำงานการ์ดริงจะได้รับแรงดันไบอัสเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้กับโฟโตไดโอด โดยที่กระแสมืดจะเกิดขึ้นนอกบริเวณพื้นที่ไวแสงจะไหลไปยังการ์ดริง แสดงได้ดังรูปที่ 3.13 กลไกของการ์ดริงที่ทำให้เกิดการลดลงของกระแสมืด คือ เมื่อชั้นการ์ดริงได้รับแรงดันไบอัส ทำให้สนามไฟฟ้าที่รอยต่อพี-เอ็นของโฟโตไดโอดจะถูกเบี่ยงเบนให้มีทิศทางไปยังการ์ดริงส่งผลให้พาหะที่ก่อให้เกิดกระแสรั่วที่เกิดขึ้นในเนื้อสารและระหว่างผิวสัมผัสของชั้น Si/SiO<sub>2</sub> เคลื่อนที่ไปยังการ์ดริงแทนที่จะไปยังโฟโตไดโอด จึงทำให้กระแสมืดที่อยู่ในบริเวณพื้นที่ไวแสงมีค่าลดลง



รูปที่ 3.13 แสดงกลไกของการ์ริงที่ก่อให้เกิดการลดลงของกระแสมืด

### 3.6 คุณสมบัติสำคัญของโฟโตดีเทกเตอร์

โฟโตดีเทกเตอร์แต่ละชนิดมีขีดจำกัดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับ โครงสร้างและวัสดุที่ใช้ทำให้โฟโตดีเทกเตอร์แต่ละชนิดเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน ในการเลือกใช้จึงต้องพิจารณาจากคุณสมบัติของโฟโตดีเทกเตอร์ ได้แก่ ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency) สภาพการตอบสนอง (responsivity) ความเร็วในการตอบสนอง (bandwidth) และช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนอง (spectral response)

#### 3.6.1 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency :  $\eta$ ) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวน โฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่วงจรภายนอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (Internal quantum efficiency :  $\eta_{int}$ ) คือจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวน โฟตอนที่ตกกระทบ ส่วน ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency :  $\eta_{ext}$ ) คือจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวน โฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อนและค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ ( $\alpha$ ) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งหาได้จากสมการ 3.2

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / hv} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{hv}{P_{inc}} \quad (3.2)$$

- โดยที่  $P_{inc}$  คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)
- $q$  คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)
- $I_p$  คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทกเตอร์
- $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

V คือ ความถี่ของคลื่น

ค่าของ  $\eta$  มีค่าระหว่าง  $0 \leq \eta \leq 1$  ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 90 % แต่ถ้าไม่มีการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนบนผิวของโฟโตไดโอด แสงที่ตกกระทบชั้นสารกึ่งตัวนำจะสะท้อนออกไปประมาณ 30 % เนื่องจากดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในออกถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 70 %

### 3.6.2 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (Responsivity:  $\mathcal{R}$ ) หมายถึงกระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ 3.3

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (3.3)$$

โดยที่	$P_{inc}$	คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)
	q	คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)
	$I_p$	คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทกเตอร์
	h	คือ ค่าคงที่ของพลังค์
	V	คือ ความถี่ของคลื่น
	$\lambda$	คือ ความยาวคลื่น
	$\eta$	คือ ค่าประสิทธิภาพควอนตัม

จากสมการที่(3.3) พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน

### 3.6.3 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจจับแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอกตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น ( $t_r$ ) และช่วงเวลาขาลง ( $t_f$ )

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นอยู่กับแพ็คเกจของ

1) เวลาการแพร่ (Diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณหลอดพาหะ

2) เวลาส่งผ่าน (Transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณหลอดพาหะ

3) ค่าคงที่ของเวลา (Time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับ

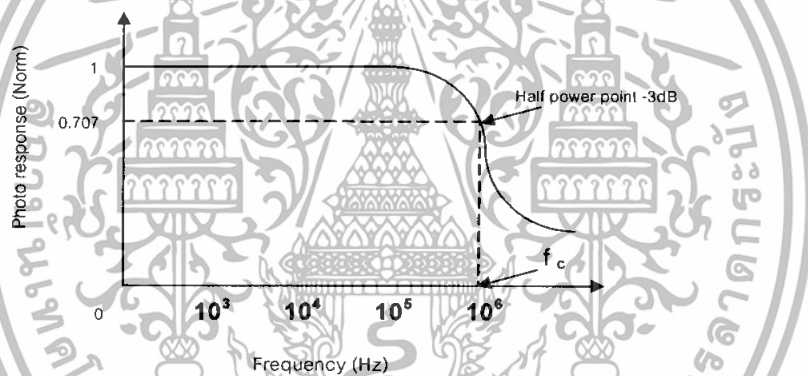
ค่าโหลดความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆจะต้องพิจารณาถึงแพ็คเกจทั้งสามประการนี้ด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.4 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ (bandwidth) คือ อัตราเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณค่าความถี่ต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางประการของโฟโตดีเทกเตอร์ ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น ดังรูป 3.14 ในทางปฏิบัติ การตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cut off frequency :  $f_c$ ) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุด half power point มีค่า  $-3$  dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่โฟโตดีเทกเตอร์สามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานของโฟโตดีเทกเตอร์มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ

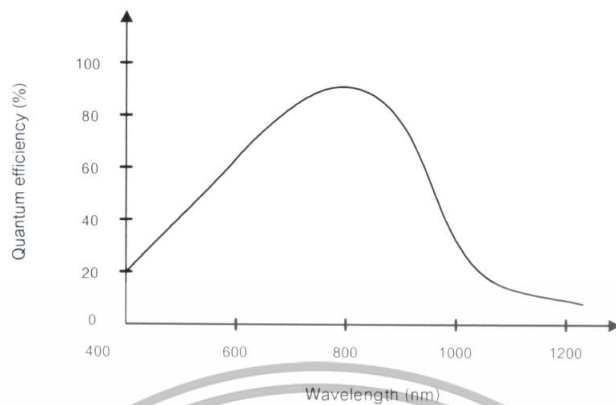


รูปที่ 3.14 การเปลี่ยนแปลงการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

### 3.6.5 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัม

ผลตอบสนองของสเปกตรัมทางแสงหมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนโฟตอนที่มีความยาวคลื่นต่างๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลง ค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงจะเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการดูดกลืนโฟตอนเฉพาะบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์รวมตัวที่ผิวทำให้ผลการตอบสนองดีเทกเตอร์ลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับโฟโตดีเทกเตอร์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



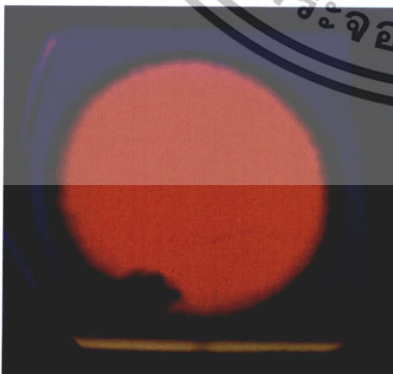
รูปที่ 3.15 ผลการตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอด

จากรูปที่ 3.15 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น โดยมีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด และการตอบสนองจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคลื่นสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถตอบสนองได้คือ 1110 nm

### 3.7 พอร์สซิลิคอน[1]

#### 3.7.1 โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน

คำว่า พอร์ส (Porous) หมายถึงรูพรุน เมื่อรวมกับ ซิลิคอน ซึ่งเป็นธาตุของแข็ง ใช้อธิบายผลึกของซิลิคอนที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีลักษณะแข็งแต่เปราะ เป็นโครงสร้างระดับนาโนประกอบด้วยลักษณะแท่ง หรือทรงกลม ซึ่งลักษณะคล้ายฟองน้ำ



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.16 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (ก) ลักษณะผิวหน้า

(ข) ภาคตัดขวาง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ประเภทของพอร์สซิติคอน

การแบ่งประเภทของพอร์สซิติคอนสามารถแบ่งได้ 3 ประเภทตามลักษณะของรูพรุน คือ ลักษณะของรูพรุน (pore type) แบ่งตามรูปทรงของรูพรุน (pore shape) และแบ่งตามขนาดของรูพรุน (pore size)

การแบ่งตามลักษณะของรูพรุน

1. ลักษณะหลุมตัน (blind or saccate) เกิดกรณีที่ชั้นพอร์สมีความบางมาก
2. ลักษณะถุง (dead-end or saccate) คล้ายหลุมตันแต่จะมีความลึกที่มากกว่า
3. ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (interconnected or branched)
4. ลักษณะโพรงปิด (totally isolated or close) เหมือนมีโพรงอากาศแทรกอยู่ในเนื้อซิติคอนจำนวนมาก
5. ลักษณะทะลุ (through pores) รูพรุนจะเปิดทั้งสองด้าน จะพบในโครงสร้างแบบเมมเบรน (membrane) ที่มีการกีดขวาง

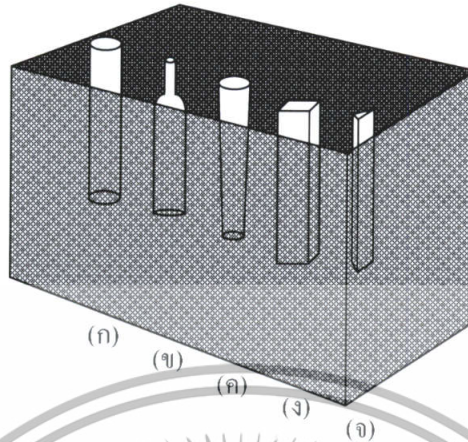


รูปที่ 3.17 ประเภทของพอร์สซิติคอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน (ก) ลักษณะหลุมตัน (ข) ลักษณะถุง (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (ง) ลักษณะโพรงปิด (จ) ลักษณะทะลุ

การแบ่งตามรูปทรงของรูพรุน

1. ทรงกระบอก (cylindrical)
2. ทรงขวดหมึก (ink-bottle)
3. ทรงกรวย (funnel)
4. ทรงลูกบาศก์ (cuboid or slit)
5. ทรงพีระมิด (pyramidal)

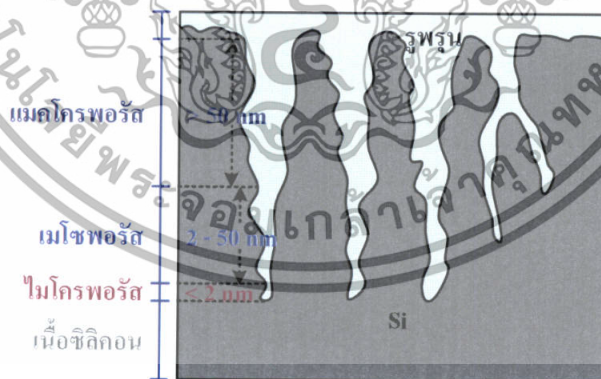
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 ประเภทของพอร์สซิลิคอนแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงขวดหมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (ค) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด

การแบ่งตามขนาดรูพรุน

1. ไมโครพอร์ส (micro porous) มีความกว้างของหลุมน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 นาโนเมตร มีโครงสร้างติดกับเนื้อซิลิคอน
2. เมโซพอร์ส (mesoporous) มีความกว้างของหลุมในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมคโครพอร์ส (macroporous) มีความกว้างของหลุมมากกว่า 50 นาโนเมตร



