

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ

โฟโตไดโอด แบบ interdigitate lateral p-i-n

FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF INTERDIGITATE

LATERAL P-I-N PHOTODIODE



รฟ.  
ก ๖๖๖  
๒๕๕๙

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน..... 72905  
วัน,เดือน,ปี..... 25 ส.ย. 2550

b. 11274154  
i.....

ปฏิยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ  
โฟโตไดโอด แบบ interdigitate lateral p-i-n  
FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF INTERDIGITATE  
LATERAL P-I-N PHOTODIODE



โดย  
นาย กิตติศักดิ์ กาญจนกุล เลขประจำตัว 46010052  
นางสาว แพรวเนตร ธนโกเศศ เลขประจำตัว 46010551

อาจารย์ที่ปรึกษา  
รศ. ดร. สมเกียรติ สุขเดช

ปริญญาานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

ปริญญานิพนธ์เรื่อง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ  
โฟโตไดโอด แบบ interdigitate lateral p-i-n

Fabrication and Characteristics of Interdigitate lateral  
p-i-n photodiode

จัดทำโดย

นาย กิตติศักดิ์ กาญจนกุล

รหัส 46010052

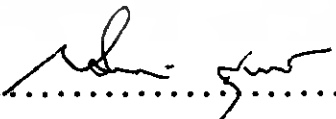
น.ส. แพรวเนตร ธนโกเศศ

รหัส 46010551

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ. ดร. สมเกียรติ สุภเดช

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

ลงชื่อ..........อาจารย์ที่ปรึกษา  
( รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช )

วันที่.../.../...

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# การศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของ โฟโตไดโอด แบบ interdigitate lateral p-i-n

นาย กิตติศักดิ์ กาญจนกุล รหัส 46010052  
นางสาว แพรวเนตร ธนโกเศศ รหัส 46010551  
รศ. ดร. สมเกียรติ ศุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา  
ปีการศึกษา 2549

## บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้จะกล่าวถึงการศึกษากระบวนการสร้างโฟโตไดโอด ชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบพลาแนรี (Planar) แบบวงแหวน และแบบอินเตอร์ดิจิต (interdigitate) โดยใช้เทคโนโลยีในการแพร่อะตอมฟอสฟอรัสและโบรอน ลงบนผิวหน้าของแผ่นซิลิกอน อินทรีนซิค สภาพความต้านสูง  $2000\ \Omega\text{-cm}$  ระบาย (111) ซึ่งโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ทั้ง 3 รูปแบบนี้ เราจะศึกษาว่ารูปแบบไหนสามารถให้กระแสแสงได้มากที่สุด ในขนาดพื้นที่รับแสงที่เท่ากัน และศึกษาผลของกระแสมีดของทั้ง 3 รูปแบบ เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิด p-i-n เป็นโครงสร้างที่มีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ จึงเป็นอุปกรณ์ที่น่าสนใจทำการศึกษา ในกระบวนการสร้างเราได้ทำการออกแบบและศึกษาผลของแฟลคเตอร์ต่างๆที่น่าสนใจ เช่น ผลการตอบสนองต่อสัญญาณแสงและผลการตอบสนองทางความถี่จากการทดลอง คือ การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนพื้นที่รับแสงระหว่าง  $p^+$  และ  $n^+$  ทั้งในแบบพลาแนรี แบบวงแหวน และแบบอินเตอร์ดิจิต จากข้อมูลการทดลองที่จะได้จะทำให้เรารู้ว่าโฟโตไดโอด ชนิด p-i-n รูปแบบไหนเป็นรูปแบบที่มีศักยภาพดีที่สุด

# Fabrication and Characteristics of Interdigitate lateral p-i-n photodiode

Mr. Kitisak Kanjanakun ID. 46010052

Miss Preawnet Dhanakoses ID. 46010551

Assoc. Prof. Dr.Somkiat Supadech Advisor

Education Year 2006

## Abstract

This report refer the study of three types of p-i-n photodiode structure: Planar, Ring and Interdigitate fabrication by using Phosphorus and Boron atom diffusion technology on surface of plane intrinsic Silicon wafer (111) with high resistivity  $2000\ \Omega\text{-cm}$ . In the study, we intended to observe which of three types of p-i-n photodiode structure would be able to gave the most photo current on the equally area as well as the dark current that would occurred. The p-i-n photodiode structure has low capacitance therefore, it is an interesting device to study. In fabrication processes, we designed and studied various interesting factors such as the response to the light signal, the response to the frequency etc. from the experiments which are varying the area ratio between p+ and n+ on Planar, Ring and Interdigitate structure. From the results of these experiments will make us know which structure is the most potential of these three structures.

## กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบผลสำเร็จล่วงได้ด้วยดี เนื่องจากผู้จัดทำได้รับความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ. ดร. สมเกียรติ สุขเดช ที่ได้ให้คำชี้แนะแนวทางในการแก้ไขปัญหารวมทั้งรายละเอียดต่างๆที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับปริญญาานิพนธ์นี้ ผู้จัดทำต้องขอกราบขอบพระคุณท่านอาจารย์เป็นอย่างสูง

นอกจากนี้ ผู้จัดทำยังต้องขอขอบพระคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโท สำหรับความช่วยเหลือและการดูแลเอาใจใส่ ให้คำปรึกษาและคำชี้แนะ รวมถึงรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ และต้องขอขอบคุณเพื่อนๆทุกคน ที่คอยช่วยเหลือและเป็นกำลังใจตลอดมา

ขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้ปริญญาานิพนธ์สำเร็จได้ด้วยดี สุดท้ายนี้ที่ลืมไม่ได้เลย ต้องขอกราบขอบพระคุณคุณแม่และครอบครัวของผู้จัดทำ ที่คอยสนับสนุนทั้งกำลังใจและกำลังใจทรัพย์อย่างเต็มที่ตลอดมา

(นาย กิตติศักดิ์ กาญจนกุล)

(น.ส. แพรวเนตร รนโกเศศ)

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV-V
สารบัญรูป	VI-VII
สารบัญตาราง	VIII
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ประวัติและความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของรายงาน	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 ปรัชญาการรียรอยต่อพีเอ็น ในภาวะสมดุล	3
2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	6
2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	9
2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	12
2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็น ไม่ได้รับแสง	12
2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแสง (Illumination)	13
2.5 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง (Optical detector principle)	14
2.5.1 การดูดกลืน (Absorption)	15
2.5.2 ค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency)	16
2.5.3 ผลการตอบสนอง (Responsively)	17
2.5.4 ความเร็วของการตอบสนอง (Speed of response)	18
2.6 โฟโตไดโอด	19
2.6.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ	20
2.6.2 คุณสมบัติในการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน	22
2.7 ซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	23
2.8 Lateral Surface PIN Photodiode แบบ interdigitate	26
2.8.1 คุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิด pin ที่มีโครงสร้างแบบ interdigitate	27

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 3 การออกแบบและขั้นตอนการสร้าง Interdigitate lateral PIN Photodiode</b>	28
3.1 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบ interdigitate	28
3.2 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบ interdigitate	36
<b>บทที่ 4 การทดลองและผลการทดลอง</b>	39
4.1 การทดลองเพื่อหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics)	44
4.2 การทดลองเพื่อหากระแสมืด( $I_{dark}$ )	45
4.3 การทดลองเพื่อหากระแสแสง( $I_{photo}$ )	45
4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนคู่ $p^+$ และ $n^+$ ของโครงสร้างแบบ interdigitate	49
4.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความยาว $p^+$ และ $n^+$ ของโครงสร้างแบบ interdigitate	51
<b>บทที่ 5 วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง</b>	52
<b>บรรณานุกรม</b>	56

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โฟโตไดโอดชนิด pin ที่มีโครงสร้างแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate	2
รูปที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	3
รูปที่ 2.2 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีไบอัส	4
รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น	5
รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นใน ภาวะสมดุล	5
รูปที่ 2.5 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพีเอ็น	6
รูปที่ 2.6 แสดงรอยต่อพี-เอ็น เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสตรง	7
รูปที่ 2.7 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับ ไบอัสตรง	7
รูปที่ 2.8 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในขณะ ก) ไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ ข) ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง $V_A$	9
รูปที่ 2.9 แสดงรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	10
รูปที่ 2.10 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	11
รูปที่ 2.11 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในขณะ ก) ไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ ข) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ $-V_A$	12
รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	12
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง	14
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n	23
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ และศักดาไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ตามลำดับ	24
รูปที่ 2.16 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ก) การให้ไบอัสแก่ไดโอด ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง	25
รูปที่ 2.17 Lateral surface PIN photodiode with interdigitate structure	26

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า	
รูปที่ 3.1	กระบวนการสร้าง Lateral surface p-i-n photodiode แบบ interdigitate	36-37
รูปที่ 3.2	กระจก mask I-IV ที่ใช้ในการทดลอง	38
รูปที่ 4.1	โครงสร้างของ planar pin photodiode ที่ใช้ในการทดลอง	39
รูปที่ 4.2	โครงสร้างของ pin photodiode แบบวงแหวน ที่ใช้ในการทดลอง	40
รูปที่ 4.3	โครงสร้างของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ที่ใช้ในการทดลอง	41
รูปที่ 4.4	โครงสร้างของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ที่ใช้ในการทดลอง	42
รูปที่ 4.5	โครงสร้างของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ที่ใช้ในการทดลอง	43
รูปที่ 4.6	กราฟแสดงความสำคัญของกระแสและแรงดันของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ที่เวลาในการแพร่สารเจือ $p^+$ เท่ากับ 45 นาที่ (ความลึก = 0.660 $\mu\text{m}$ ) และพื้นที่รับแสง C2	44
รูปที่ 4.7	กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่ $p^+$ และ $n^+$ ของ pin photodiode ชุด B	45
รูปที่ 4.8	กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่รับแสงจาก $n^+$ เป็น $p^+$ โดยเปรียบเทียบทั้ง โครงสร้างแบบ planar แบบ วงแหวน และแบบ interdigitate ที่แรงดันย้อนกลับ 10V ความเข้มแสง 12000 Lux	46
รูปที่ 4.9	กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ของ โครงสร้างแบบ planar แบบ วงแหวนและแบบ interdigitate ที่พื้นที่รับแสง $p^+$ เท่ากันคือ 2.894 $\text{mm}^2$	47
รูปที่ 4.10	กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่พื้นที่รับแสง C4	48
รูปที่ 4.11	กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆที่พื้นที่รับแสง C4	48
รูปที่ 4.13	กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่ $p^+$ และ $n^+$	49
รูปที่ 4.14	กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่ $p^+$ และ $n^+$	50
รูปที่ 4.15	กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อความเข้มแสงค่าต่างๆ	50
รูปที่ 4.16	กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว $p^+$ และ $n^+$	51
รูปที่ 4.17	กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว $p^+$ และ $n^+$	51

## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ 300K	16
ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ ของ planar pin photodiode	39
ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ ของ pin photodiode แบบวงแหวน	40
ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate	41
ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate	42
ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate	43



## บทที่ 1

### บทนำ

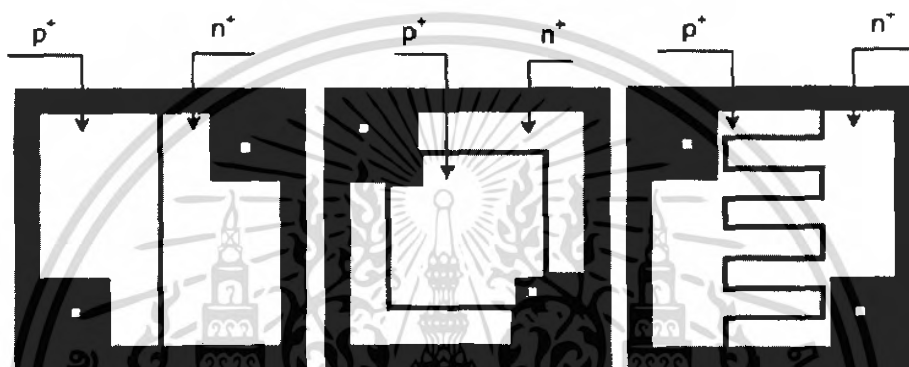
#### 1.1 ประวัติและความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพลังแสง (Optical Semiconductor Device) และงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optical Electronics) เป็นงานที่ได้รับการพัฒนา และก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทั้งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทุก ๆ ด้านอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยแสง (Opto-Communication System) การสื่อสารระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งความเร็ว ความแม่นยำ และความประหยัด เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิม สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงที่สำคัญ ๆ ได้แก่ โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) หรือตัวตรวจจับแสง โฟโตไดโอด (Photodiode) หรือ ไอโอดพลังแสงชนิดต่าง ๆ เช่น โฟโตไดโอดแบบ p-i-n (p-i-n Photodiode) โฟโตไดโอดแบบอะวาแลนซ์ (Avalanche Photo Diode) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky photodiode) โฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำพลังแสงที่มีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าหรือกระแสซึ่งจะนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์พลังแสงจะต้องมีคุณสมบัติการดูดกลืนแสง (Optical Absorption) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ดี และสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ในวงจรได้ดี และโฟโตไดโอดยังเป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจจับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน (internal photoelectric) มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อ p-n เมื่อมีแสงตกกระทบที่รอยต่อ p-n จะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าและแรงดันขึ้น โดยความหมายกว้างๆแล้วอาจรวมเซลล์แสงอาทิตย์ด้วยก็ได้ แต่โดยทั่วไปเมื่อก้าวถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจจับความเข้มแสง ปัจจุบันโฟโตไดโอดแบบรอยต่อ pn มีราคาไม่แพงและมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์ไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ และมีการผลิตโฟโตไดโอดจากวัสดุสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น Si , GaAs , GaAsP และ GaP ซึ่งไวต่อแสงในย่านความยาวคลื่นต่างๆกัน

โฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบแนวนอน (Lateral surface PIN photodiodeแบบ interdigitate) มีการพัฒนามาจาก p-n โฟโตไดโอด โดยภายในโครงสร้างมีการสร้างชั้น i ชั้นตรงกลางระหว่างชั้น p และชั้น n ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูง หรือมีสารเจือปนปริมาณน้อยมาก และมีการสร้างชั้น i , p<sup>+</sup> และ n<sup>+</sup> จำนวนมากกว่าแบบ PIN ธรรมดา Lateral surface PIN photodiode แบบ interdigitate เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา เนื่องจากการที่มีชั้น  $i$  จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการการทำงานอย่างรวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสง เป็นต้น นอกจากนั้นการที่มีชั้น  $i$ ,  $p^+$  และ  $n^+$  มีจำนวนมากกว่าแบบ PIN ธรรมดา จึงทำให้มีผลรวมของ บริเวณปลดพาหะ(depletion region) มากกว่า ทำให้เกิดกระแสได้มากกว่า



รูปที่ 1.1 โฟโตไดโอดชนิด pin ที่มีโครงสร้างแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate

## 1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของรายงาน

วัตถุประสงค์และขอบเขตของรายงานมีดังนี้

1. ศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้า ของโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate
2. ฝึกทักษะในการใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ในกระบวนการสร้างและวัดคุณสมบัติต่างๆของตัวอุปกรณ์
3. ศึกษาผลของความเข้มแสง ขนาดของพื้นที่รับแสง และพารามิเตอร์ต่างๆ ที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate
4. สามารถที่จะนำความรู้ไปใช้ในการพัฒนาอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้

## บทที่ 2

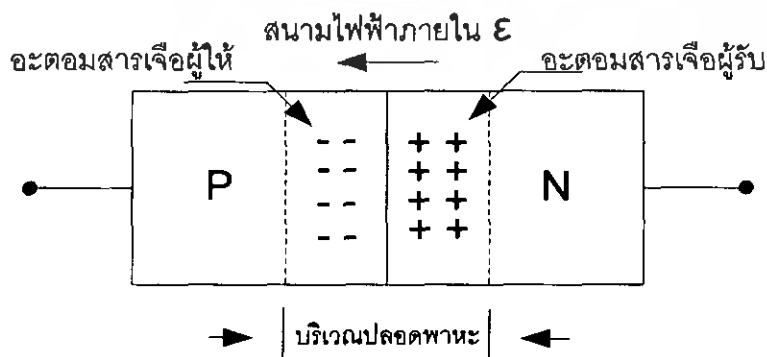
### ทฤษฎี

เนื่องจากโฟโตไดโอดชนิด  $p-i-n$  แบบแนวนอน (Lateral Surface PIN photodiode) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ชนิดหนึ่งซึ่งใช้วิธีการแพร่สารเจือปน (impurity) เอนและพี เข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและความรู้ทั่วไปของทฤษฎีรอยต่อพี-เอ็น ดังต่อไปนี้

#### 2.1 ปรากฏการณ์รอยต่อพีเอ็น ในภาวะสมดุล

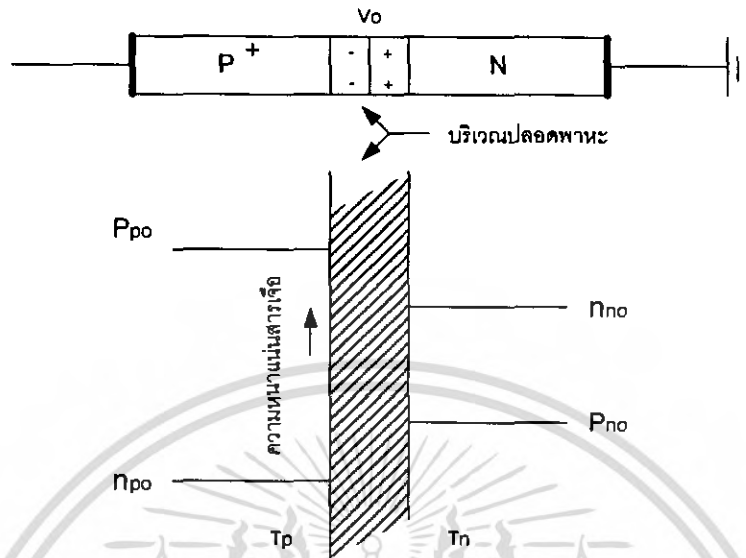
โฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี มีความหนาแน่นมากกว่า โฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก็จะมากกว่าด้านชนิดพี ด้วยความหนาแน่นที่ต่างกันจึงเกิดการแพร่ประจุพาหะจากทางด้านที่มีความหนาแน่นกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า การแพร่จะแพร่ผ่านรอยต่อพีเอ็น และเกิดการรวมตัว (Recombination) ระหว่างอิเล็กตรอนและโฮล มีผลทำให้อะตอมสารเจือปนบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อกลายเป็นไอออน และแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมา อะตอมสารเจือชนิดเอ็นจะสูญเสียอิเล็กตรอนและจะแสดงตัวเป็นไอออนบวก และทางด้านพีจะสูญเสียโฮลไป และ ทำให้อะตอมแสดงตัวเป็นไอออนลบ ทำให้เกิดสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น บริเวณรอยต่อ ซึ่งสนามไฟฟ้าจะต้านการแพร่ของประจุพาหะทั้งสองชนิด จนในที่สุดสู่จุดสมดุลที่ไม่เกิดการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

บริเวณที่เป็นไอออนลบ และไอออนบวกทั้ง 2 ผังเรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณนี้จะทำให้เกิดความต่างศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in Voltage) ซึ่งเป็นแรงดันที่ต้านการเคลื่อนที่ ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ ดังแสดงในรูป 2.1



รูปที่ 2.1 แสดงคุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

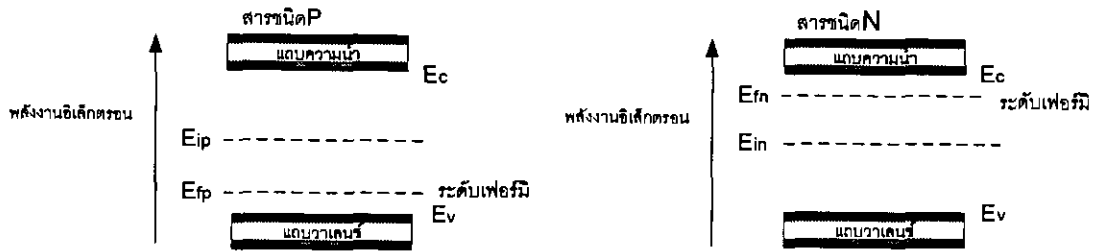


รูปที่ 2.2 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะที่ไม่มีไบอัส

จากรูปที่ 2.2 การที่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมรอยต่อพี-เอ็น ในบริเวณเปลือยพาหะทำให้เกิดความต่างศักย์ระหว่างด้านพีและด้านเอ็น เราเรียกว่า “ศักย์สัมผัส” (Contact potential,  $V_o$ ) หรือ “แรงดันภายใน” (Built in voltage) ซึ่งเป็นไปตามสมการ 2.1

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

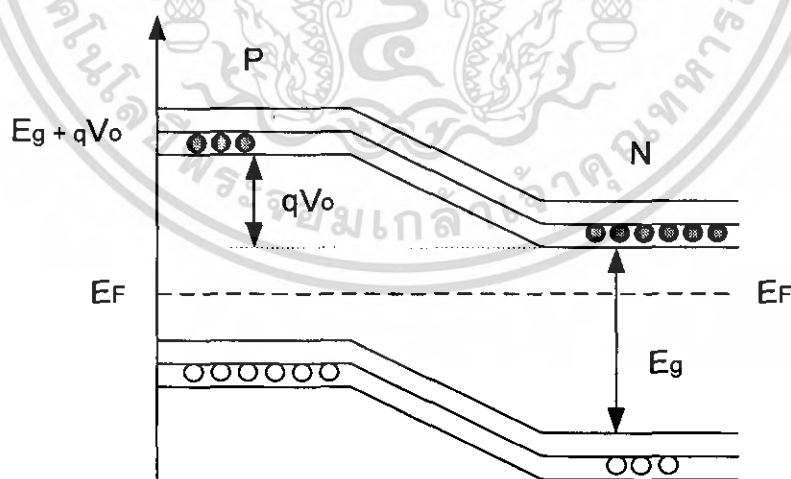
- ซึ่ง
- $V_o$  : ศักย์สัมผัส (โวลต์)
  - $k$  : ค่าคงที่ โบลต์ซมันน์ มีค่า  $8.62 \times 10^{-5}$  eV/เคลวิน
  - $T$  : องศาสัมบูรณ์ (เคลวิน)
  - $q$  : ประจุอิเล็กตรอน  $1.6 \times 10^{-19}$  คุลมบ์
  - $N_A$  : ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ ( $\text{cm}^{-3}$ )
  - $N_D$  : ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ ( $\text{cm}^{-3}$ )
  - $n_i$  : ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ( $\text{cm}^{-3}$ )



รูปที่ 2.3 แสดงลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของด้านพีและด้านเอ็น

### ขณะยังไม่เกิดรอยต่อพี-เอ็น

ในการเขียนลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน (Energy band diagram) เราต้องพิจารณาถึงระดับเฟอร์มิเป็นหลักสำคัญ จากรูปที่ 2.3 จะเห็นว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นมีระดับพลังงาน เฟอร์มิ  $E_f$  ไม่เท่ากัน แต่ในภาวะสมดุลระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อจะต้องต่อเนื่องเป็นระดับเดียวกันตลอดผ่านรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้น เมื่อนำสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมาสัมผัสกันจะเกิดมีการถ่ายเทของพาหะเกิดขึ้น โดยที่อิเล็กตรอนจะไหลจากด้านที่มีระดับ  $E_f$  สูงกว่า คือ ด้านเอ็นไปยังระดับพลังงานที่ว่างในแถบความนำของส่วนพีซึ่งมีระดับ  $E_f$  ต่ำกว่า และโฮลจากส่วนพีก็จะไหลเข้ามายังระดับที่ว่างในแถบวาเลนซ์ของส่วนเอ็น ขณะที่มีการถ่ายเทของพาหะข้ามรอยต่อนี้ ระดับเฟอร์มิจะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อปรับระดับใหม่ จนกระทั่งในภาวะสมดุล ระดับเฟอร์มิของด้านเอ็น และด้านพีจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นใน ภาวะสมดุล

ในภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังสมการที่ 2.2

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

เมื่อ  $X_m$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะในภาวะสมดุล (cm.)

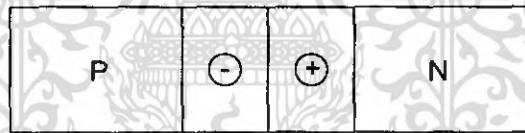
$\varepsilon$  คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ

$V_0$  คือ ศักย์สัมผัส (V.)

นอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (Capacity) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังสมการที่ 2.3

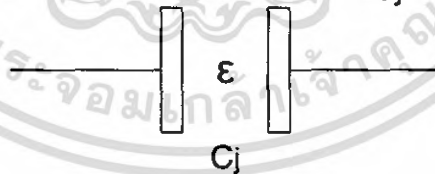
$$C_j = \frac{\varepsilon \cdot q \cdot N_A \cdot N_D}{\sqrt{2(N_A + N_D)} \cdot V_0} \quad \text{F/m}^2 \quad (2.3)$$

เมื่อ  $C_j$  คือ ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ ( $\text{F/m}^2$ )



$X_m$

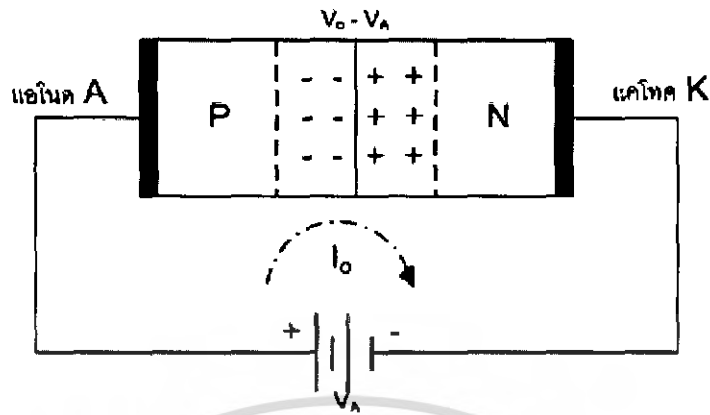
$$C_j = \varepsilon / X_m$$



รูปที่ 2.5 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพีเอ็น

## 2.2 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

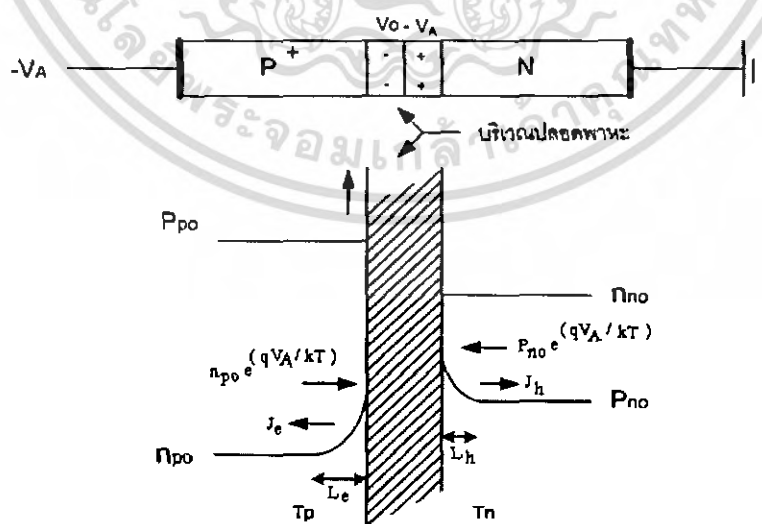
ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แสดงรอยต่อพี-เอ็น เมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรง

จากการพิจารณาว่า ความต้านทานของเนื้อสารกึ่งตัวนำชนิดพี และชนิดเอ็นมีค่าน้อยมาก ดังนั้นแรงดันไบอัสตรงจากภายนอก ( $V_A$ ) จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็นทั้งหมด ในลักษณะที่หักล้างหรือช่วยลดศักย์ไฟฟ้าภายในรอยต่อพี-เอ็น เป็นผลให้แรงดันภายในรอยต่อ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะลดลง น้อยกว่าในกรณียังไม่ได้รับไบอัส ดังนั้น โวลทาจด้านพีสามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นสามารถเคลื่อนที่ไปทางด้านพีได้โดยสะดวก เสมือนรอยต่อพี-เอ็นเป็นตัวนำ ขอมให้กระแสไหลผ่านได้ดี ซึ่งกระแสดังกล่าวจะถูกต้านทานเฉพาะความต้านทานอันเนื่องมาจากเนื้อสารกึ่งตัวนำเท่านั้น ซึ่งมีค่าน้อยมาก

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง เมื่ออิเล็กตรอนถูกฉีดเข้าไปทางด้านพี ปริมาณของอิเล็กตรอนทางด้านพีก็จะเพิ่มขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อขณะได้รับไบอัสตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

เมื่อ	$p_{po}$	คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านพี ในภาวะสมดุล
	$n_{po}$	คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านพี ในภาวะสมดุล
	$n_{no}$	คือ ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
	$p_{no}$	คือ ความหนาแน่นของโฮลทางด้านเอ็น ในภาวะสมดุล
	$L_h$	คือ ระยะการแพร่ของโฮล
	$L_c$	คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอน

การเพิ่มขึ้นของพาหะส่วนน้อยที่ขอบของบริเวณปลอดพาหะ อธิบายได้ด้วย สมการ “กฎของรอยต่อ” โดย

$$p_n|_{r_n} = p_{no} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.4)$$

$$n_p|_{r_p} = n_{po} \cdot e^{\frac{qV_A}{kT}} \quad (2.5)$$

เมื่อ  $p_n|_{r_n}, n_p|_{r_p}$  คือ ความหนาแน่นของโฮลที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ และความหนาแน่นของอิเล็กตรอนที่ปลายสุดของบริเวณปลอดพาหะ ตามลำดับ

เมื่อห่างออกไปจากบริเวณปลอดพาหะ พาหะส่วนน้อยจะมีการลดลง เนื่องจากมีการรวมตัว (Recombination) ของพาหะเกิดขึ้น ทำให้ปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามาลดลงกระทั่งในที่สุด เมื่อห่างจากขอบของบริเวณปลอดพาหะเป็นระยะ  $L_c$  และ  $L_h$  ความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยจะมีค่าเท่ากับในภาวะสมดุล นั่นคือ พาหะส่วนน้อยมีการรวมตัวของพาหะเกิดขึ้นจนหมดสิ้น โดยระยะ  $L_c$  และ  $L_h$  เรียก ระยะการแพร่ (Diffusion length) ของอิเล็กตรอน และโฮล ตามลำดับ

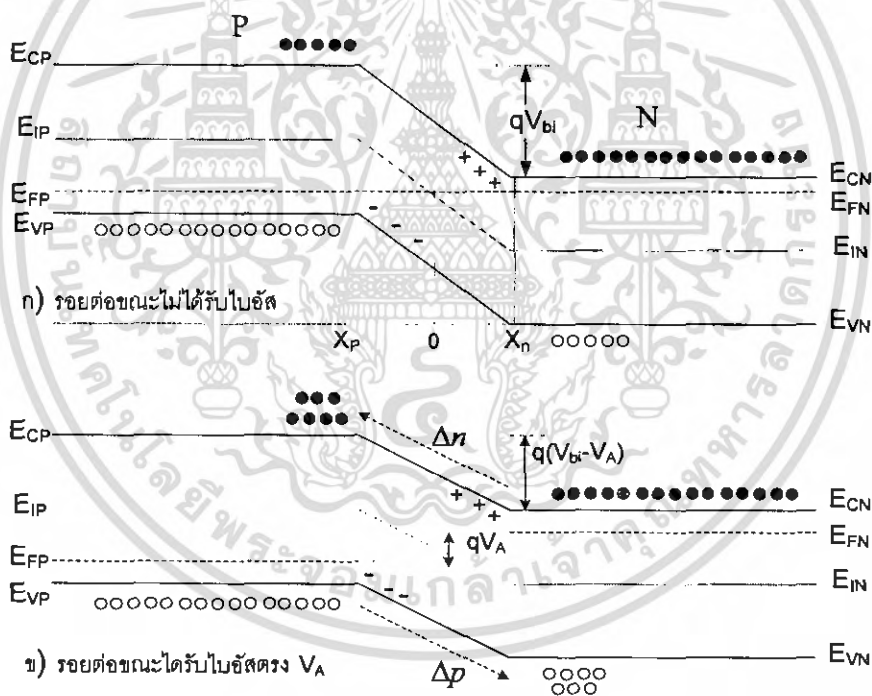
เนื่องจากความหนาแน่นของพาหะส่วนมาก  $n_{no}$  และ  $p_{po}$  มีค่ามากกว่าปริมาณของพาหะที่ถูกฉีดเข้ามารอยต่อ ดังนั้นค่าของ  $n_{no}$  และ  $p_{po}$  ที่บริเวณรอยต่อจะไม่เปลี่ยนแปลง ถึงแม้จะมีการฉีดพาหะเข้ามารอยต่อ เมื่อพิจารณาที่รอยต่อจะเห็นได้ว่า กระแสที่ไหลผ่านรอยต่อ คือ กระแสการแพร่ของพาหะส่วนน้อย ซึ่งสามารถอธิบายได้ด้วยสมการไดโอด หรือเรียกว่า Shockley diode equation หรือสมการเรคตีไฟร์

$$I = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \quad (2.6)$$

$$I_0 = Aqn_i^2 \left( \frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e p_p} \right) \tag{2.7}$$

- โดยที่  $V_A$  คือ แรงดันไบอัสตรงภายนอก
- $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัว
- $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของรอยต่อพี-เอ็น
- $D_h$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของโฮล
- $D_e$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอน

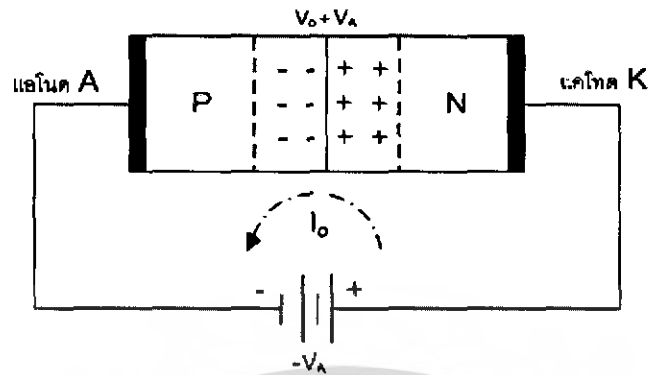
และขณะรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง ทำให้ระดับเฟอร์มิของด้านทั้งสองของรอยต่อแตกต่างกัน แสดงได้ดังรูป 2.8



รูปที่ 2.8 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในขณะ ก) ไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ และ ข) ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง  $V_A$

### 2.3 รอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็น ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบ เมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังรูปที่ 2.9



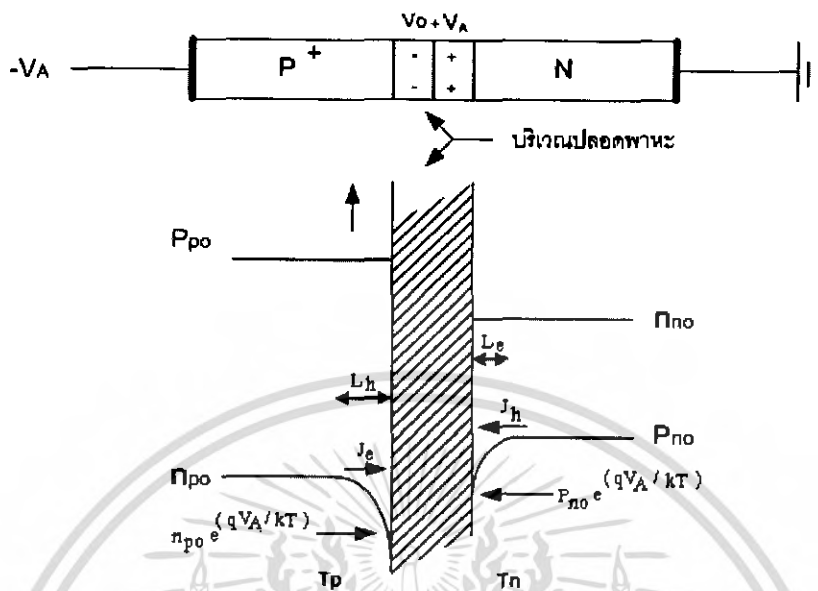
รูปที่ 2.9 แสดงรอยต่อพี-เอ็นเมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

หากให้แรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่า  $V_A$  แล้ว แรงดัน  $V_A$  จะไปช่วยเพิ่มแรงดันภายในที่รอยต่อให้มีค่าสูงขึ้นจากเดิม ทำให้พาหะส่วนมากไม่มีโอกาสที่จะแพร่ข้ามรอยต่อได้ รอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้ จึงกระทำตัวคล้ายฉนวนซึ่งไม่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเพิ่มขึ้น และกว้างกว่าในตอนที่ยังไม่ได้รับการไบอัส

เนื่องจากแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $V_A$  จะทำให้พาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้น ปริมาณความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยใกล้ๆ บริเวณปลอดพาหะจะมีจำนวนลดลงดังรูปที่ 2.10 และสามารถหาความหนาแน่นของพาหะส่วนน้อยได้จากกฎของรอยต่อ คือ

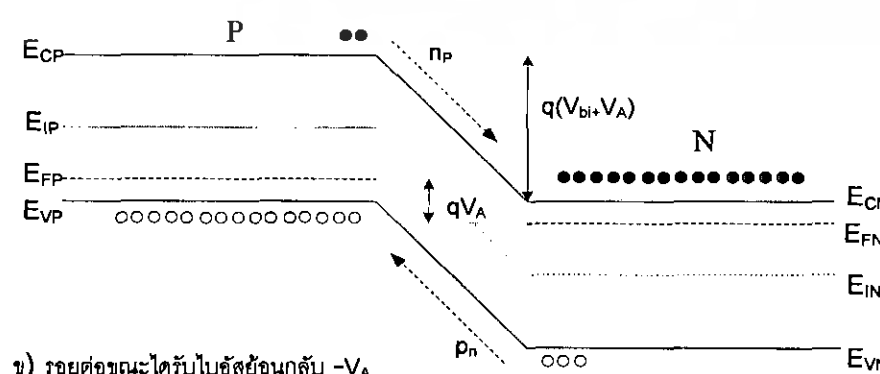
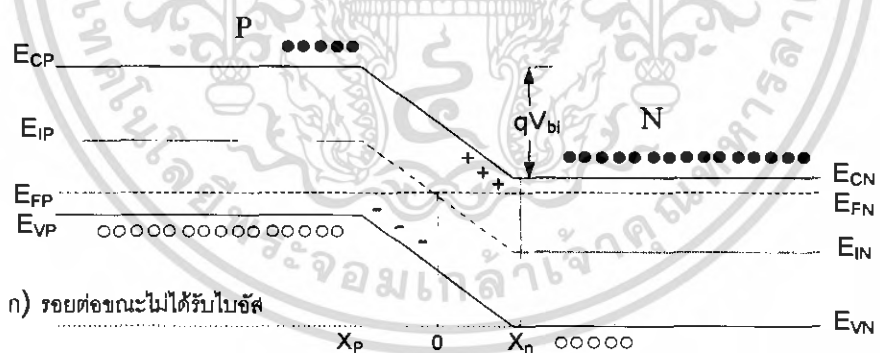
$$p_n|_{i_n} = p_{n0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.8)$$

$$n_p|_{i_p} = n_{p0} \cdot e^{\frac{-qV_A}{kT}} \quad (2.9)$$



รูปที่ 2.10 แสดงความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อ  
 ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ มีผลให้ระดับเฟอร์มีของด้านทั้งสองของ รอยต่อแตกต่างกัน  $qV_A$  ซึ่งใช้อธิบายว่าเกิดมีกระแสของพาหะส่วนน้อยไหลข้ามรอยต่อได้ ดังรูปที่ 2.11



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.11 ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นในขณะ  
ก) ไม่มีแรงดันไบอัสใดๆ และ ข) ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $-V_A$

จากสมการไดโอดในหัวข้อที่แล้ว เมื่อแทนค่าแรงดันไบอัสย้อนกลับ  $-V_A$  จะได้ว่า

$$I \approx -I_0 \quad (2.10)$$

เครื่องหมายลบ หมายถึง กระแสย้อนกลับ มีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีได้รับไบอัส ตรง จะเห็นได้ว่า กระแส  $I_0$  เป็นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับซึ่งมีค่าน้อยมาก และไม่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสที่ให้นอกจากอุณหภูมิของรอยต่อ