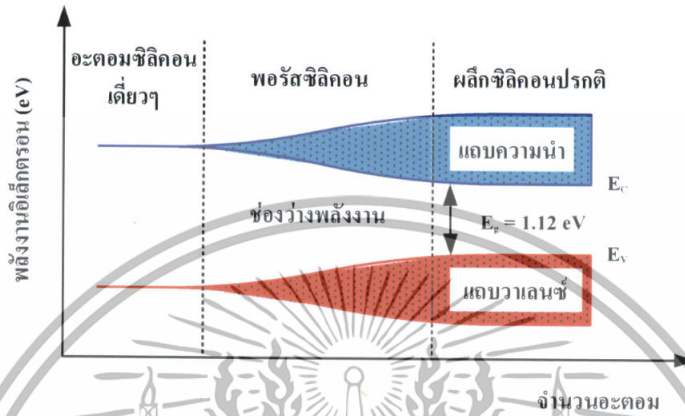
รูปที่ 3.19 ประเภทของพอร์สซิลิคอนเมื่อแบ่งตามขนาดของรูพรุน

### 3.7.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

จากหลักการเกิดแถบพลังงาน ถ้าทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันลดลง ซึ่งมีผลต่อช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับผลึกซิลิคอนเดิม จนเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม เรียกว่า ควอนตัมไซส์เอฟเฟกต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(quantum size effect) หรือควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟกต์ (quantum confinement effect) มีผลทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

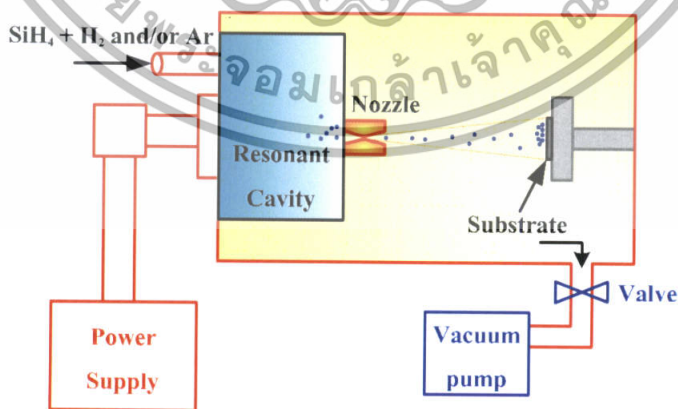


รูปที่ 3.20 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ

### 3.7.3 กระบวนการสร้างพอร์ซซิลิคอน

#### 3.7.3.1 วิธีการสร้างพอร์ซซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

วิธีนี้มีหลักการคือ สร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรจากการสลายตัวของก๊าซไซเรน ( $\text{SiH}_4$ ) กับก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน ( $\text{Ar}$ ) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 วัตต์ ที่ความถี่ 3.45 GHz จะทำให้ได้ผลึกขนาดประมาณ 2 นาโนเมตรตกไปเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็นควอตซ์ ณ อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.21 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

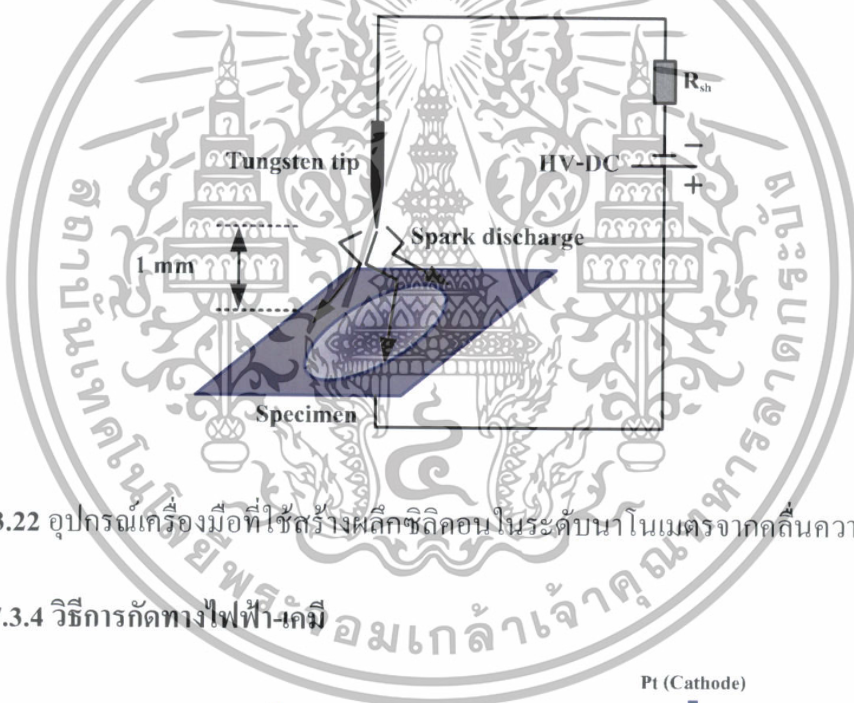
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7.3.2 วิธีการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยแสงเลเซอร์

โดยเริ่มต้นจากการที่ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ ที่ความดัน 10, 15, 20 Torr จะถูกปล่อยเข้าไปยังระบบปิด (chamber) ซึ่งภายในมีความดันต่ำกว่า  $10^{-6}$  Torr ความดันของก๊าซไซเรนต่างๆ เหล่านี้จะเป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้น ส่วนเลเซอร์ที่ใช้จะโฟกัสให้ผ่านเข้าไปยังระบบปิดเพื่อทำให้เกิดการสปาร์ค (spark) ขึ้นภายในผลึก

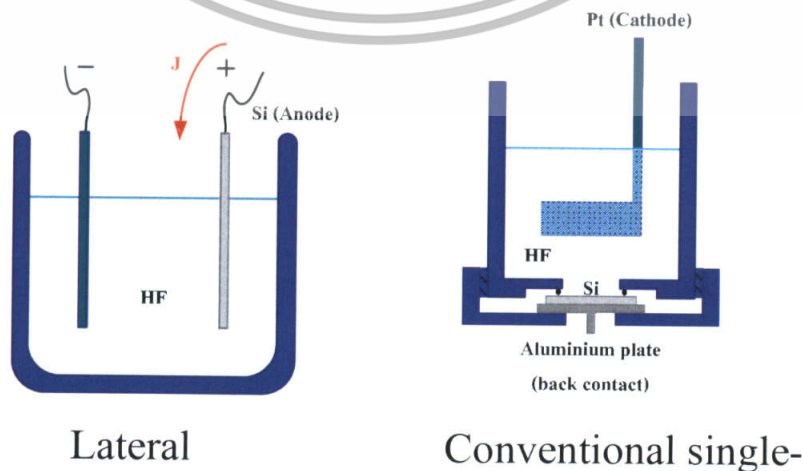
### 3.7.3.3 วิธีการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากคลื่นความถี่สูง

โดยจะใช้การ Spark discharge จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงความต่างศักย์สูง โดยจะให้ spark ครั้งละ 20 นาโนวินาที ทุกๆ 60 ไมโครวินาที ทำให้เกิดโครงสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดในระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นวงกลมบนแผ่นผลึกซิลิคอน

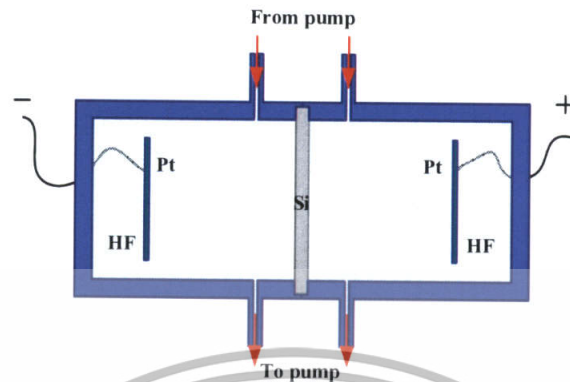


รูปที่ 3.22 อุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรจากคลื่นความถี่สูง

### 3.7.3.4 วิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



### Double-tank

รูปที่ 3.23 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดทางไฟฟ้าเคมี

พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างบนแผ่นผลึกซิลิคอนได้โดยตรง โดยอาศัยวิธีทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical etching) ที่เรียกว่า แอนโนไดเซชัน (anodisation)

ปัจจัยหลักๆ ที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีนี้คือ สภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอน ชนิดของสารเจือปนในเนื้อของผลึกซิลิคอน ความหนาแน่นกระแสไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด

จากการศึกษาโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนจะมีค่าความพรุนสูงชัน และมีความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนมากขึ้นเมื่อ เพิ่มค่าสภาพความต้านทานในผลึกซิลิคอนชนิดพี หรือลดค่าสภาพความต้านทานในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การเพิ่มความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา การลดความเข้มข้นของสารละลายไฮโดรฟลูออริก และการเพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด

#### 3.7.3.5 วิธีการกัดย้อมสี (Stain etching)

วิธีนี้สามารถทำได้ง่ายด้วยการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายซึ่งประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้น 47 wt% กรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 60 wt% และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้แสงสว่างเพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในขณะทำการกัดด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.24 การสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่

ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีส้มเปลี่ยนไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์ทางแสงและความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นนั่นเอง เช่น วงรอบเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ (หลายๆ ครั้ง) ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์สซิลิคอนที่เพิ่มจากประมาณ 0.1 ไมโครเมตร ถึงประมาณ 1.5 ไมโครเมตร เป็นต้น นอกจากนี้ในกระบวนการกัดข้อมสี่นั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกกับกรดไนตริก ก่อนที่จะนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน ซึ่งเรียกช่วงเวลาดังกล่าวว่า เวลาการบ่มสารละลาย (Incubation period)

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมสี่ คือ

1. ความเข้มข้นของกรดไนตริกซึ่งจะมีผลต่อการเกิด ไฮโดรเจน (H<sup>+</sup>) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนขึ้น

2. ชนิดของสารเจือ และสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ส มีผลอย่างมากต่อเวลาเหนี่ยวนำ (Induction time) ให้เกิดชั้นพอร์สซิลิคอนโดยตรง ในซิลิคอนชนิดพี เวลาการเหนี่ยวนำจะเพิ่มเมื่อค่าสภาพความต้านทานเพิ่มขึ้นและจะกลับกันในซิลิคอนชนิดเอ็น

3. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิด โครงสร้างของพอร์สซิลิคอน มีการทดลองศึกษาพอร์สซิลิคอนที่ได้จากการสร้างด้วยวิธีการกัดข้อมสี่จากผลึกซิลิคอนชนิดต่างพบว่า การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเลต (UV) พอร์สซิลิคอนจากแผ่นแบบผลึกรูปเดี่ยวและหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) แต่พอร์สซิลิคอนที่ได้จากแผ่นอะมอร์ฟัสกลับไม่แสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์

4. การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายเกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ได้ชั้นพอร์สซิลิคอนที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างที่หยابกว่าการสร้างพอร์สซิลิคอนที่ไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย

วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้หลายวิธี ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น แต่วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนที่ง่ายและเหมาะสมกับการศึกษาทดลองของโครงการนี้ คือ วิธีการกัดข้อมลี้

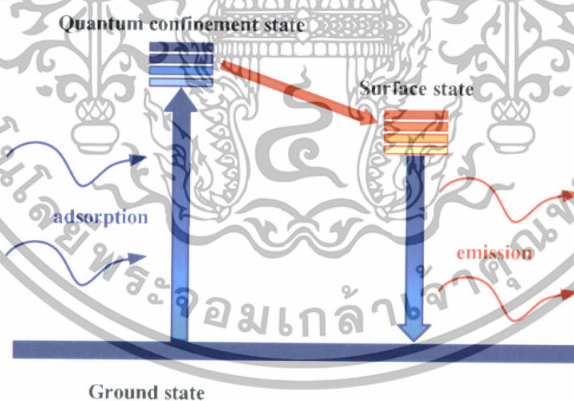
### 3.7.4 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนน่าจะเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน

1. การเกิดปรากฏการณ์ควอนตัมไซส์เอฟเฟกต์ (Quantum size effect) ขึ้นภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอนทำให้ขนาดของช่องว่างของแถบพลังงานนาโนพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิคอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (Surface state) ของนาโนพอร์สซิลิคอน ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะไฮโดรเจน และอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอนนั่นเอง

ซึ่งเราสามารถอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอน โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model)



รูปที่ 3.25 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานทั้ง 3 ระดับภายในพอร์สซิลิคอนเพื่ออธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์

จากรูปที่ 3.25 มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (excited state) อยู่สองระดับด้วยกัน โดยเป็นผลมาจากควอนตัมไซส์เอฟเฟกต์ และระดับพลังงานที่ผิวตามลำดับ จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงจนกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานไปอยู่ในสถานะ quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากเนื่องจากช่องว่างของระดับพลังงานที่ผิวมีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สซิลิคอนนี้เองจึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งไม่เสถียรนี้ย้ายสถานะมาสู่สถานะที่ผิว (surface state) และเมื่ออิเล็กตรอนที่ผิวกลับสู่สถานะพื้น (ground state) ก็จะปล่อยแสงออกมาในลักษณะการคายพลังงาน (emission) ซึ่งแสงที่ปล่อยออกมาจะมีสีที่เข้มกว่าแสงที่ปล่อยออกมาจากผลึกซิลิคอนธรรมดา

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ระดับพลังงานที่ผิวก่อนตกไปรวมตัวกับโฮลที่สถานะพื้น (ground state) โดยการรวมตัวนี้ อิเล็กตรอนจะคายพลังงานในรูปของโฟตอนออกมาเป็นแสงนั่นเอง

### 3.7.5 คุณสมบัติของพอร์สซีลิกอน

คุณสมบัติที่น่าสนใจของพอร์สซีลิกอนได้แก่

1. คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์สซีลิกอน มีลักษณะที่แข็งแต่เปราะ มีพูนุนมากมาย มีอัตราส่วนพื้นที่ต่อปริมาตรสูง

2. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์สซีลิกอน มีช่องว่างพลังงานที่กว้างกว่าซิลิกอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิกอน และสามารถสร้างเป็นสารไดอิเล็กทริก (dielectric) ได้ พอร์สซีลิกอนมีค่าดัชนีหักเหต่ำกว่าซิลิกอน พอร์สซีลิกอนมีคุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์

คุณสมบัติของพอร์สซีลิกอนเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะ โครงสร้างของพอร์สซีลิกอนซึ่งก็ขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้างนั่นเอง

### 3.7.6 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซีลิกอน

ปัจจุบันพอร์สซีลิกอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างแพร่หลายและถูกคาดหวังว่าจะเป็นตัวทำให้เทคโนโลยีของซิลิกอนมีความสมบูรณ์ขึ้นในอนาคต

#### 3.7.6.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซีลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์

เนื่องจากพอร์สซีลิกอนมีดัชนีหักเหต่ำกว่าซิลิกอน เราจึงนำมาประยุกต์สร้างเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในเซลล์แสงอาทิตย์

ศักยภาพของพอร์สซีลิกอนในเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย

1. การสะท้อน (Integrated reflectance) โครงสร้างที่เป็นพื้นผิวขรุขระของพอร์สซีลิกอนจะช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ และยังช่วยลดการสะท้อนแสงได้ดีกว่าซิลิกอนออกไซด์ นอกจากนี้พอร์สซีลิกอนสามารถสร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อน มีข้อจำกัดน้อย และยังมีราคาถูกกว่าชั้นลดการสะท้อนแสงอื่นๆ

2. คุณสมบัติการดูดกลืนแสง (Absorption property) และคุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซีลิกอน (light-emission property) สามารถปรับแต่งได้ในช่วงกว้าง สำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ต้องการการตอบสนองกับแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-1000 นาโนเมตร ซึ่งสามารถปรับขนาดช่องว่างพลังงานของชั้นดูดกลืนแสงในพอร์สซีลิกอนให้เหมาะสมได้ประมาณ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ ซึ่งจะมีประสิทธิภาพสูงสุด

3. คุณสมบัติโฟโวลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซีลิกอนจะเปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ตและแสงสีน้ำเงินให้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นที่มากขึ้น ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิกอน

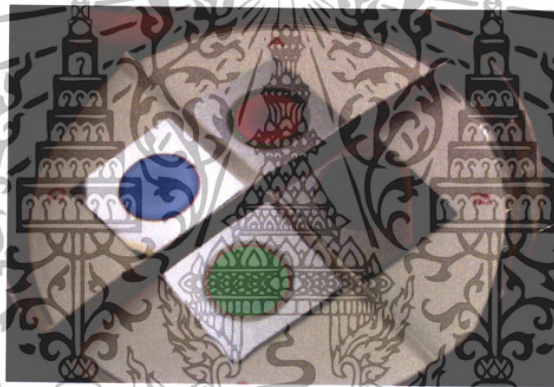
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ความง่าย และศักยภาพของการสร้างพอร์สซิลิคอนในพื้นที่ขนาดใหญ่ จึงเป็นเทคนิคที่เหมาะสมอย่างมากกับเซลล์แสงอาทิตย์

อย่างไรก็ดี ยังมีปัญหาบางประการที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอร์สซิลิคอนในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ การที่พอร์สซิลิคอนมีสภาพความต้านทานสูง ในกระบวนการเซลล์แสงอาทิตย์บางกระบวนการต้องการอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 800 องศาเซลเซียส จะทำให้คุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอนหมดไป

### 3.7.6.2 อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (opto-electronic)

แสงที่เปล่งออกมาจากพอร์สซิลิคอนนั้น ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งแสงที่เปล่งนี้มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความถี่หรือค่าความพรุน ทำให้เราควบคุมค่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาได้



รูปที่ 3.26 คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนที่ความพรุนต่างกัน

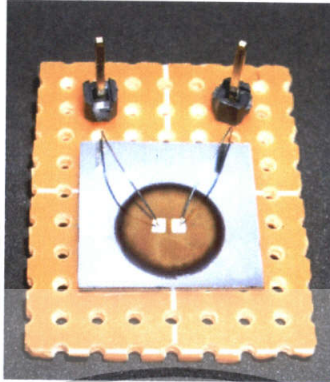
### 3.7.6.3 ชีวการแพทย์ (Biomedical)

เนื่องจาก พอร์สซิลิคอนมีขนาดเล็กระดับนาโนเมตร จึงสามารถเข้าไปในร่างกายและถอดออกมาได้โดยร่างกายไม่ต่อต้าน และสามารถละลายได้โดยไม่ทำให้เกิดอันตราย จึงได้มีการนำพอร์สซิลิคอนไปใช้งานในงานด้านการแพทย์ อาทิเช่น ฉีดพอร์สซิลิคอนเข้าไปในร่างกายเพื่อเป็นตัวให้ยาแก่ร่างกาย หรือเป็นวัสดุที่สะท้อนและกักน้ำย่อยได้ เป็นต้น

### 3.7.6.4 เครื่องตรวจจับ

เนื่องจากพอร์สซิลิคอนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง ดังนั้นจึงสามารถดูดกลืน โมเลกุลต่างๆ ได้ดีที่ผิว เมื่อโมเลกุลเหล่านั้นมาตกกระทบ จะทำให้คุณสมบัติบางประการเปลี่ยนไป เช่น ประสิทธิภาพในการเรืองแสงเมื่ออยู่ในสารเคมีที่ต่างกัน ค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) เมื่อผิวหน้าเติมไปด้วยโมเลกุลต่างๆ

ดังนั้นเราจึงนำมาเป็นพื้นฐานในการสร้างเครื่องตรวจจับ สารเคมี หรือก๊าซต่างๆ ได้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นหน้าเว็บไซต์นี้ กรุณาแจ้งให้เราทราบ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.27 อุปกรณ์ตรวจจับไอแอลกอฮอล์โดยใช้เซ็นเซอร์ซิลิกอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

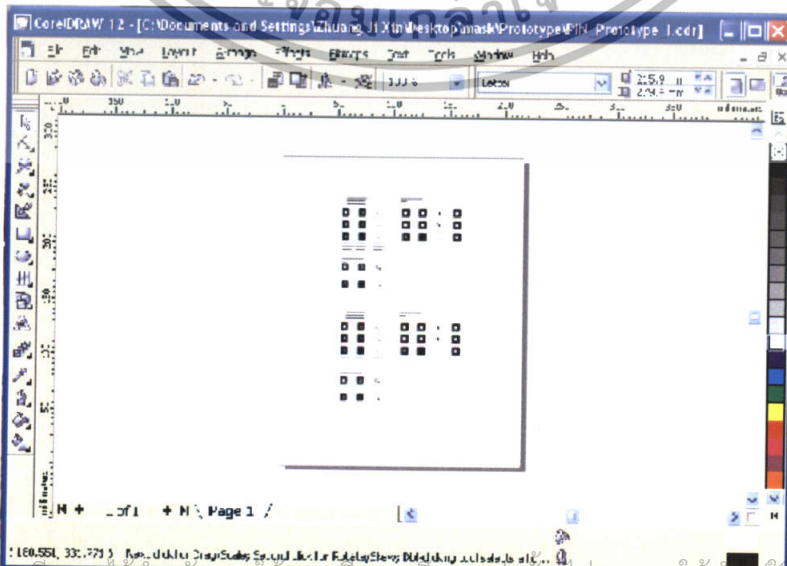
## บทที่ 4

### การออกแบบและกระบวนการสร้าง

การออกแบบ (layout design) และการสร้างโฟโตมาส์ก (photomask) เป็นสิ่งที่สำคัญอันดับแรกในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด เนื่องจากขนาดและความซับซ้อนของอุปกรณ์ทั้งหมด ต้องถูกกำหนดโดยการออกแบบ จากนั้นลวดลายที่ต้องการจะต้องถูกนำมาถ่ายทอดลงบนโฟโตมาส์กเพื่อใช้โฟโตมาส์กเป็นต้นแบบในการสร้างลวดลายบนอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (photolithography) ต่อไป ในบทนี้จะได้กล่าวถึง การออกแบบลวดลายและการสร้างโฟโตมาส์กของโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นรับรังสี และ โฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสีเพื่อนำไปวัดผลเปรียบเทียบกับโครงสร้างระหว่างโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นรับรังสี และ โฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี

#### 4.1 การสร้างกระจกต้นแบบ

การออกแบบลวดลาย ถือเป็นขั้นตอนแรกในการสร้างโฟโตมาส์ก เพื่อจัดวางตำแหน่งของลวดลายให้ถูกต้อง และลวดลายที่ได้มีความเหมาะสมกับขนาดของพื้นที่ที่มีอยู่อย่างจำกัด ในโครงการนี้ได้ออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม CorelDraw Graphics Suite 12 เมื่อนำข้อมูลไฟล์ที่ออกแบบไว้ไปสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนฟิล์มแล้วนำไปติดบนกระจกใสจะทำให้ได้กระจกโฟโตมาส์กสำหรับการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 4.1 หน้าต่าง โปรแกรม CorelDraw Graphics Suite 12 ที่ใช้ในการออกแบบมาส์ก  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งหากมีการนำไปใช้

การออกแบบลวดลายโฟโต้มาสก์ของโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นรับรังสีจะมีทั้งหมดมี 4 มาส์ก คือ

มาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่อสารเจือ N

มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่อสารเจือ P

มาส์กที่ 3 เปิดช่องทำขั้วสัมผัสโลหะ (สำหรับชั้น  $\text{SiO}_2$  เป็นชั้นรับรังสี)

มาส์กที่ 4 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม (สำหรับชั้น  $\text{SiO}_2$  เป็นชั้นรับรังสี)

การออกแบบลวดลายโฟโต้มาสก์ของโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสีจะมีทั้งหมดมี 5 มาส์ก

มาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่อสารเจือ N

มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่อสารเจือ P

มาส์กที่ 3 เปิดช่องทำขั้วสัมผัสโลหะ (สำหรับชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี)

มาส์กที่ 4 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม (สำหรับชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี)

มาส์กที่ 5 สร้างชั้น Porous Silicon

การออกแบบมาส์กที่ 1 และ มาส์กที่ 2 ของโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสีจะเหมือนกับการออกแบบลวดลายมาส์กที่ 1 และ มาส์กที่ 2 โฟโต้มาสก์ของโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแนวนอนที่มีชั้น  $\text{SiO}_2$  เป็นชั้นรับแสง แต่ การออกแบบมาส์กที่ 3 และ มาส์กที่ 4 จะออกแบบแตกต่างกัน

## 4.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบพิน [3]

### 4.2.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

โดยเริ่มต้นการเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิด i ระบาย (111) ความหนาของแผ่น ซิลิคอน ประมาณ 500 ไมครอน

### 4.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน

การทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. การทำความสะอาดครั้งแรก เพื่อดำรงสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนแผ่นซิลิคอน
2. การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอน และกำจัดไขมัน และสิ่งแปลกปลอม

### 4.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันคือ กระบวนการสร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ซึ่งนั่นเป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง เพื่อเคลือบผิวหน้า และใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยความหนาของชั้น ( $\text{SiO}_2$ ) ขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ, เวลา เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และกระบวนการสร้าง ซึ่งการสร้างโดยวิธี ออกซิเดชันแบบแห้งนั้น จะใช้เวลามากกว่าวิธี ออกซิเดชันแบบชื้น แต่ลักษณะการเกิดชั้น ( $\text{SiO}_2$ ) จะมีข้อดี และมีผลกระทบท่อผิวหน้าของ ซิลิคอนน้อยกว่า

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

1. ออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. ออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



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

#### 4.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่ายภาพกระจกต้นแบบลงบนแผ่น ซิลิคอน เพื่อเตรียมเปิดช่องออกไซด์เฉพาะบริเวณที่ต้องการแพร่สารเจือ โดยเคลือบผิวของแผ่น ซิลิคอนด้วยน้ำยาไวแสง (Photo-resist) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

1. สารไวแสงชนิดลบ (Negative photo resist) โดยเมื่อถูกแสงแล้วจะแข็งตัวไม่ยอมละลาย ในน้ำยาล้าง (Developer)
2. สารไวแสงชนิดบวก (Positive photo resist) โดยเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะอ่อนตัว และสามารถละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

#### 4.2.5 การฉายแสง (Exposure)

อัตราความไวต่อแสงของความยาวคลื่น  $\lambda$  อยู่ในช่วง 300-500 nm คือแสงที่เรามองเห็น สีม่วง และ น้ำเงินนั่นเอง กรณีแสงที่มีความยาวคลื่น  $\lambda > 500 \text{ nm}$  คือแสงสีเหลืองในห้องปฏิบัติการ เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

Negative resist ไวต่อสเปกตรัม 405 nm

Positive resist ไวต่อสเปกตรัม 365 nm

#### 4.2.6 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)

##### 4.2.6.1 กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (Boron)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือ โบรอนด้วยแหล่งสารเจือ โบรอนลงไปบริเวณที่เปิดช่อง ออกไซด์ไว้

##### 4.2.6.2 กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus)

เป็นกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ด้วยแหล่งสารเจือฟอสฟอรัสลงไปบริเวณที่เปิด ช่องออกไซด์ไว้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.7 Metallization Process

Metallization Process คือ กระบวนการทำขั้วโลหะ (Metal contact) หรือแถบตัวนำ เชื่อมต่อภายใน (Metal wire interconnection)

คุณสมบัติโลหะที่ดี

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

#### 4.2.8 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

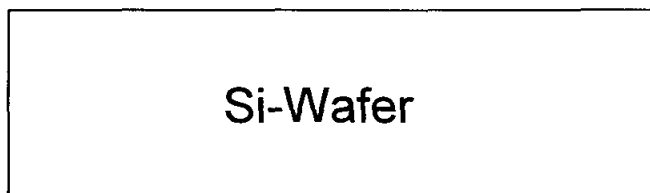
เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอน และทำให้เกิดส่วนอัลลอย ระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอนขึ้นในขณะเดียวกัน โดยการนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในเตาแพร่สารในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ซีซี / นาที เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$

#### 4.2.9 กระบวนการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดย้อมสี (Stain etching)

ด้วยการจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลายซึ่งประกอบด้วย กรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้น 47 wt% กรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 60 wt% และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังอาจมีการใช้แสงจากหลอดทั้งสแตนด์เพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในขณะที่ทำการกัดด้วย

#### 4.2.10 กระบวนการสร้างโพโตไดโอดชนิดพินแบบแวนอนที่มีชั้นซิลิคอนออกไซด์เป็นชั้นรับรังสี

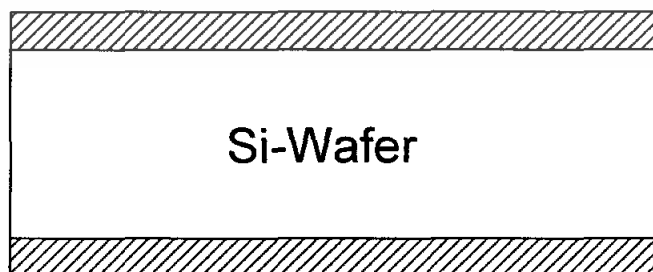
1. การเตรียมแผ่นซิลิคอน และ การตรวจสอบคุณสมบัติ



- แผ่นซิลิคอนชนิด อินทรินซิก หนา (111)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ความหนา 500  $\mu\text{m}$
- 2. ทำความสะอาดผิวหน้าครั้งแรก
  - Ultrasonic ในน้ำ DI (น้ำบริสุทธิ์) 2 นาที (เพื่อกำจัดฝุ่นละออง)
  - ล้างในน้ำ DI เป่าแห้งด้วยก๊าซ ( $\text{N}_2$ )
  - ต้มใน  $\text{HNO}_3$  10 นาที (เพื่อกำจัด โลหะหนัก เช่น เศษ Si)
  - ล้างในน้ำ DI
  - ต้มในน้ำ DI (I) 5 นาที
  - ต้มในน้ำ DI (II) 5 นาที
  - ล้าง ในน้ำ DI
  - เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$
- 3. ทำความสะอาดผิวด้านมาตรฐาน
  - ต้มในไตรคลอโรเอทิลีน ( $\text{C}_2\text{HCl}_3$ ) 5 นาที (กำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน)
  - อุลตราโซนิคในอะซิโตน 5 นาที
  - ล้างในน้ำ DI แก้วที่ 1
  - ล้างในน้ำ DI แก้วที่ 2
  - เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$
- 4. Slice etching (เพื่อกำจัด  $\text{SiO}_2$  ที่อยู่บนผิว Si ก่อนการ Oxidation)
  - จุ่มใน HF 5% 10 นาที
  - ล้างในน้ำ DI แก้วที่ 1
  - ล้างในน้ำ DI แก้วที่ 2
  - เป่าแห้งด้วย  $\text{N}_2$
- 5. Oxidation



- Dry Oxidation ด้วย  $\text{O}_2$  1,200 cc. /min. เวลา 1 ชั่วโมง
- Wet Oxidation ด้วย  $\text{O}_2$  1,000 cc. /min. เวลา 2 ชั่วโมง
- Dry Oxidation ด้วย  $\text{O}_2$  1,200 cc. /min. เวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี Photo Mask # 1 Phosphorus Diffusion

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 85°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer ฟิล์ม โดย

    จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที

    จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที

- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (Post bake)

#### 7. สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (oxide etching) เพื่อเปิดพื้นที่สำหรับการแพร่สารเจือ

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation) 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

#### 8. ลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 5 นาที
- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

#### 9. ทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichol 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างในน้ำ DI (I)

- ล้างในน้ำ DI (II)

- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 11. Phosphorus diffusion

- เคลือบขอสเหลวชนิดฟอสฟอรัส (P-59250) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20

วินาที

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $150^\circ C$  เวลา 20 นาที

- Pre-dep.  $1000^\circ C$  ด้วย  $N_2$  1000 cc/min, 15 นาที

#### 12. ลอกชั้น Pre-deposition, Phosphorus

- จุ่มใน HF 10 % 10 วินาที

- จุ่มในน้ำ DI (I)

- จุ่มในน้ำ DI (II)

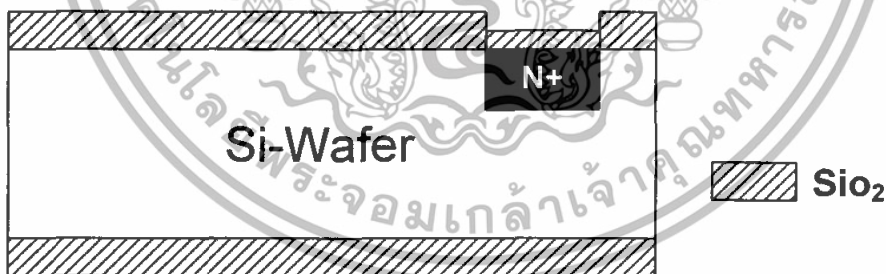
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 13. Drive-in (Phosphorus) $1100^\circ C$ ด้วย $O_2$

- Dry 1200 cc/min 10 นาที

- Wet 1000 cc/min 10 นาที

- Dry 1200 cc/min 10 นาที



#### 14. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี Photo Mask # 2 Boron Diffusion

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  30 นาที

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

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $90^\circ C$  30 นาที (prebake)

- ฉายแสง (Alignment expose)

- Developer พิสูจน์โดย

จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที

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

#### 15. Oxide etching

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation) 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 16. ลอกฟิล์ม

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

#### 17. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

#### 18. Slight etching

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

#### 19. Boron diffusion

- เคลือบซอสเลทวชนิด โบรอน ( $B_2O_3$ ) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 20 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 150°C เวลา 20 นาที
- Pre-dep. 1000°C ด้วย N<sub>2</sub> 1000 cc/min, 15 นาที