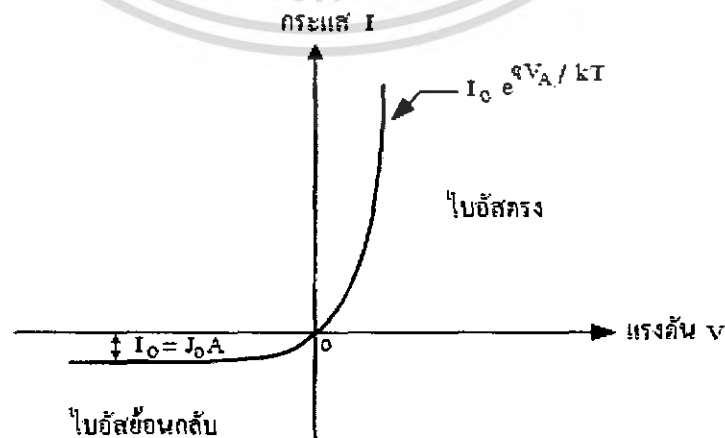
## 2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

### 2.4.1 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่าน รอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอ็กโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้น จากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดัน สามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งกราฟนี้เราได้มาจากสมการที่ 2.6

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.12 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี-เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

$$\text{กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark) } I = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.12 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2 ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง (Illumination)

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง เราพิจารณากันว่า ในลำแสงประกอบไปด้วยกลุ่มของ โฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่ง ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$E_{\text{photon}} = h \cdot \nu \quad (2.12)$$

เมื่อ  $E_{\text{photon}}$  คือ พลังงานของโฟตอน  
 $h$  คือ ค่าคงตัวของพลังค์ =  $6.624 \times 10^{-34}$  joule-sec  
 $\nu$  คือ ค่าความถี่ของคลื่นแสง

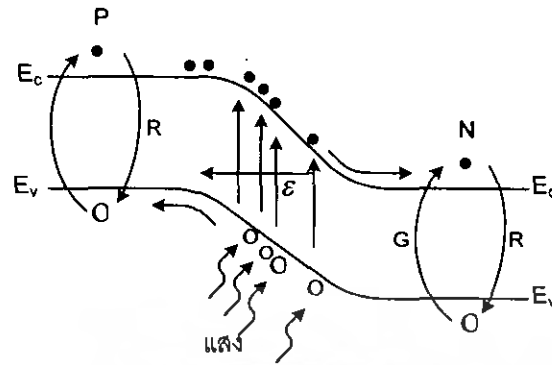
เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ให้สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ (free electron) ในแถบความนำ (conduction band) ได้และทิ้งให้เกิดโฮล ซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่ อิเล็กตรอน-โฮลอิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้ เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.13

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง (Photo current)” หรือเขียนย่อๆ ว่า  $I_p$  หรือ  $I_L$  ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง แสดงได้ดังรูปที่ 2.13 ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

$$\text{กรณีรอยต่อได้รับแสง (illumination)} \quad I = I_0 \left( e^{\frac{qV_A}{kT}} - 1 \right) - I_p \quad (2.13)$$

โดยที่  $I_p$  คือ กระแสเนื่องจากแสง (photo current)  
 และกระแสเนื่องจากแสงสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.14

$$I_p = qAg_{op} (L_p + L_n) \quad (2.14)$$



รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแสง

เมื่อ	$q$	คือ ประจุของอิเล็กตรอน
	$A$	คือ พื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแสง
	$g_{op}$	คือ อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง (Optical Generation Rate)
	$L_n, L_p$	คือ ระยะเวลาแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ

## 2.5 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง (Optical detector principle)

พื้นฐานของการเกิดการตรวจวัดแสง (Optical detection) คือการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล Electron ในส่วนที่เรียกว่า "Intrinsic absorber" โดยแสงที่เข้ามาสำหรับโฟโตไดโอดจะต้องได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะเป็นบริเวณกว้างตรงรอยต่อพี-เอ็น ซึ่งทำให้เกิดสนามไฟฟ้าและเป็นตัวยับยั้งการเคลื่อนที่ของพาหะส่วนมาก (Majority carrier) ที่จะข้ามรอยต่อพี-เอ็น แต่สังเกตได้ว่าสนามไฟฟ้านี้จะเป็นการเร่งให้พาหะส่วนน้อย (Minority carrier) เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพี-เอ็นได้ทำให้เกิดกระแสย้อนกลับ (Reverse leakage current) ของไดโอด ในบริเวณปลอดพาหะนี้เองจะมีลักษณะของ "Intrinsic Condition" เนื่องจากไม่มีพาหะส่วนเกิน (Excess charge) เกิดขึ้น

เมื่อโฟตอน (Photon) ภายนอกเข้ามาในบริเวณหรือใกล้เคียงกับบริเวณปลอดพาหะ โดยโฟตอนนั้นต้องมีพลังงานค่าหนึ่งที่สูงกว่า หรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารที่ใช้สร้างไดโอดนั้น คือ  $h\nu \geq E_g$  ก็จะทำให้คู่อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น พาหะที่เกิดขึ้นนี้จะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นผลักให้เคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน โดยโฮลจะไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะไปทางด้านเอ็น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้นจากกระแสรั่วไหลย้อนกลับเดิมที่มีอยู่เรียกว่ากระแสแสง (Photo current) ในบริเวณปลอดพาหะทำให้ความเร็วของการทำงานของไดโอดลดลง ดังนั้นต้องมีการจำกัดความกว้างของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บริเวณนี้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาในทางสวนกันระหว่างจำนวนของโฟตอนที่เกิดการดูดกลืนซึ่งหมายถึงความไว(Sensitivity) กับความเร็วของการทำงานซึ่งหมายถึงแบนด์วิดซ์นั่นเอง

### 2.5.1 การดูดกลืน(Absorption)

การดูดกลืนโฟตอนในโฟโตไดโอดจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลซึ่งเป็นผลทำให้เกิดกระแสแสงตามมา การดูดกลืนแสงจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืน(Absorption Coefficient( $\alpha_0$ )) ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างไดโอด การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำจะเป็นไปตามสมการ

$$P(x) = P_0(1 - e^{-\alpha_0 x}) \quad (2.15)$$

โดยที่  $P(x)$  คือ กำลังงานของแสงที่ถูกดูดกลืนในช่องว่างระยะทาง  
 $P_0$  คือ กำลังของแสงที่เข้ามา  
 $\alpha_0$  คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงซึ่งขึ้นอยู่กับสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างไดโอดและความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามา

โดยจะทำให้เกิดกระแสแสง( $I_L$ )ตามสมการ

$$I_L = \frac{e(1-r)}{h\nu} P_0(1 - e^{-\alpha_0 d}) \quad (2.16)$$

โดยที่  $e$  คือ จำนวนประจูลีเกิ้ลตรอน  
 $r$  คือ สัมประสิทธิ์ของการสะท้อนกลับพื้นผิวด้านหน้าของไดโอด  
 $h\nu$  คือ พลังงานของโฟตอนที่เข้ามา  
 $d$  คือ ความกว้างของบริเวณการดูดกลืน(Absorption Region)

จะเห็นได้ว่า  $\alpha_0$  ของสารแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามาและสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดใช้ได้กับความยาวคลื่นเพียงช่วงเดียวเท่านั้น ซึ่งเนื่องจากความแตกต่างของแถบช่องว่างพลังงาน(Band gap Energy)

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

ตารางที่ 2.1 แสดงขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ ที่ 300K

โดยการพิจารณาความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถดูดกลืนได้ของสารแต่ละชนิดมีค่าไม่เท่ากัน โดยค่าความยาวคลื่นสูงสุดนี้เรียกว่า Long wavelength cutoff ซึ่งเกิดเนื่องจากผลของช่องว่างพลังงานที่เท่ากันนั่นเอง ดังสมการ

$$h\nu \geq E_g$$

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

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

นั่นคือ Long wavelength cutoff ( $\lambda_c$ ) จะเป็นไปตามสมการ

$$\lambda = \frac{hc}{E_g} \quad (2.17)$$

### 2.5.2 ค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

$$\eta = \frac{\text{number of electron collection at terminal}}{\text{number of incident photon}} = \frac{r_e}{r_p} \quad (2.18)$$

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

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

#### 2.5.3 ผลการตอบสนอง(Responsively)

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

$$R = \frac{I_L}{P_o} \quad (\text{A/W}) \quad (2.19)$$

โดยที่	$I_L$	คือ	ค่ากระแสแสงหน่วยเป็นแอมแปร์(Amperes)
	$P_o$	คือ	Incident Optical Power หน่วยเป็น (Watt)
จาก	$r_p$	คือ	Incident photon rate

$$r_p = \frac{P_o}{h\nu}$$

และ  $r_e$  คือ Electron rate

$$r_e = \eta r_p = \eta \frac{P_o}{h\nu}$$

จาก  $r_e$  เท่ากับจำนวนอิเล็กตรอนต่อวินาที  
ดังนั้น

$$I_p = r_e e$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น **72905** อีกทั้งห้ามมีเหตุที่เบี่ยงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$= \eta \frac{P_o e}{h\nu}$$

และ 
$$R = \frac{he\lambda}{hc} \quad (2.20)$$

#### 2.5.4 ความเร็วของการตอบสนอง (Speed of response)

ความเร็วของการตอบสนองนั้นขึ้นอยู่กับ 3 ส่วนประกอบที่สำคัญ คือ

1. ช่วงเวลาของการครีฟท์ของพาหะบริเวณปลอดพาหะ ส่วนที่จะเป็นปัญหาหลักของการเพิ่มความเร็วของโฟโตไดโอด ดังที่ได้กล่าวมาแล้วว่าการครีฟท์ของพาหะในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังนั้นหากสนามไฟฟ้าอยู่ในช่วงอิมิตัว สามารถประมาณได้ว่าความเร็วของการเคลื่อนที่ของพาหะจะมีค่าคงที่ ดังนั้นช่วงเวลาการครีฟท์ สูงสุดที่เกิดขึ้นได้ คือ

$$T_{drift} = \frac{w}{vd} \quad (2.21)$$

โดยที่  $w$  คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ  
 $vd$  คือ ความเร็วของการเคลื่อนที่ของพาหะ

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

2. ช่วงเวลาของการแพร่ของพาหะ ทำให้เกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะดังที่ได้กล่าว การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล อาจเกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะได้และเนื่องจากความเร็วของการแพร่จะช้ากว่าการครีฟท์เนื่องจากสนามไฟฟ้ามาก ดังนั้นช่วงเวลาของการแพร่ จึงเป็นปัญหาที่สำคัญอีกตัวหนึ่ง

$$T_{drift} = \frac{d^2}{2D_c} \quad (2.22)$$

โดยที่  $d$  คือ ระยะทางการเคลื่อนที่  
 $D_c$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์ในการแพร่ของพาหะส่วนน้อย

ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้  $d$  มีค่าน้อยที่สุดหรือไม่มีเลย เช่นใน โฟโตไดโอดชนิด p-i-n

3. ค่าเวลาคงที่ ที่เกิดระหว่างคาปาซิแตนซ์ของโฟโตไดโอดกับค่าความต้านทานของโหลด ที่ใช้เนื่องจากการใช้งาน โฟโตไดโอดจะต้องได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในบริเวณปอดพาหะ จะประพุดิตัวเป็นคาปาซิแตนซ์ เรียกว่า คาปาซิแตนซ์ที่รอยต่อ (Junction Capacitance :  $C_j$ )

$$C_j = \frac{\epsilon A}{w} \tag{2.23}$$

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

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

$$B_w = \frac{1}{2\pi T_{diff}} = \frac{vd}{2\pi w} \tag{2.24}$$

เมื่อเปรียบเทียบผลของความกว้างและค่าคาปาซิแตนซ์ ที่มีรอยต่อความเร็วของการตอบสนองจะเห็นว่า คาปาซิแตนซ์มีส่วนสำคัญมากต่อการเกิดผลของการแพร่ของพาหะนอกบริเวณปอดพาหะ ดังนั้นการเลือกใช้อุปกรณ์ที่มีค่าคาปาซิแตนซ์น้อยๆหรือให้ โหลดมีค่าความต้านทานน้อยและความกว้างต้องมากกว่า  $\frac{1}{\alpha_0}$  มากๆ

### 2.6 โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอด (photodiode) เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจรับแสงชนิดโฟโตอิเล็กทริกแบบภายใน มีโครงสร้างพื้นฐานเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดรอยต่อพี-เอ็น เมื่อมีแสงกระทบที่รอยต่อจะเกิดกระแสและแรงดันขึ้น ซึ่งโดยทั่วไปเมื่อกำลังถึงโฟโตไดโอดจะหมายถึงเซ็นเซอร์ชนิดหนึ่งที่สามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและใช้ตรวจวัดความเข้มของแสง ปัจจุบัน โฟโตไดโอดแบบ

รอยต่อพี-เอ็นมีราคาไม่แพงและใช้งานอย่างแพร่หลาย สำหรับในระบบสื่อสารด้วยแสงนิยมใช้โฟโตไดโอดชนิดพิเศษที่ทำงานได้เร็วกว่า คือ พินโฟโตไดโอดและอะวอลานซ์โฟโตไดโอด เป็นต้น

### 2.6.1 โครงสร้างของโฟโตไดโอดชนิดต่างๆ

โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถทำการเปลี่ยนสัญญาณแสง เป็นสัญญาณไฟฟ้าเมื่อมีแสงมาตกกระทบ ซึ่งในเทคโนโลยีในปัจจุบันได้มีการผลิตโฟโตไดโอดมาหลายชนิด เราสามารถจำแนกโฟโตไดโอดได้หลายรูปแบบตามโครงสร้างดังต่อไปนี้

- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น (p-n photodiode )
  - ชนิดพลาเนอร์ดิฟฟิวชัน (Planar diffusion)
  - ชนิดพลาเนอร์ดิฟฟิวชันที่มีความจุไฟฟ้าต่ำ (Low capacitance planar diffusion)
  - ชนิดรอยต่อ pnn<sup>+</sup>
- พินโฟโตไดโอด (Pin photodiode)
- โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตทกี (Schottky photodiode)
- อะวอลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode )

โฟโตไดโอดทั้งหมดเหล่านี้มีคุณสมบัติเด่นโดยทั่วไปคือ

1. สัญญาณเอาต์พุตเปลี่ยนแปลงตามความเข้มของแสงอินพุตแบบเชิงเส้นได้ดี (excellent linearity)
2. มีสัญญาณรบกวนต่ำ (low noise)
3. ตอบสนองต่อแสงในช่วงความยาวคลื่นแสงที่กว้าง (wide spectral response)
4. มีความคงทนทางกลศาสตร์ (mechanical ruggedness)
5. มีความกะทัดรัดและเบา (compact & light weight)
6. มีอายุการใช้งานยาวนาน (long life time)

จุดเด่นของโฟโตไดโอดชนิดต่าง ๆ สรุปได้ดังนี้

#### 1) โฟโตไดโอดชนิดพลาเนอร์ดิฟฟิวชัน (Planar diffusion type)

เป็นโฟโตไดโอดที่มีลักษณะโครงสร้างเป็นรอยต่อ P-N และมีฉนวน SiO<sub>2</sub> เคลือบทับมีข้อดีตรงที่มีกระแสรั่วน้อย มีค่าของความจุบริเวณรอยต่อมีค่าน้อย จึงเป็นผลทำให้สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว และตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

## 2) โฟโตไดโอดชนิดพลาแนร์ตีฟิวชันที่ความจุไฟฟ้าต่ำ ( Low capacitance planar diffusion)

เป็นชนิดที่ออกแบบให้สารเจือปนในชั้น  $n$  มีปริมาณน้อย ทำให้ชั้น  $n$  มีความต้านทานสูง และชั้นปลอดพาหะค่อนข้างหนา เป็นผลให้ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อมีค่าน้อย ทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็วมาก ช่วงเวลาขาขึ้นมีค่าเพียง 1 ใน 10 ของชนิดแรก นอกจากนั้นเนื่องจากชั้น  $p$  มีความบางมาก จึงตอบสนองต่อแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

## 3) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ $pnn^+$

สารกึ่งตัวนำชั้น  $n^+$  มีค่าสภาพความต้านทานไฟฟ้าต่ำโดยการเติมด้วยสารเจือปนปริมาณมาก ๆ และชั้น  $n^+$  หนามาก ๆ จนทำให้รอยต่อระหว่างชั้น  $n$  และชั้น  $n^+$  เปรียบเสมือนชั้นปลอดพาหะ ลักษณะเช่นนี้จะทำให้ไม่มีผลตอบสนองต่อแสงอินฟราเรด จึงใช้วัดแสงความยาวคลื่นสั้นได้ดี

## 4) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อ $pin$ หรือทินโฟโตไดโอด

เป็นโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่ใช้รอยต่อพี และเอ็น แต่จะพิเศษตรงที่ บริเวณรอยต่อระหว่างพีกับเอ็นมีการใส่สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ( intrinsic ) ทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้มีการทำงานที่รวดเร็วเป็นพิเศษ เพราะชั้น intrinsic เป็นชั้นที่มีความจุของเนื้อสารน้อยมาก เวลาใช้งานจะทำการจ่ายไบอัสย้อนกลับ เป็นผลทำให้กระแสรั่วมีค่าน้อย เราจะกล่าวเพิ่มเติมอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

## 5) โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อชอตต์กี (Schottky Photodiode)

เป็นโฟโตไดโอดรอยต่อชอตต์กีแบบเรียร์ ใช้วิธีเคลือบโลหะที่บางมาก ๆ ลงบนผิวของสารกึ่งตัวนำจบเป็นผลทำให้มีรอยต่อชอตต์กีแบบเรียร์ เช่น การผลิตที่ทำการเคลือบทองคำ ลงบน GaAsP ชนิดเอ็น เนื่องจากโลหะที่เคลือบนั้นบางมาก ดังนั้นจึงเป็นผลทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ มีการตอบสนองต่อแสงตั้งแต่ย่านที่มองไม่เห็น จนถึงย่านอัลตราไวโอเลตได้ดี

## 6) โฟโตไดโอดชนิดอะวอลานซ์ (Avalanche Photodiode)

อะวอลานซ์โฟโตไดโอด เป็นอุปกรณ์สำหรับตรวจจับแสงที่มีความเข้มต่ำ จึงสามารถนำมาใช้ตรวจจับโฟตอนเดี่ยวได้ โดยจะทำการต่อความต่างศักย์ไบแอสกลับให้สูงกว่าความต่างศักย์พังทลาย หรือเรียกว่าการนับโฟตอนในไกเกอร์โหมด (Geiger mode) ตอนมาดกระทบ APD จะทำให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอนและโฮล จากนั้นอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปชนอิเล็กตรอนตัวอื่น ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล แบบทวีคูณ จึงทำให้ APD สามารถนำกระแสได้ หลังจาก APD นำกระแสแล้วจะคายประจุจนทำให้ APD กลับมาเปิดวงจรเช่นเดิมซึ่งเวลาในการคายประจุจะมีค่าประมาณ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไมโครวินาที การใช้งาน APD ในการนับโฟตอนนั้นนอกจากสัญญาณที่ได้จากโฟตอนที่ต้องการแล้วยังมี สัญญาณจากสัญญาณรบกวนขณะมืด (Dark count) ซึ่งเกิดจากการเคลื่อนที่ของประจุไฟฟ้าผ่าน รอยต่อ PN ขณะที่ยังไม่มีการตรวจจับโฟตอน มีสาเหตุมาจากการถูกกระตุ้นด้วยความร้อน และการปล่อยพาหะไฟฟ้าที่ถูกจับไว้ในหลุมดักพาหะซึ่งในกรณีหลังเป็นสาเหตุให้เกิดพัลส์ค้าง (After pulse) นอกจากนี้สาเหตุการเกิดสัญญาณรบกวนขณะมืดด้วยลักษณะสมบัติของตัว APD เองแล้ว ยังสัญญาณรบกวนอื่นเนื่องมาจากสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ทั้งสองกรณีเป็นสาเหตุทำให้สัญญาณที่ได้มากกว่าค่าจริงเมื่อใช้ในการนับโฟตอน วิธีแก้ไขให้สัญญาณรบกวนน้อยลงเช่น ออกแบบให้ APD อยู่ในกล่องมืด, เลือค่าความต่างศักย์ไบแอสกลับให้เหมาะสม และลดอุณหภูมิของ APD

### 2.6.2 คุณสมบัติในการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน

ในการที่เราจะทำการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งานในกรณีต่างๆจะต้องพิจารณาคุณสมบัติต่างๆเพื่อให้ได้คุณประโยชน์ ที่สมบูรณ์และมีความคุ้มค่ากับสิ่งที่เราทำการลงทุนไปควรมีหลักการพิจารณาดังต่อไปนี้

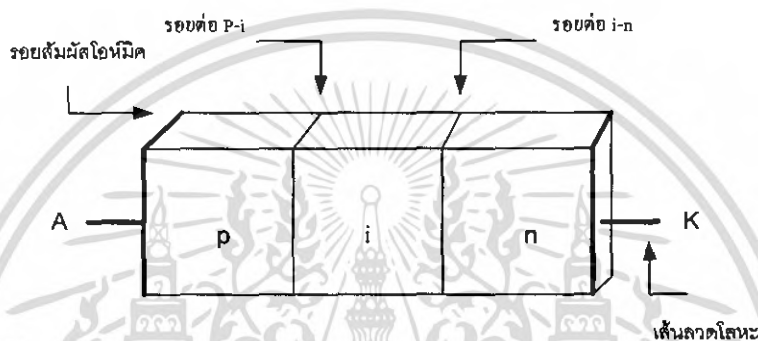
1. ความสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงได้มาก ความสามารถในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงจะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทาง ควอนตัมของสารที่ใช้สร้าง โดยทั่วไปประสิทธิภาพทางควอนตัมจะถูกกำหนดโดยสัมประสิทธิ์ การดูดกลืน (Absorption Coefficient ;  $\alpha_0$ ) ของสารนั้น ค่า  $\alpha_0$  นี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นคือสารแต่ละชนิดจะมีค่า  $\alpha_0$  ที่ความยาวคลื่นต่างๆไม่เท่ากัน

2. มีความไวสูงในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต เพื่อให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ เนื่องจากในปัจจุบันแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยนำแสงจะมีค่าตั้งแต่ หลายร้อย เมกะเฮิร์ตซ์ ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตสูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ทันกับสัญญาณอินพุตที่ได้รับ

3. สัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์แสงจะต้องมีค่าต่ำ สัญญาณรบกวนที่สำคัญ ได้แก่ สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise หรือ Shot Noise) เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสโฟโต โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากแสงที่มาตกกระทบ ในบางช่วงเป็นแสงที่ไม่มีเฟสเดียวกัน หรือมีหลายความยาวคลื่น ทำให้อิเล็กทรอนิกส์ได้รับพลังงานไม่เท่ากันจึงทำให้จำนวนอิเล็กทรอนิกส์ที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณกระแสแสง จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สัญญาณรบกวนควอนตัมนี้จะแปรผัน โดยตรงกับแรงดันไฟฟ้า ที่ไบแอสกลับ

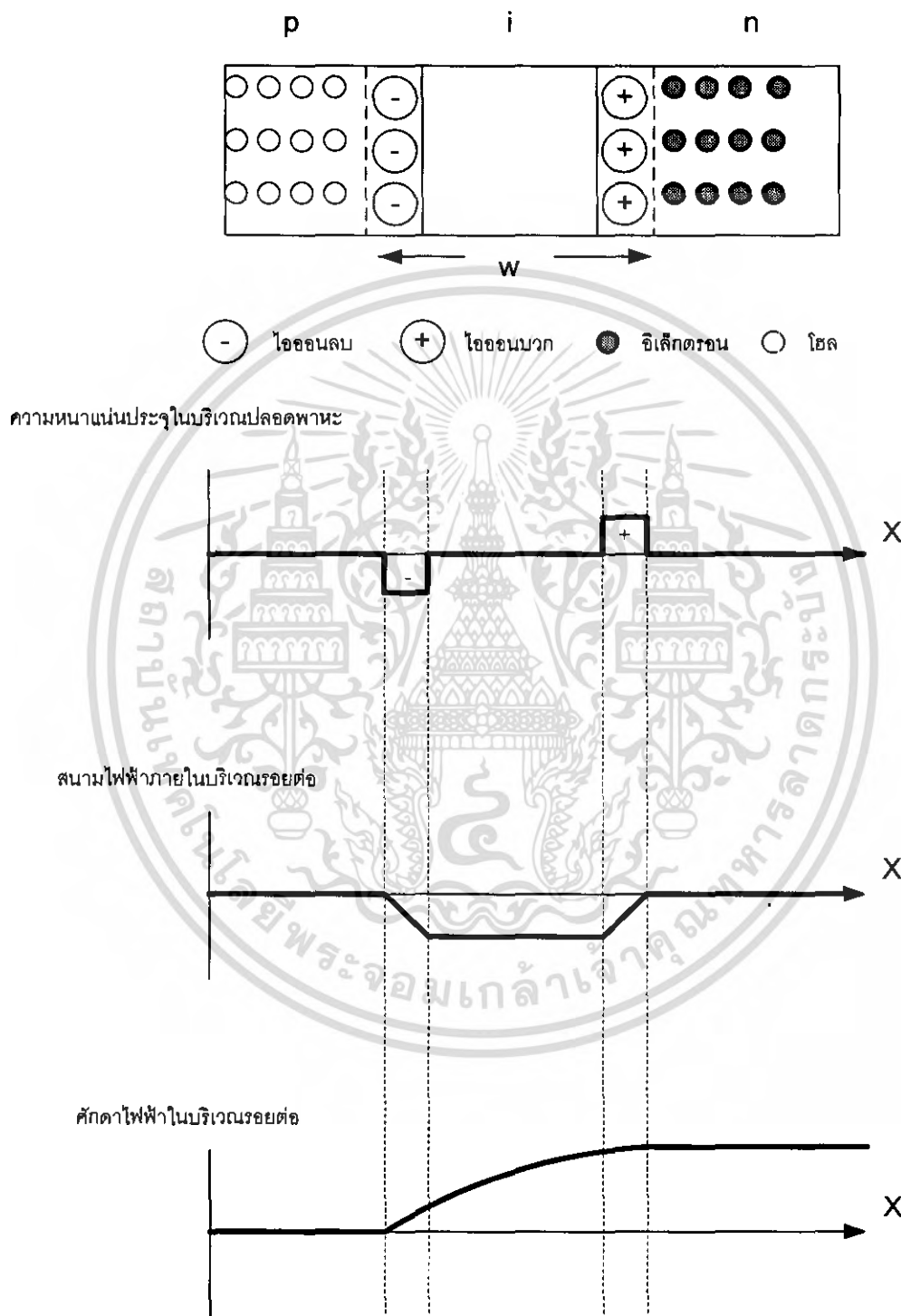
4. มีขนาดเล็ก เพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานได้สะดวก และเชื่อมต่อกับเส้นใยนำแสงซึ่งมีขนาดเล็กได้ง่าย
5. ใช้แรงดันไบอัสต่ำ เพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า