#### 20. ลอกชั้น Pre-deposition, Boron

- จุ่มใน HF 10 % 10 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

#### 21 Drive-in (Boron)

- Drive-in (Boron) 1000°C ด้วย O<sub>2</sub>
- Dry 1200 cc/min 5 นาที
- Wet 1000 cc/min 5 นาที
- Dry 1200 cc/min 5 นาที



#### 22. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี Photo Mask # 3 Contact Window (For SiO<sub>2</sub>)

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)

- ฉายแสง (Alignment expose)

- Developer ฟิล์ม โดย

    จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที

    จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที

- จุ่มในน้ำ DI (I)

- จุ่มในน้ำ DI (II)

- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

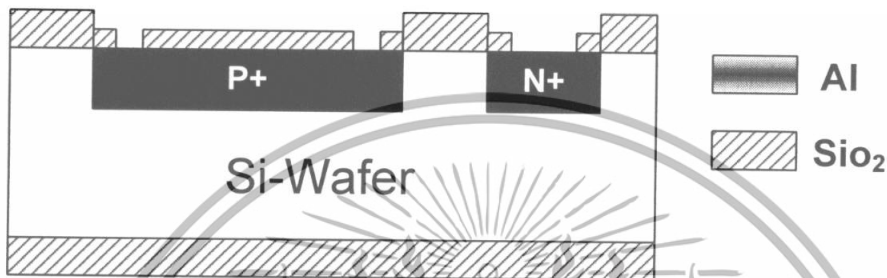
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง

- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (Post bake)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 23. Oxide etching

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation) 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

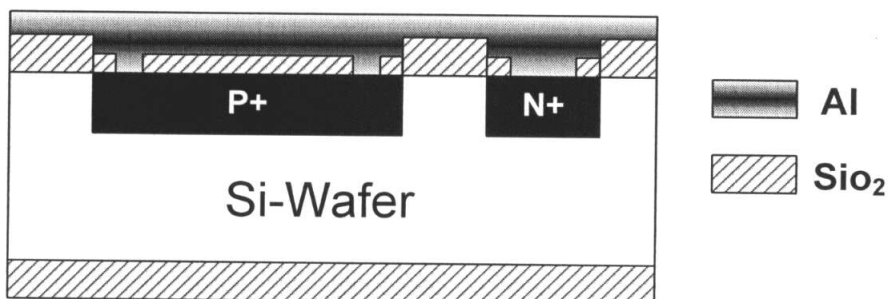


## 24. ลอกฟิล์ม

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

## 25. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

26. Aluminium Evaporation ที่ความดัน  $2 \times 10^{-6}$  torr.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

27. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี Photo Mask # 4 Metal (For SiO<sub>2</sub>)

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer ฟลิ้ม โดย

จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที

จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที

- จุ่มในน้ำ DI (I)
  - จุ่มในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
  - เคลือบฟิล์มด้านหลัง
  - อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (Post bake)
28. การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)
- นำแผ่นจุ่มในสารละลาย Al etching ที่ 40°C (ประมาณ 10-20 วินาที)

- จุ่มในน้ำ DI (I)

- จุ่มในน้ำ DI (II)

- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

29. ลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 5 นาที

- จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที

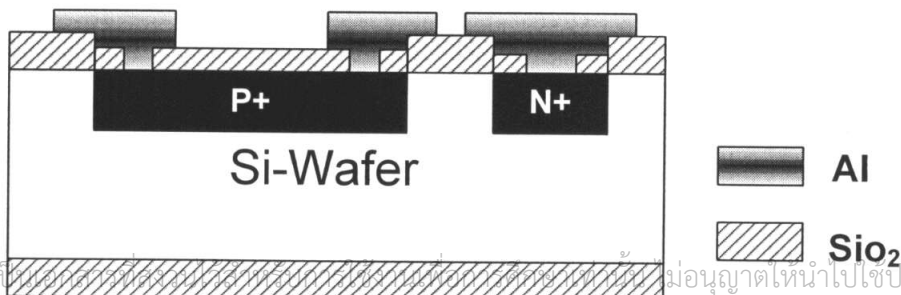
- จุ่มในน้ำ DI (I)

- จุ่มในน้ำ DI (II)

- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

30. Sintering 500°C

- N<sub>2</sub> 1,000 cc. /min. เวลา 12 นาที



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง มีอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**4.11 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิดพินแบบเนวอนที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสี**  
 เริ่มต้นสร้างเหมือนกับการสร้างโฟโตไดโอดชนิดพินแบบเนวอนที่มีชั้นมีซิลิคอน  
 ออกไซด์เป็นชั้นรับรังสีตั้งแต่ขั้นตอนที่ 22 ทำดังนี้

**31. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี Photo Mask # 3 Contact Window (For Porous Silicon)**

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer ฟิล์ม โดย

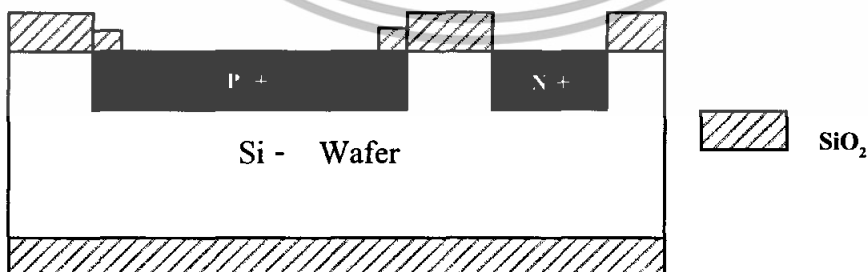
    จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที

    จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที

- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (Post bake)

**32. Oxide etching**

- จุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (buffer for oxidation) 10 นาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>



**33. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี Photo Mask # 4 Metal (For Porous Silicon)**

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ1350) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เวลา 40 วินาที
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ฉายแสง (Alignment expose)
- Developer ฟิล์ม โดย
  - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (I) 15 วินาที
  - จุ่มใน AZ Developer (AZ 300 MIF) (II) 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI (I)
- จุ่มในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $90^\circ C$  30 นาที (Post bake)
- 34. การสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al-Etching)
  - นำแผ่นจุ่มในสารละลาย Al etching ที่  $40^\circ C$  (ประมาณ 10-20 วินาที)
  - จุ่มในน้ำ DI (I)
  - จุ่มในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- 35. สลอกฟิล์ม
  - จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (I) 5 นาที
  - จุ่มในอะซิโตน (Acetone) (II) 5 นาที
  - จุ่มในน้ำ DI (I)
  - จุ่มในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- 36. Sintering  $500^\circ C$ 
  - $N_2$  1,000 cc. /min. เวลา 12 นาที

#### 37. Photo Mask # 5 Porous Mask

การเลือกสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนเฉพาะพื้นที่ (Selective formation of stain etched porous silicon) เป็นการสกัดชั้นของอลูมิเนียมที่ปกคลุมผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนให้เป็นพอร์ซซิลิคอนขึ้นเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสง

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก ด้วยการ spin 4000 rpm.
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $85^\circ C$  20 นาที (prebake)
- Alignment Expose 60 วินาที
- Developer ฟิล์ม โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

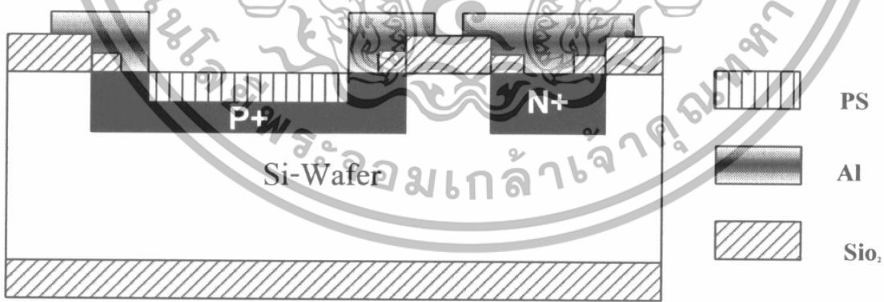
- AZ Developer 30 วินาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวกด้านหลัง
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 85 °C 30 นาที

38. การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอน

- จุ่มในสารละลายผสมสำหรับกัดชั้นพอร์ส ตามเวลาที่กำหนดไว้ในแต่ละชิ้นงาน
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 1 ที่อุณหภูมิ 60 °C
- จุ่มในน้ำขจัดไอออน แก้วที่ 2 ที่อุณหภูมิ 60 °C
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

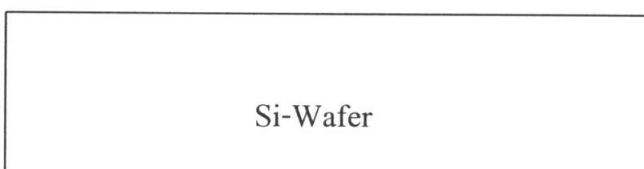
39. ลอกฟิล์ม

- จุ่มในอะซิโตนแก้วที่ 1 เป็นเวลา 1 นาที
- จุ่มในอะซิโตนแก้วที่ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 1
- ล้างน้ำ DI แก้วที่ 2
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

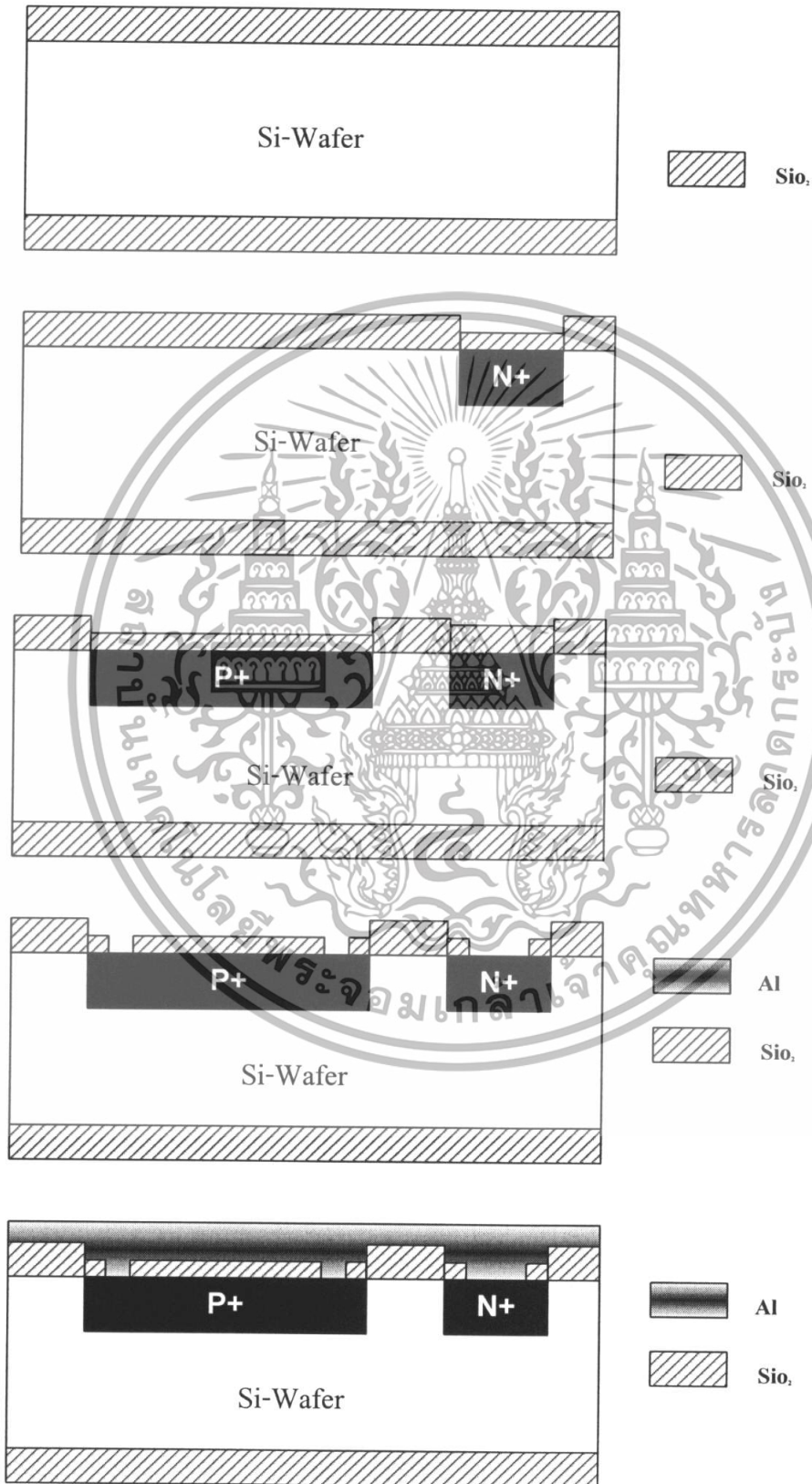


4.3 ลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดโฟโตไดโอดชนิดพินแบบแวนอน