## 2.7 ซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n



รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n

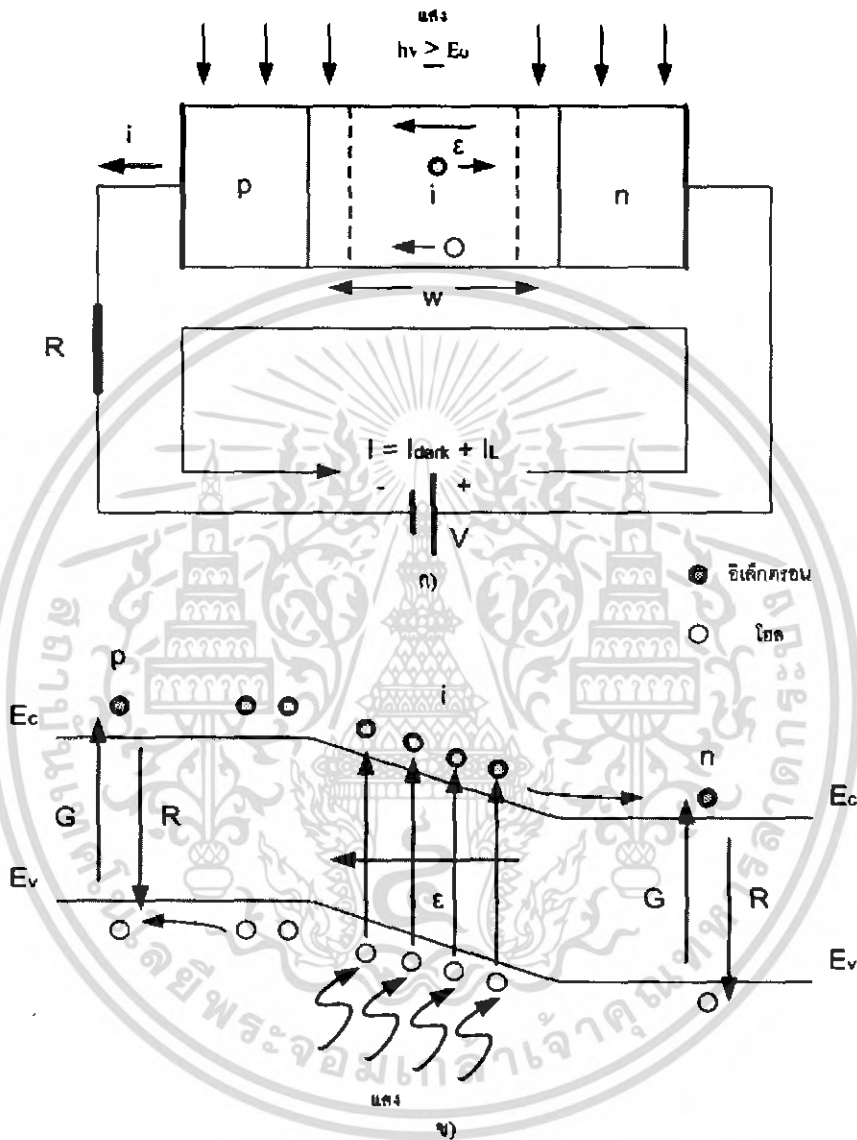
โฟโตไดโอดชนิดโครงสร้าง p-i-n พินโฟโตไดโอด (PIN-Photo Diode) หมายถึงว่าในระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี (P - Type) และชนิดเอ็น (N - Type) มีสารกึ่งตัวนำที่เรียกว่าอินทรินซิก (Intrinsic : I) สารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ตั้งอยู่ ครีฟเคอร์เรนส์ (Drift Current) นั้นเกิดขึ้นในดีพลีชันโซน และผลของสนามไฟฟ้าทำให้มีการตอบสนองเร็ว แต่ในทางตรงกันข้าม ครีฟเคอร์เรนส์ที่เกิดขึ้นภายนอกดีพลีชันโซนนั้นมีการตอบสนองช้า ดังนั้นถ้าความกว้างของ ดีพลีชันโซนยิ่งกว้างมากเท่าใดประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency) และความเร็วในการตอบสนองความถี่ยิ่งดีขึ้น ความกว้างของดีพลีชันโซนนี้มีความหนาแน่นของอิเล็กตรอน และ โฮลของสารพีและสารเอ็นยิ่งต่ำจะยิ่งกว้าง ดังนั้นสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก i ที่ตั้งกลางระหว่างสารกึ่งตัวนำชนิดพี กับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น จึงมีหน้าที่เพื่อทำให้ความกว้างของดีพลีชันโซนกว้างขึ้นนั่นเอง เนื่องจากโฟโตไดโอดที่ใช้ในระบบการสื่อสารนั้นโดยทั่วไปต้องการความเร็วในการตอบสนองสูง ดังนั้นส่วนใหญ่จะใช้พินโฟโตไดโอด และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์ดิจิทัล ในอุปกรณ์รีโมทคอนโทรลด้วยแสง เป็นต้น การทำความเข้าใจเกี่ยวกับโฟโตไดโอดชนิด p-i-n นี้จะเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและทำความเข้าใจหลักการการทำงานของระบบการสื่อสารด้วยแสง



**รูปที่ 2.15** แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อ และศักดาไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ ตามลำดับ



รูปที่ 2.16 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

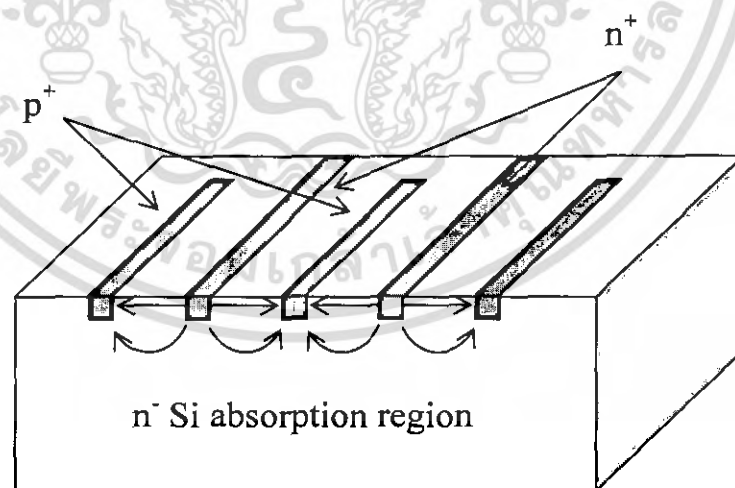
ก) การให้ไบอัสแก่ไดโอด และ ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

เมื่อได้รับแรงดันไบอัสแบบย้อนกลับของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะและบริเวณการแพร่ (Diffusion Region) โดยปกติการแพร่อะตอมสารเจือของสารชนิดพีจะมากกว่าของสารชนิดเอ็น โฟตอนที่เข้ามาจะถูกดูดกลืนทั้งในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณการแพร่ ซึ่งเรียกบริเวณนี้ว่า บริเวณการดูดกลืน ความกว้างของบริเวณการดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของโฟตอนที่เข้ามาและคุณสมบัติของสารที่ใช้สร้างไดโอด ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะแยกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดขึ้นทั้งบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณการดูดกลืน ในบริเวณปลอดพาหะนั้นคู่พาหะจะถูกแยกออกจากกัน และครีฟท์(Drift) โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ส่วนในบริเวณการแพร่เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น จะทำให้โฮลเคลื่อนที่เข้าหาบริเวณปลอดพาหะ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วของไดโอดเคลื่อนที่ในบริเวณนี้จะเป็นแบบการแพร่(Diffusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือนั่นก็คือ ความหนาแน่นของประจุ การแพร่นี้ผลเบื้องต้นพบว่าโฟตอนส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนในบริเวณปลอดพาหะเป็นบริเวณกว้าง โดยเทคนิคการเติมอะตอมสารเจือในสารชนิดอื่นให้มีค่าน้อย ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีความจำเป็นเนื่องจากการดูดกลืนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นบริเวณนี้ ดังนั้นโฟโตไดโอดชนิด p-i-n จะถูกออกแบบให้บริเวณที่เป็นสารชนิด I นั้นมีค่าเข้มข้นของการเติมอะตอมสารเจือต่ำมากๆเพื่อให้เกิดบริเวณปลอดพาหะกว้าง ดังนั้นสารชนิดอื่นในส่วนนี้จะประพฤติตัวเหมือนกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ส่วนที่ขั้วต่อของสารชนิดอื่นนั้นจะให้มีความเข้มข้นสูงมาก ( $N^+$ ) เพื่อทำให้เกิดรอยต่อแบบโอมมิกส์ (Ohmic Contact) ดังนั้นโฟโตไดโอดประเภทนี้จะเกิดการดูดกลืนเฉพาะในบริเวณปลอดพาหะเท่านั้น

## 2.8 Lateral Surface PIN Photodiode แบบ interdigitate

ซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด pin ที่มีโครงสร้างแบบ lateral surface มีการพัฒนามาจากโฟโตไดโอดแบบ pin ธรรมดา มีลักษณะดังรูป



รูปที่ 2.17 Lateral surface PIN photodiode with interdigitate structure

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8.1 คุณสมบัติของโฟโตไดโอดชนิด pin ที่มีโครงสร้างแบบ interdigitate

Lateral surface pin photodiode with interdigitate structure มีข้อดีคือ

- มีประสิทธิภาพควอนตัมสูง เพราะ การที่มี  $p^+$  มาก ทำให้มีผลรวมของบริเวณปลอดพาหะมาก ซึ่ง Lateral surface pin photodiode มีบริเวณดูดกลืนคือบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งผลรวมของบริเวณปลอดพาหะมาก คือมีบริเวณดูดกลืนมาก เมื่อ โฟตอนจากแสงมาที่บริเวณดูดกลืนที่มากจึงมีโอกาสเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล มาก ประสิทธิภาพควอนตัมของ Lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate จึงสูงกว่าแบบอื่น

- มีสภาพการตอบสนองที่สูง เพราะ สภาพการตอบสนองหมายถึง กระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบ และสภาพการตอบสนอง แปรตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม ซึ่ง

Lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate มีค่าสูง

- มีความเร็วในการตอบสนองที่สูง เพราะ ความเร็วในการตอบสนองขึ้นกับช่วงเวลาของการครีฟท์ของพาหะ ในบริเวณปลอดพาหะ ซึ่ง Lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate มี  $T_{diff}$  ที่น้อยเกิดจากความกว้างบริเวณปลอดพาหะมาก ช่วงเวลาของการแพร่ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ ซึ่ง Lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate จะใช้เวลาในช่วงนี้น้อยเพราะมีระยะทางการเคลื่อนที่น้อย

- ค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยต่อมีค่าต่ำ เพราะ มีบริเวณปลอดพาหะมาก

### บทที่ 3

## การออกแบบและขั้นตอนการสร้าง Interdigitate lateral PIN Photodiode

### 3.1 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบ interdigitate

#### 1. การเตรียมแผ่นซิลิกอน และ การตรวจสอบคุณสมบัติ

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

#### 2. ทำความสะอาดผิว

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

#### 3. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

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

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

### 5. Oxidation

- Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 1 ชั่วโมง
  - Wet ด้วย  $O_2$  1000 cc/min 5 ชั่วโมง
  - Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 1 ชั่วโมง
- ใช้อุณหภูมิเตา 1050°C , อุณหภูมิน้ำ 90°C

### 6. Mask # 1 (Phosphorus Diffusion)

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin) 3000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟิล์ม โดย
  - AZ Developer (I) 30 วินาที
  - AZ Developer (II) 30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 85°C 30 นาที

### 7. Oxide etching

- แช่ใน Buffer for Oxidation 10 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 8. ลอกฟิล์ม

- แช่ใน Acetone (I) 5 นาที
- แช่ใน Acetone (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

### 9. ทำความสะอาดผิวหน้า

- ต้มใน Trichol 5 นาที

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

#### 10. Slight etching

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

#### 11. Pre-deposition ( ด้านหน้า )

Phosporus (สารเจือชนิด n)

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

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

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

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

- Dry 1200 cc/min                      5 min
- Wet 1000 cc/min                      20 min
- Dry 1200 cc/min                      5 min

#### 14. Mask # 2 (Boron Diffusion)

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $120^\circ C$  30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin) 3000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $90^\circ C$  30 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developer พิสูจน์ โดย
 

AZ Developer (I)	30 วินาที
AZ Developer (II)	30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)

- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $85^\circ C$  30 นาที

#### 15. Oxide etching

- แช่ใน Buffer for Oxidation 2 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 16. ลอกฟิล์ม

- แช่ใน Acetone (I) 5 นาที
- แช่ใน Acetone (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ 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% 11 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

#### 19. Pre-deposition ( ด้านหน้า)

Boron (สารเจือชนิด p)

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

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

- จุ่มใน HF 5% 10 วินาที

- ล้างในน้ำ DI (I)
  - ล้างในน้ำ DI (II)
  - เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
21. Drive-in (Boron) 1000°C ด้วย O<sub>2</sub>
- Dry 1200 cc/min                      5 min
  - Wet 1000 cc/min                        5 min
  - Dry 1200 cc/min                        5 min

22. Mask # 3 (Clear oxide)

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin)3000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟลิ้ม โดย
  - AZ Developer (I)                      30 วินาที
  - AZ Developer (II)                      30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>
- อบฟลิ้มที่อุณหภูมิ 85°C 30 นาที

23. Oxide etching

- แช่ใน Buffer for Oxidation 2 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

24. ลอกฟลิ้ม

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

## 25. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

26. Slight etching (เพื่อกำจัด  $SiO_2$  ที่อยู่บนผิว Si ก่อนทำการ Oxidation)

- ล้างใน HF 5% 10 นาที
- ดั้มน้ำ DI (I)
- ดั้มน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

## 27. Oxidation

- Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 10 นาที
- Wet ด้วย  $O_2$  1000 cc/min 20 นาที
- Dry ด้วย  $O_2$  1200 cc/min 10 นาที

ใช้อุณหภูมิเตา 1050°C , อุณหภูมิน้ำ 90°C

## 28. Mask # 4 (Contact window)

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin)3000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที (prebake)

- Alignment Expose

- Developer พิสูจน์ โดย

AZ Developer (I) 30 วินาที

AZ Developer (II) 30 วินาที

- ล้างในน้ำ DI (I)

- ล้างในน้ำ DI (II)

- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 85°C 30 นาที

## 29. Oxide etching

- แช่ใน Buffer for Oxidation 2 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

## 30. ลอกฟิล์ม

- แช่ใน Acetone (I)                    5 นาที
- แช่ใน Acetone (II)                    5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$

## 31. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

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

## 33. Mask # 5 (Contact mask)

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยคลาร์ (spin) 3000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ  $85^\circ\text{C}$  20 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟิล์ม โดย
 

AZ Developer (I)	30 วินาที
AZ Developer (II)	30 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย  $N_2$
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ  $85^\circ\text{C}$  30 นาที

## 34. Al etching

- นำแผ่นจุ่มในสารละลาย Al etching ที่ 40°C (ประมาณ 10-20 วินาที)
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

## 35. ลอกฟิล์ม

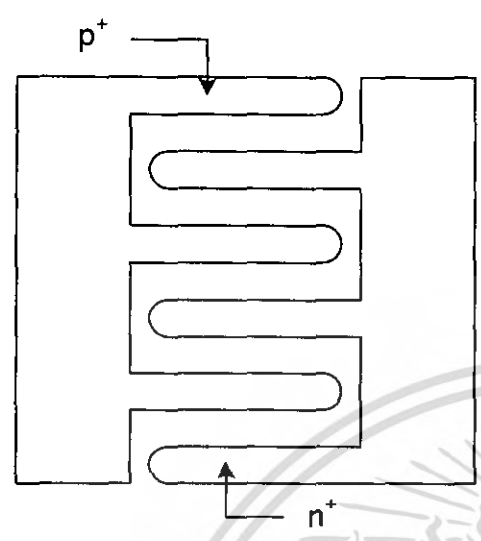
- แช่ใน Acetone (I)                    5 นาที
- แช่ใน Acetone (II)                    5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N<sub>2</sub>

## 36. Sintering 500°C

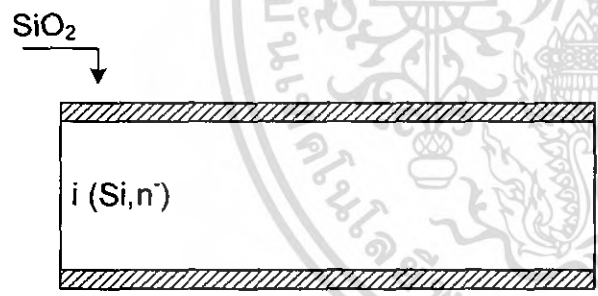
- Dye N<sub>2</sub> 1000 cc/min                    12 นาที



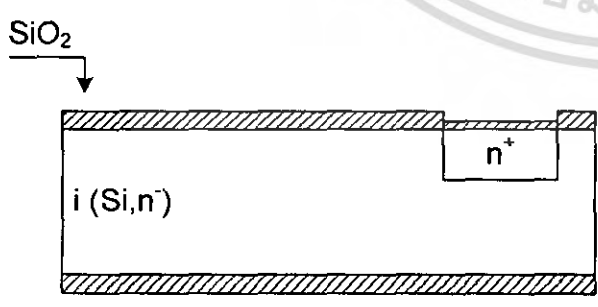
### 3.2 ลำดับขั้นตอนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบ interdigitate



Si Wafer type is intrinsic 'I' (111)  
Resistivity = 2000 Ω-cm

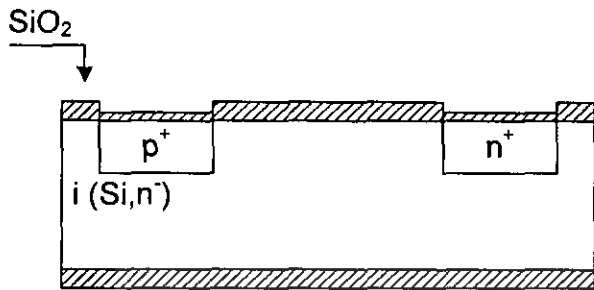


Oxidation 1000°C/min, O<sub>2</sub>  
- Dry 1200 cc/min 1 hr.  
- Wet 1000 cc/min 5 hr.  
- Dry 1200 cc/min 1 hr.



**Mask # 1** Phosphorus diffusion  
predeposition 1000°C  
N<sub>2</sub> 1000 cc/min , time 30 min.  
Drive-in 1100°C , O<sub>2</sub>  
- Dry 1200 cc/min 5 min.  
- Wet 1000 cc/min 20 min.  
- Dry 1200 cc/min 5 min.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Mask # 2 Boron diffusion 1000°C**

predeposition 1000°C

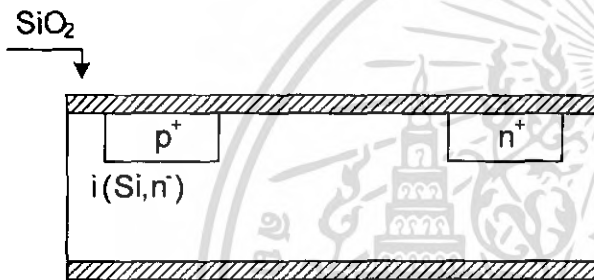
N<sub>2</sub> 1000 cc/min , time 30 min

Drive-in 1000°C , O<sub>2</sub>

- Dry 1200 cc/min 5 min.

- Wet 1000 cc/min 5 min.

- Dry 1200 cc/min 5 min.



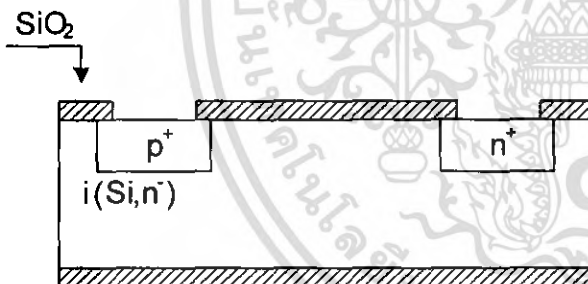
**Mask # 3 Clear oxide**

Oxidation 1000°C/min , O<sub>2</sub>

- Dry 1200 cc/min 10 min.

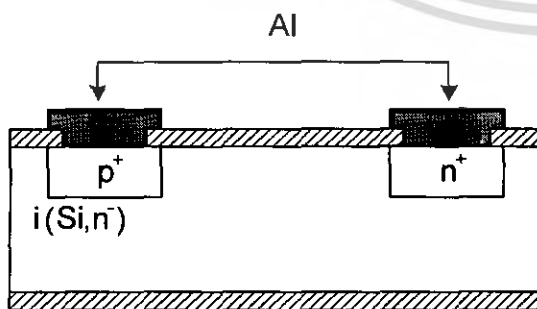
- Wet 1000 cc/min 20 min.

- Dry 1200 cc/min 10 min.



**Mask # 4 Contact window**

Oxidation-etching



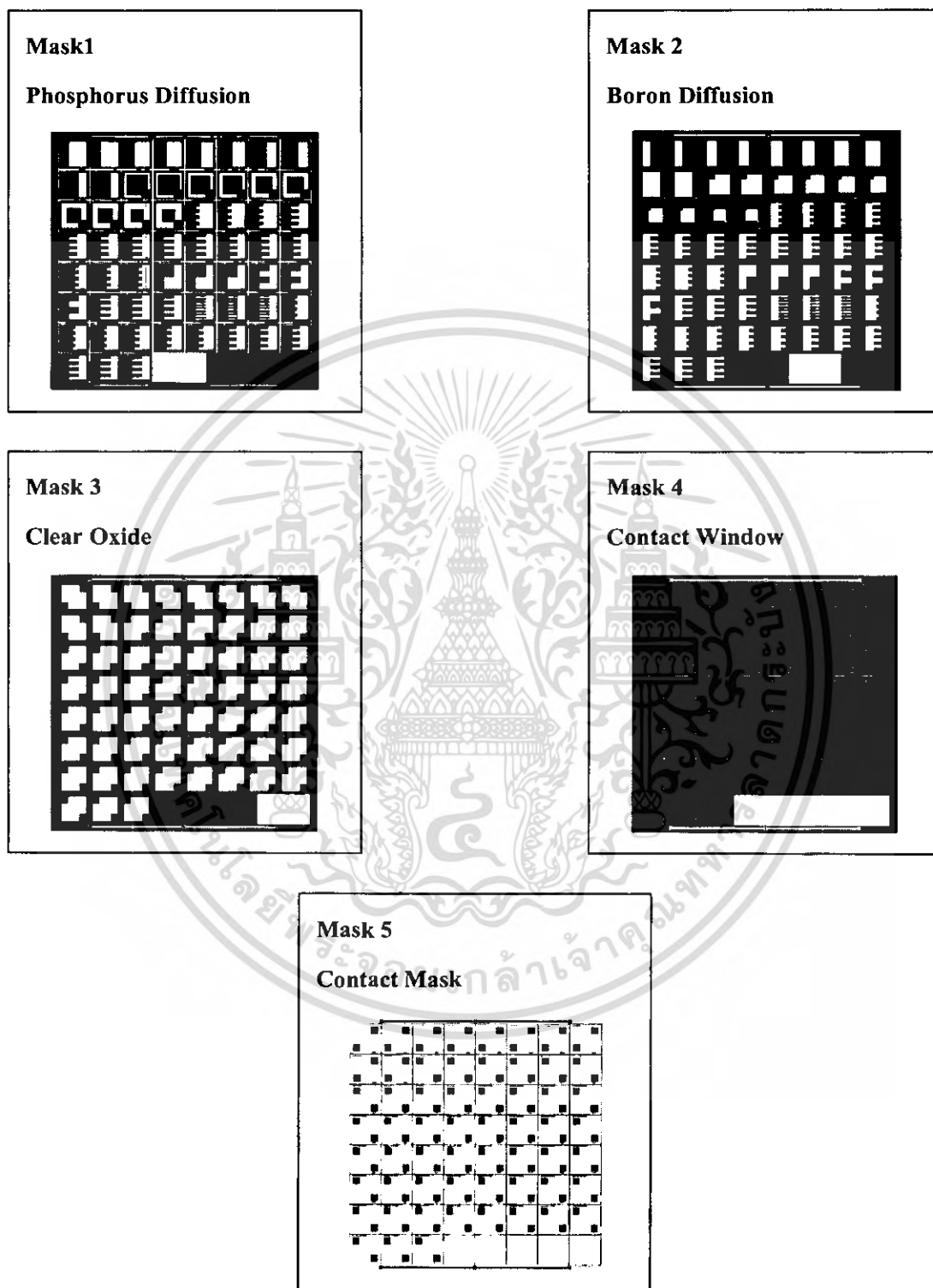
**Mask # 5 Contact mask**

Al – etching 40°C , 10-20 sec.

Sintering 500°C ,

N<sub>2</sub> 1000 cc/min. , time 12 min.