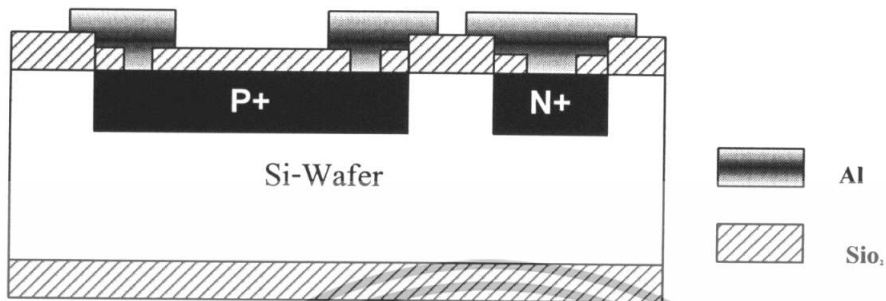
4.3.1 โฟโตไดโอดชนิดพินแบบแวนอนที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นชั้นรับรังสี



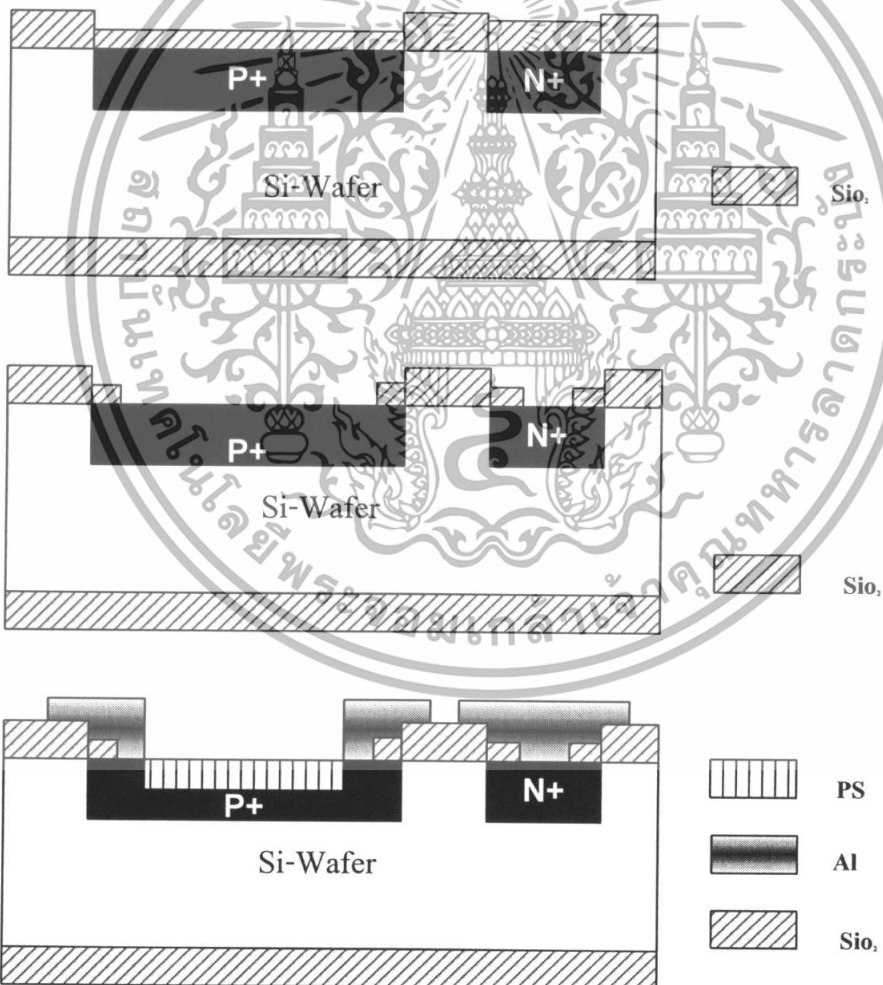
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



#### 4.3.2 โฟโตไดโอดชนิดพื้นแบบแวนอนที่มีชั้นพอร์สติดคอนเป็นชั้นรับรังสี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### การทดลองและผลการทดลอง

ในส่วนนี้จะนำเสนอขั้นตอนหลังจากที่เสร็จสิ้นกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดที่ได้ทำการออกแบบไว้ในบทที่ 4 ต่อไปก็จะเป็นขั้นตอนของการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของไดโอด และการทดลองวัดผลกับการฉายรังสีเอ็กซ์จริง

#### 5.1 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าทั่วไปของโฟโตไดโอด

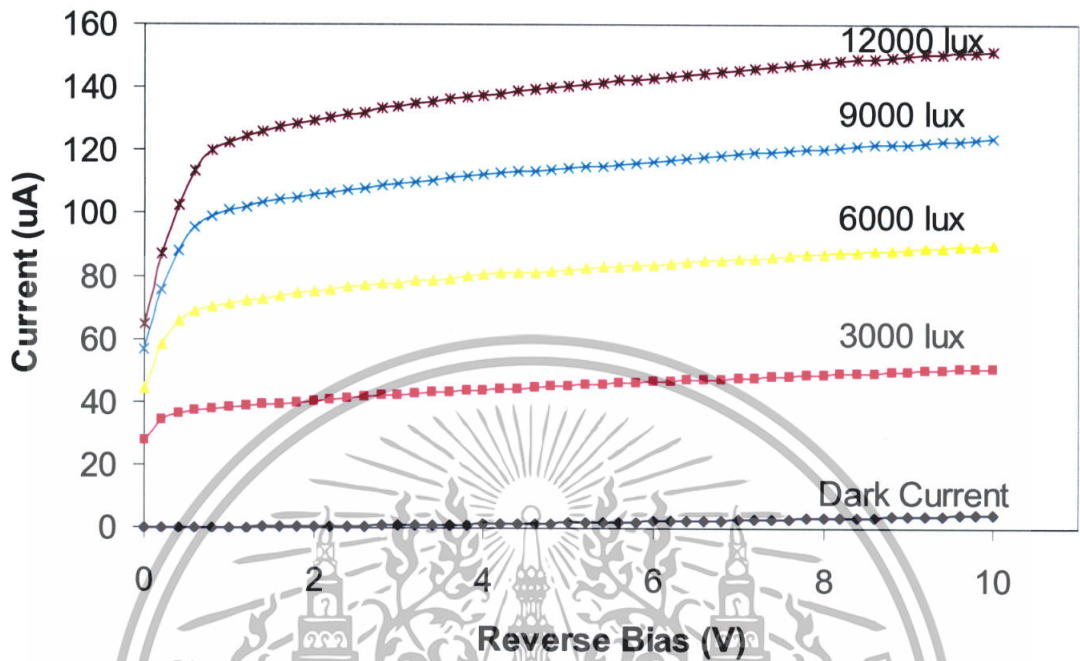
เพื่อศึกษาคุณสมบัติของทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด จึงนำโฟโตไดโอดที่สร้างไปทำการทดลองการทดสอบหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด จากเครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล ดังรูปที่ 5.1



รูปที่ 5.1 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล

โดยเราจะทดสอบเรื่องคุณสมบัติทั่วไปของโฟโตไดโอดได้แก่รอยต่อพีเอ็น (p-n junction), กระแสมืด (dark current) และการตอบสนองต่อแสงที่ตามองเห็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กราฟแสดงคุณลักษณะ I-V โฟโตไดโอดของพินโฟโตไดโอดที่มี  
พอร์ซซีลิกอนเป็นชั้นรับรังสี

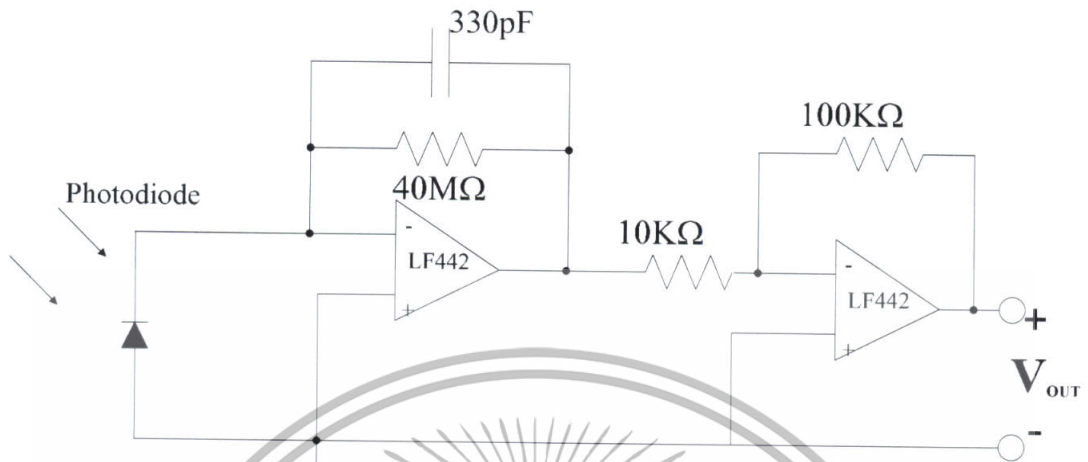
## 5.2 การทดลองกับรังสีเอกซ์

โดยการทดลองการตอบสนองต่อรังสีเอกซ์ของโฟโตไดโอดที่เราสร้างขึ้น ซึ่งมีการทดลอง 2 ส่วนคือ ความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองต่อพลังงานของรังสีเอกซ์ และความเป็นเชิงเส้นของการตอบสนองต่อการลดทอนของรังสีเอกซ์เมื่อมีวัสดุตัวอย่างไร้เป็นฉากกั้น

การฉายรังสีเอกซ์ที่ใช้กันมีอยู่ 2 รูปแบบคือการฉายรังสีโดยตรง (Direct exposure) คือ กระแสจะเกิดจากไดโอดดูดกลืนพลังงานรังสีเอกซ์โดยตรงกับอีกรูปแบบคือแบบโดยอ้อม (Indirect exposure)

โดยในโครงการนี้จะใช้วงจรที่ออกแบบสำหรับการวัดในครั้งนี้โดยเฉพาะ ซึ่งจะไบอัสโฟโตไดโอดในโหมดโฟโตโวลตาอิก (Photovoltaic Mode) หรือไม่ไบอัสไดโอดเลย ทั้งนี้เพื่อลดผลของกระแสมืดซึ่งจะเป็นสัญญาณรบกวน (noise) ดังนั้นสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดจึงมีขนาดเล็กมาก จำเป็นต้องอาศัยภาคขยายที่มีอัตราขยายสูง และมีค่า SNR ที่สูง จึงใช้วงจรสำหรับการทดลองนี้ตามรูปที่ 5.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

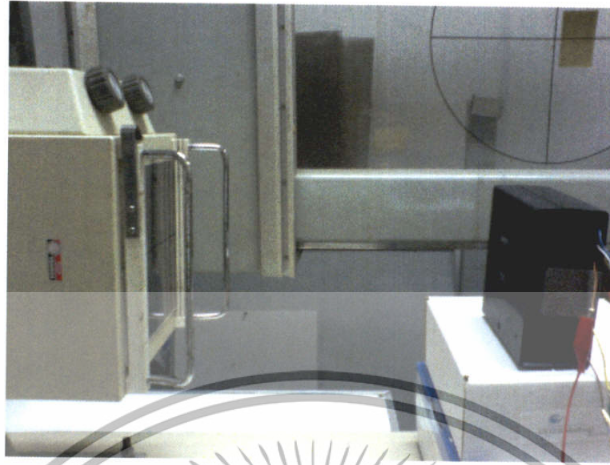


รูปที่ 5.2 วงจรที่ใช้สำหรับทดลอง

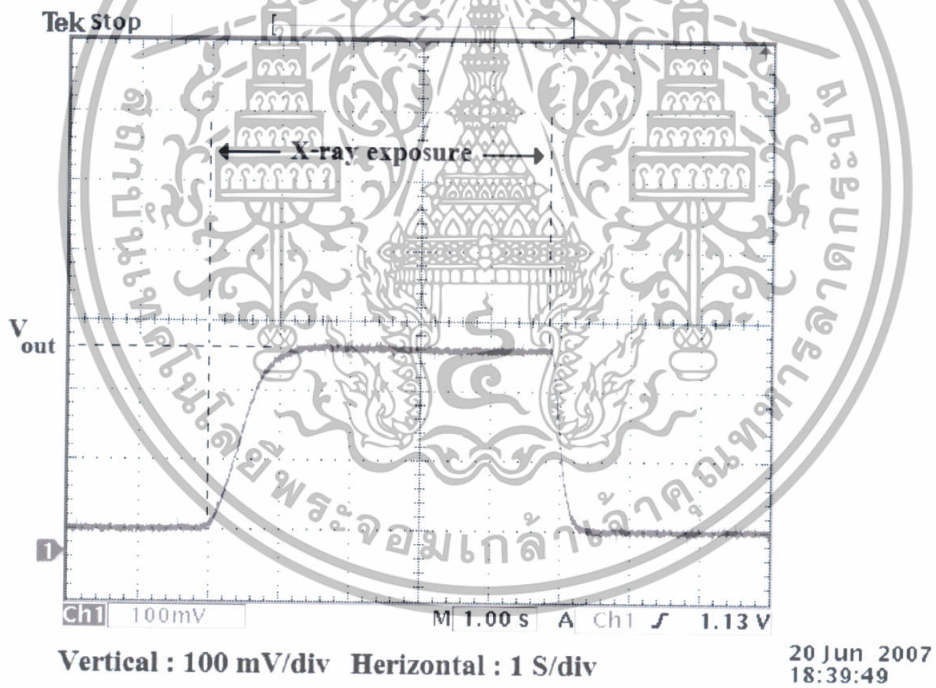


รูปที่ 5.3 เครื่องฉายรังสีเอกซ์ที่ใช้ทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 การจับชุดทดลองกับเครื่องจ่ายรังสีเอกซ์



รูปที่ 5.5 สัญญาณ Output ที่วัดได้ที่ทางออกของวงจรขยาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

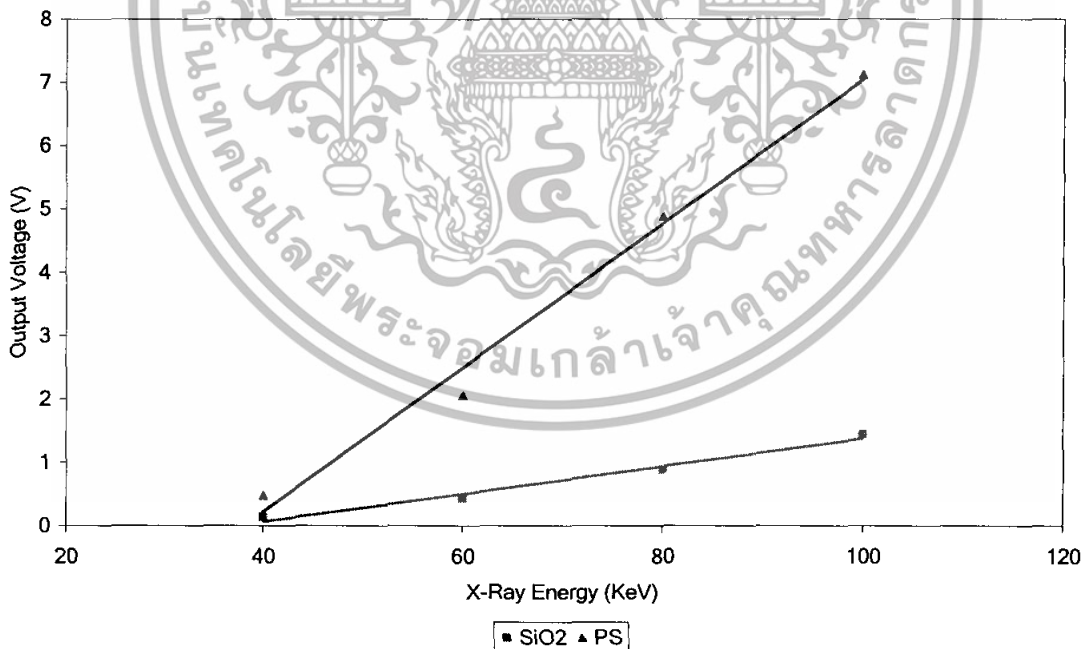
การทดลองทั้งสองส่วนจะใช้ทดลองเพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ของโฟโตไดโอดชนิดพินแบบธรรมดา (มีซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นรับแสง) กับของโฟโตไดโอดชนิดพินที่ออกแบบขึ้นใหม่ (มีชั้นพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง) โดยจะทดลองฉายรังสีเอ็กซ์ทั้งแบบโดยตรง (Direct) และแบบโดยอ้อม (Indirect) ที่มีแผ่นฟอสเฟอร์ (Phosphors) ทำหน้าที่เป็นซิลทิเลเตอร์ (Scintillators) เปลี่ยนรังสีเอ็กซ์เป็นแสงที่ตามองเห็น

ซึ่งจากผลการทดลองทั้งหมดจะทำให้ได้ข้อสรุปผลของการใช้ชั้นพอร์ซิลิคอนมาช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพิน และกระบวนการสร้างที่เหมาะสมต่อการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดสำหรับการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์

### 5.2.1 การตอบสนองต่อพลังงานของรังสีเอ็กซ์

การทดลองในส่วนนี้ตอนแรกเราทดลองฉายรังสีเอ็กซ์ที่ระดับพลังงานค่า 40, 60, 80 และ 100 KeV ทั้งกรณีการฉายโดยตรงและโดยอ้อม ซึ่งเราสามารถนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เป็นกราฟแสดงความสัมพันธ์ได้ดังนี้

**การเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างพินไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง**



กราฟแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และพอร์ซิลิคอนเป็นชั้นรับแสงในกรณีการฉายรังสีโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากการทดลองในส่วนของการฉายรังสีเอ็กซ์โดยตรงนั้นจะเกิดปัญหาการเกิดการเหนียวนาประจุขึ้นที่บริเวณผิวรอยต่อระหว่างซิลิคอนกับชั้นรับแสงทำให้เกิดการลัดวงจร ทำให้การตรวจวัดโดยการฉายรังสีเอ็กซ์โดยตรงไม่สามารถนำผลมาสรูปรวมกันได้จึงขอตัดการทดลองในส่วนนี้ออกจากการวิเคราะห์ในโครงการนี้

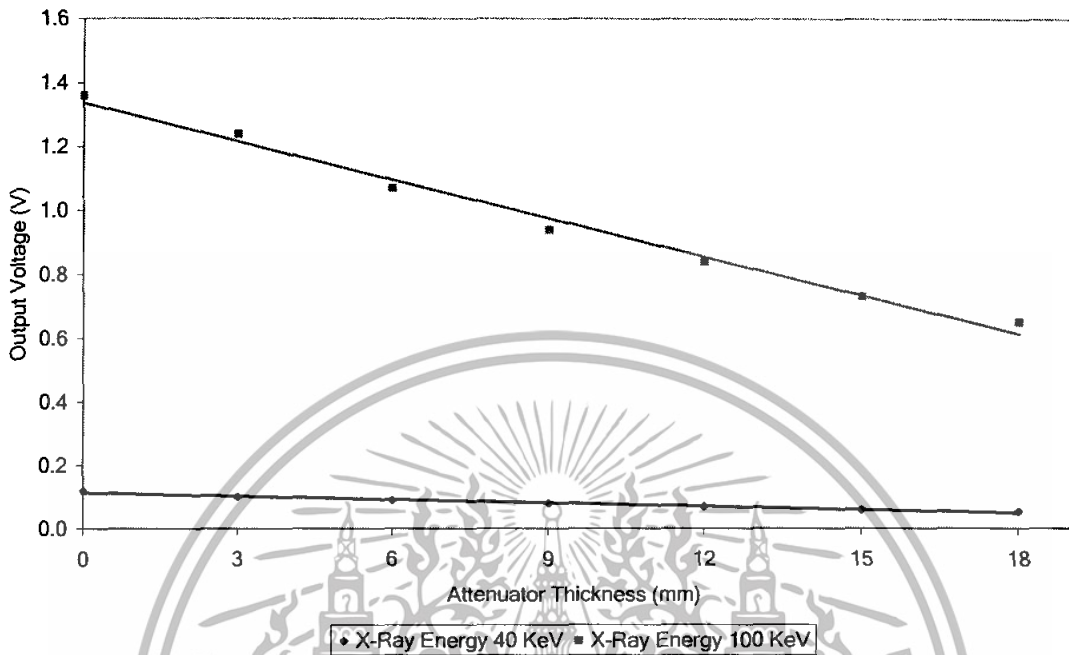
จากกราฟจะเห็นว่าพิน โฟโต ไดโอดที่มีพอร์สเป็นชั้นรับแสงจะให้ผลการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ในกรณีของการฉายรังสีโดยอ้อมได้ดีกว่าซิลิคอนออกไซด์ เหตุผลเพราะว่าการฉายโดยอ้อมจะผ่านแผ่นฟอสเฟอร์ซึ่งจะให้แสงในช่วงประมาณ 550 นาโนเมตรซึ่งพอร์สซิลิคอนจะมีคุณสมบัติการดูดซับและลดการสะท้อนแสงได้ดีจึงช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของพิน โฟโต ไดโอดได้มากกว่าซิลิคอนไดออกไซด์

### 5.2.2 การตอบสนองต่อการลดทอนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีวัสดุตัวอย่างฉากกัน

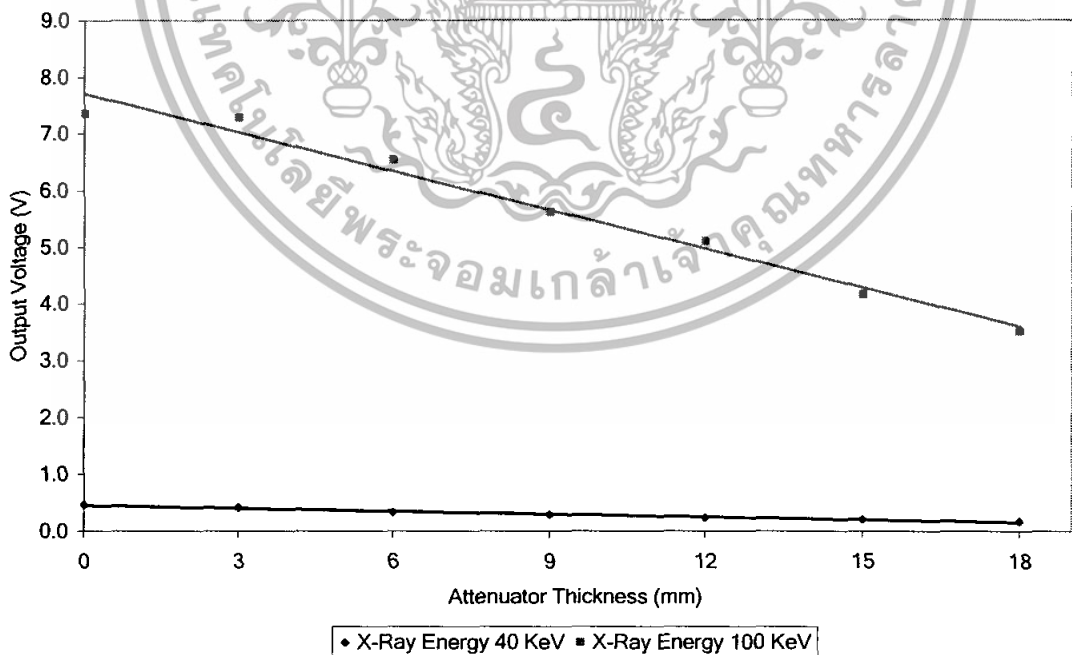
การทดลองในส่วนนี้เราใช้แผ่นอะคริลิกเป็นวัสดุตัวอย่างฉากกัน ซึ่งเป็นการจำลองการประยุกต์ใช้งานการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ในชีวิตประจำวันเช่นการวินิจฉัยทางการแพทย์ซึ่งอาจจะมีการใช้การประมวลผลภาพซึ่งมีการแปลงระดับสัญญาณมาเป็นความเข้มของภาพ ซึ่งต้องการตัวตรวจวัดที่มีความเป็นเชิงเส้นต่อการตอบสนองต่อการลดทอนของรังสี เพื่อความง่ายและความแม่นยำต่อการเขียนโปรแกรมประมวลผลภาพ

โดยในการทดลองได้ใช้แผ่นอะคริลิกซึ่งมีความหนา 3 , 6, 9, 12, 15 และ 18 มิลลิเมตร ไปเป็นฉากขวางรังสี แล้วฉายรังสีโดยอ้อมกับพิน โฟโต ไดโอดที่สร้างทั้งแบบพอร์สซิลิคอนและแบบซิลิคอนไดออกไซด์

### การทดลองการตอบสนองต่อการลดทอนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีสิ่งกีดขวางรังสี



กราฟแสดงการตอบสนองต่อการลดทอนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีสิ่งกีดขวางรังสีของแบบที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นรับรังสีในกรณีการฉายรังสีโดยอ้อม



กราฟแสดงการตอบสนองต่อการลดทอนของรังสีเอ็กซ์เมื่อมีสิ่งกีดขวางรังสีของแบบที่มีชั้นพอร์ส

ซิลิคอนเป็นชั้นรับรังสีในกรณีการฉายรังสีโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดลองในส่วนนี้เรายังต้องการศึกษาความเป็นเชิงเส้นของผลตอบสนองต่อการลดทอนว่าความเป็นเชิงเส้นมีเงื่อนไขที่เกี่ยวกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ด้วยหรือไม่จึงทดสอบที่พลังงาน 40 KeV และ 100 KeV และผลที่ได้ก็พบว่าเป็นเชิงเส้นทั้งคู่จึงบอกได้ว่าน่าจะได้ผลการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นตลอดทั้งช่วงนี้

จากการทดลองพบว่า ในแต่ละกราฟพบว่าที่ระดับพลังงาน 40 KeV. จะให้ความเป็นเชิงเส้นที่ต่ำกว่าที่ระดับพลังงาน 100 KeV. ชุดการทดลองที่มีความเป็นเชิงเส้นมากที่สุด ( วัดได้จากค่า  $R^2$  ทางคณิตศาสตร์) คือชุดซิลิคอน ไดออกไซด์ในกรณีการฉายรังสีโดยอ้อมที่พลังงาน 100 KeV. มีค่าที่ประมาณ 0.989 และต่ำสุดที่ชุดซิลิคอน ไดออกไซด์ในกรณีการฉายรังสีโดยตรงที่พลังงาน 40 KeV. และแบบซิลิคอน ไดออกไซด์จะได้ค่าการตอบสนองที่ต่ำกว่าแบบพอร์สซิลิคอนทำให้มีความละเอียดในการตรวจวัดต่ำกว่า และในส่วนการฉายรังสีโดยตรงที่ระดับพลังงานต่ำ (40 KeV.) เราพบว่าแบบพอร์สซิลิคอนจะให้การตอบสนองได้ดีกว่า

การทดลองในส่วนนี้เรายังต้องการศึกษาความเป็นเชิงเส้นของผลตอบสนองต่อการลดทอนว่าความเป็นเชิงเส้นมีเงื่อนไขที่เกี่ยวกับพลังงานของรังสีเอ็กซ์ด้วยหรือไม่จึงทดสอบที่พลังงาน 40 KeV และ 100 KeV และผลที่ได้ก็พบว่าเป็นเชิงเส้นทั้งคู่จึงบอกได้ว่าน่าจะได้ผลการตอบสนองที่เป็นเชิงเส้นตลอดทั้งช่วงนี้

## บทที่ 6

### สรุปและวิจารณ์

ในปฏิญยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการศึกษาการออกแบบและกระบวนการสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิดพินสำหรับการใช้งานตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ สำหรับการทดลองในตอนแรกเป็นการทดลองเพื่อทดสอบคุณสมบัติทั่วไปของโฟโตไดโอด ซึ่งพบว่าโฟโตไดโอดที่เราสร้างมีคุณสมบัติเป็นโฟโตไดโอดที่ดีโดยที่มีกระแสมีค่าอยู่ที่ประมาณ 5 ไมโครแอมแปร์ และมีกระแสแสงประมาณ 0.15 มิลลิแอมแปร์ที่แรงดันไฟไบอัสย้อนกลับ 10 โวลต์ และความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ และมีความสัมพันธ์ของการตอบสนองทางแสงเป็นเชิงเส้นซึ่งเหมาะที่จะนำไปใช้งานในงานตรวจวัดแสง

พินโฟโตไดโอดที่มีพอร์สเป็นชั้นรับแสงจะให้ผลการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ในกรณีของการฉายรังสีโดยอ้อมได้ดีกว่าซิลิคอนออกไซด์ แต่ยังไม่สามารถนำไปใช้กับการฉายรังสีโดยตรงได้

ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างพินโฟโตไดโอดที่มีชั้นรับแสงเป็นซิลิคอนไดออกไซด์และพอร์สซิลิคอน เราพบว่า ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดข้อมือด้วยสารละลายผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกซึ่งสามารถสร้างได้ง่ายและประหยัด มีคุณสมบัติเป็นได้ทั้งชั้นดูดกลืนแสงและเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงที่ดี เมื่อนำมาใช้เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงในโฟโตไดโอดชนิดพินจะทำให้กระบวนการสร้างทำได้ง่าย รวดเร็ว ไม่ยุ่งยาก และสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายน้อย ยิ่งไปกว่านั้นโฟโตไดโอดชนิดพินที่มีชั้นพอร์สซิลิคอนเป็นชั้นรับแสง ยังสามารถให้กระแสแสงและประสิทธิภาพการแปลงพลังงานได้สูงกว่าซิลิคอนไดออกไซด์

ในส่วนหลังจะเป็นการทดลองเกี่ยวกับการนำไปใช้งานตรวจวัดรังสีเอ็กซ์ ในการทดลองเราใช้งานโฟโตไดโอดในโหมดของโฟโตโวลตาอิกเพื่อลดผลของกระแสมีดและสัญญาณรบกวน เมื่อไม่มีการไบอัสย้อนกลับก็ทำให้โฟโตไดโอดกำเนิดกระแสแสงได้น้อยลง ทำให้ได้ผลตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ที่มีค่าต่ำมากจึงต้องใช้วงจรเปลี่ยนกระแสเป็นแรงดันและขยายด้วยอัตราขยายสูงๆ ซึ่งจากผลการทดลองเราจะพบว่าพินโฟโตไดโอดที่เราสร้างมีการตอบสนองต่อรังสีเอ็กซ์ระหว่างพลังงานของรังสีเอ็กซ์และผลการตอบสนองเป็นไปอย่างเชิงเส้น และยังมีการตอบสนองต่อการลดทอนของรังสีเมื่อมีแผ่นกีดขวางของรังสีเป็นไปอย่างเชิงเส้นเช่นกัน (เป็นการจำลองการใช้งานฉายรังสีเพื่อการตรวจสิ่งแปลกปลอมภายในของวัตถุต่างๆ เช่น กระเป่า หรือการวินิจฉัยทางการแพทย์) จึงสรุปได้ว่าพินโฟโตไดโอดที่เราได้ออกแบบและสร้างนี้เหมาะสมที่จะนำไปใช้งานในการตรวจวัดรังสีเอ็กซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บรรณานุกรม

- [1] สรวิศ มุ่งการนา. “เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการกัดข้อมสี่เป็นชั้นลดการสะท้อนแสง” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549
- [2] นายกิติพงษ์ ชัยบำรุงมิตร, นายภาณุวัฒน์ ฤทัยเจริญธรรม. “การพัฒนาซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบพลาสมา” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549
- [3] นายจิรวัดน์ ปราบเขต, นายวสุ สังข์ทอง. “ศึกษากระบวนการสร้างและโครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547
- [4] สมเกียรติ ศุกเดช. เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพมหานคร: แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2544
- [5] สมเกียรติ ศุกเดช. เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2545
- [6] AG Michette & C.J. Buckley. “X-Ray Science & Technology” King’s College London., 1993
- [7] <http://th.wikipedia.org/wiki/>
- [8] <http://www.angelfire.com/ok/xrayweb/>
- [9] [http://www.tantawandental.com/technology05\\_th.html](http://www.tantawandental.com/technology05_th.html)
- [10] <http://www.navy.mi.th/newwww/document/navic/86038.html>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้