รูปที่ 3.1 กระบวนการสร้าง Lateral surface p-i-n photodiode แบบ interdigitate



รูปที่ 3.2 กระจกmask I-IV ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

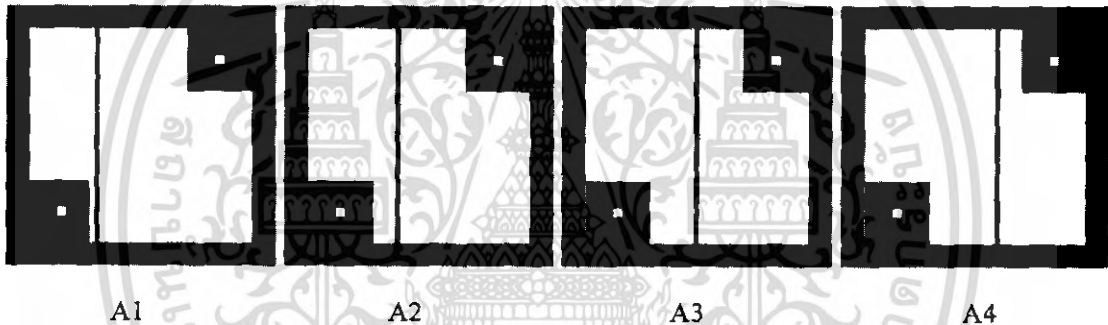
## บทที่ 4

### การทดลองและผลการทดลอง

เราได้ทำการออกแบบและสร้างโฟโตไดโอดชนิด pin ที่มีโครงสร้างแบบต่างๆ เช่น แบบ planar , และแบบ interdigitate เพื่อศึกษาผลกระทบที่มีต่อกระแสมืด ( $I_{dark}$ ) และกระแสแสง ( $I_{photo}$ ) โดยมีรูปแบบต่างๆดังนี้

#### การทดลองที่ 4.1 planar pin photodiode

เพื่อศึกษาผลของพื้นที่ไวแสง  $p^+$ -i และ  $n^+$ -i ผลของกระแสแสงและกระแสมืด โดยมีพื้นที่ระหว่าง  $p^+$  และ  $n^+$  ซึ่งคือพื้นที่ i มีขนาดเท่ากันทุกโครงสร้าง และความลึก  $x_j$  ของ  $p^+$  และ  $n^+$  เท่ากันทุกโครงสร้าง รูปแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลองดังนี้



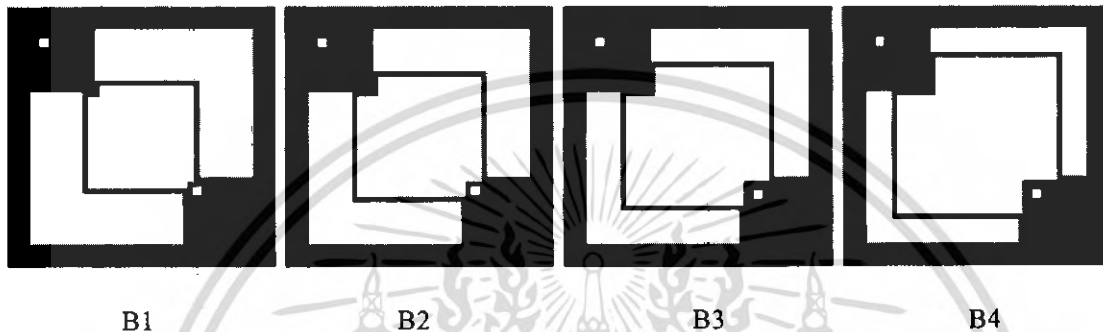
รูปที่ 4.1 โครงสร้างของ planar pin photodiode ที่ใช้ในการทดลอง

Device	ขนาดพื้นที่ $p^+$ ( $mm^2$ )	ขนาดพื้นที่ $n^+$ ( $mm^2$ )	ความกว้าง $i$ ( $\mu m$ )	เปอร์เซ็นต์พื้นที่ $p^+$
A1	1.237	3.458	50	30%
A2	1.766	2.894	50	40%
A3	2.330	2.330	50	50%
A4	2.894	1.766	50	60%

ตารางที่ 4.1 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ ของ planar pin photodiode

### การทดลองที่ 4.2 pin photodiode แบบวงแหวน

เพื่อศึกษาผลของพื้นที่ไวแสง  $p^+ - i$  และ  $n^+ - i$ , ผลของกระแสแสงและกระแสมืดและผลของแรงดันย้อนกลับค่าต่างๆ โดยมีพื้นที่ระหว่าง  $p^+$  และ  $n^+$  ซึ่งคือพื้นที่  $i$  มีขนาดเท่ากันทุกโครงสร้าง และความลึก  $x_j$  ของ  $p^+$  และ  $n^+$  เท่ากันทุกโครงสร้าง และมีรูปแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลองดังนี้



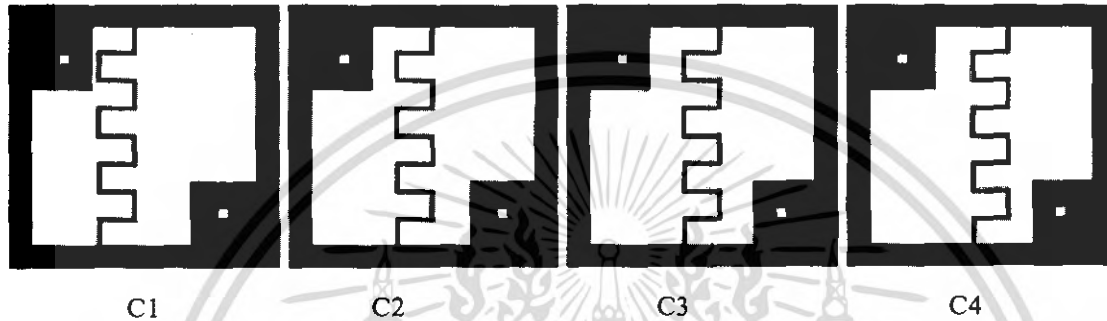
รูปที่ 4.2 โครงสร้างของ pin photodiode แบบวงแหวน ที่ใช้ในการทดลอง

Device	ขนาดพื้นที่ $p^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ขนาดพื้นที่ $n^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ความกว้าง $i$ ( $\mu\text{m}$ )	เปอร์เซ็นต์พื้นที่ $p^+$
B1	1.237	3.458	50	30%
B2	1.766	2.894	50	40%
B3	2.330	2.330	50	50%
B4	2.894	1.766	50	60%

ตารางที่ 4.2 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ ของ pin photodiode แบบวงแหวน

### การทดลองที่ 4.3 lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate

เพื่อศึกษาผลของพื้นที่ไวแสง  $p^+ - i$  และ  $n^+ - i$ , ผลของกระแสแสงและกระแสมืดและผลของแรงดันย้อนกลับค่าต่างๆ โดยมีพื้นที่ระหว่าง  $p^+$  และ  $n^+$  ซึ่งคือพื้นที่  $i$  มีขนาดเท่ากันทุกโครงสร้าง และความลึก  $x_j$  ของ  $p^+$  และ  $n^+$  เท่ากันทุกโครงสร้าง และมีรูปแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลองดังนี้



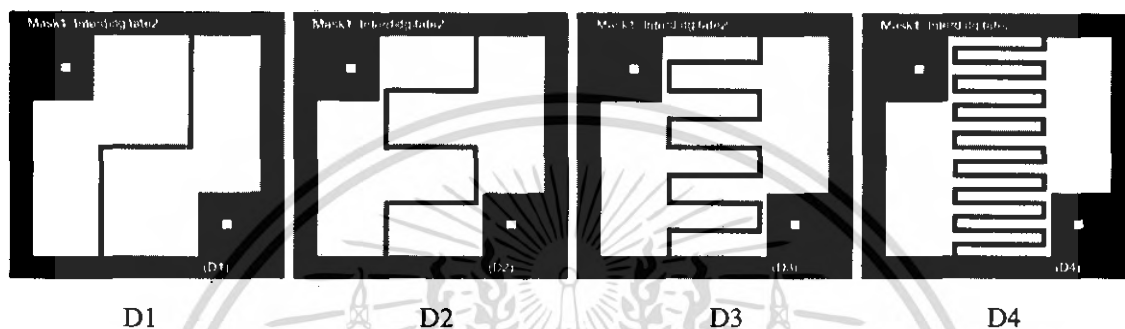
รูปที่ 4.3 โครงสร้างของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ที่ใช้ในการทดลอง

Device	ขนาดพื้นที่ $p^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ขนาดพื้นที่ $n^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ความกว้าง $i$ ( $\mu\text{m}$ )	เปอร์เซ็นต์พื้นที่ $p^+$
C1	1.237	3.458	50	30%
C2	1.766	2.894	50	40%
C3	2.330	2.330	50	50%
C4	2.894	1.766	50	60%

ตารางที่ 4.3 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate

#### การทดลองที่ 4.4 lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate

เพื่อศึกษาผลของจำนวน  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสแสงและกระแสมืด โดยมีพื้นที่รวมของ  $p^+$  และ  $n^+$  เท่ากันทุกโครงสร้าง และความกว้างระหว่าง  $p^+$  และ  $n^+$  ซึ่งคือพื้นที่  $i$  มีขนาดเท่ากันทุกโครงสร้าง โดยมีรูปแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลองดังนี้



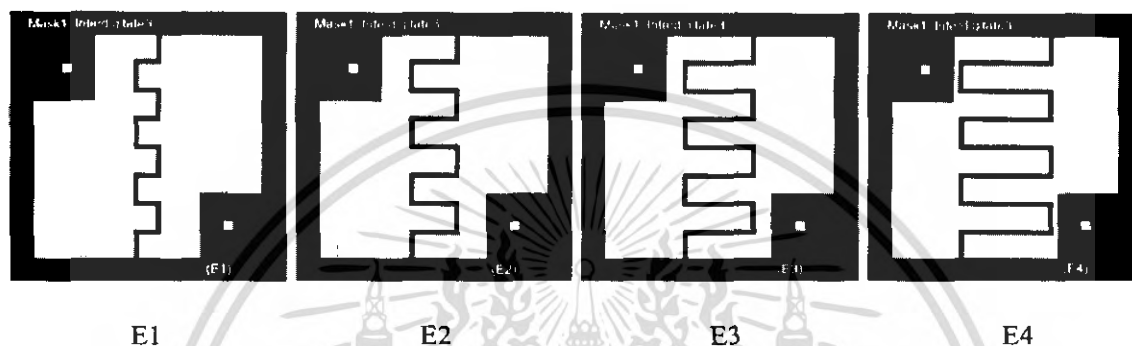
รูปที่ 4.4 โครงสร้างของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ที่ใช้ในการทดลอง

Device	ขนาดพื้นที่ $p^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ขนาดพื้นที่ $n^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ความยาว $p^+$ และ $n^+$ (mm)	ความกว้าง $i$ ( $\mu\text{m}$ )	จำนวนคู่ $p^+$ และ $n^+$ (คู่)
D1	2.35	2.35	950	50	1
D2	2.35	2.35	950	50	2
D3	2.35	2.35	950	50	4
D4	2.35	2.35	950	50	8

ตารางที่ 4.4 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate

### การทดลองที่ 4.5 lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate

เพื่อศึกษาผลของความยาว  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสแสงและกระแสมืด โดยมีพื้นที่รวมของ  $p^+$  และ  $n^+$  เท่ากันทุกโครงสร้าง และความกว้างระหว่าง  $p^+$  และ  $n^+$  ซึ่งคือพื้นที่  $i$  มีขนาดเท่ากันทุกโครงสร้าง โดยมีรูปแบบโครงสร้างที่ใช้ในการทดลองดังนี้



รูปที่ 4.5 โครงสร้างของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ที่ใช้ในการทดลอง

Device	ขนาดพื้นที่ $p^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ขนาดพื้นที่ $n^+$ ( $\text{mm}^2$ )	ความยาว $p^+$ และ $n^+$ (mm)	ความกว้าง $i$ ( $\mu\text{m}$ )	จำนวนคู่ $p^+$ และ $n^+$ (คู่)
E1	2.287	2.287	237	50	4
E2	2.287	2.287	475	50	4
E3	2.287	2.287	712	50	4
E4	2.287	2.287	950	50	4

ตารางที่ 4.5 แสดงขนาดของลวดลายในส่วนต่างๆ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate

โดย ทุกโครงสร้าง

Pad มีพื้นที่  $700 \times 700 \mu\text{m}^2$

เวลาในการแพร่สารเจือ  $n^+$   $60+45 = 105$  นาที (ความลึก =  $1.05 \mu\text{m}$ )

เวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที (ความลึก =  $0.660 \mu\text{m}$ )

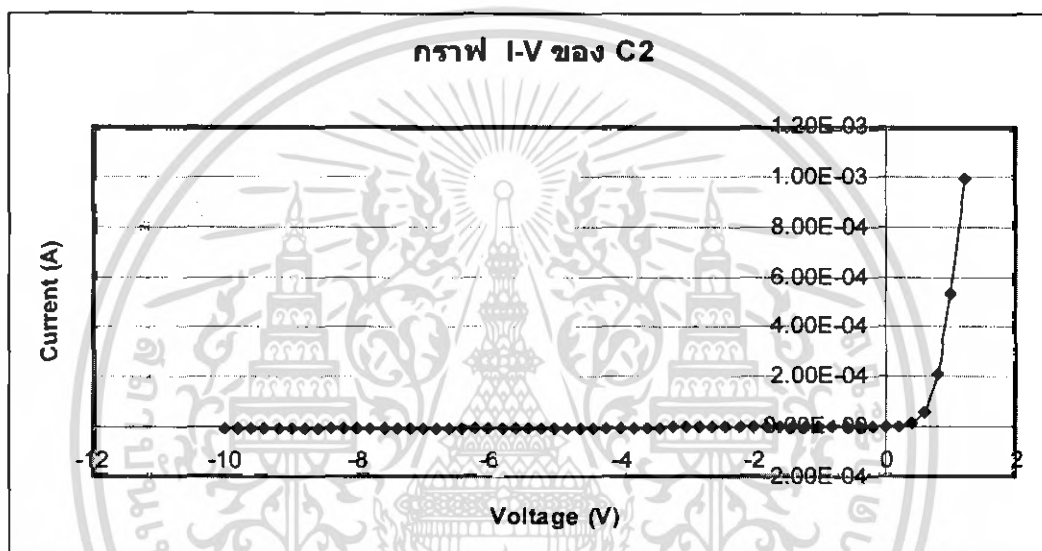
จากนั้นทำการวัดค่าต่างๆ เพื่อหาค่ากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics) ซึ่งจะบอกถึงพารามิเตอร์ต่างๆที่สำคัญของโฟโตไดโอดเช่น แรงดันขั้วเริ่ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(V) ค่าความต้านทาน ( $R_{series}$ ) ค่ากระแสรั่วไหล ( $I_0$ ) เป็นต้น โดยในการทดลองจะใช้เครื่อง HP 4061A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล

#### 4.1 การทดลองเพื่อหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics)

จะได้กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics) ในขณะไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงความสำคัญของกระแสและแรงดันของ lateral surface pin photodiode แบบ interdigitate ขณะได้รับแรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับ ที่เวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  เท่ากับ 45 นาฬิกา (ความลึก =  $0.660 \mu\text{m}$ ) และพื้นที่รับแสง C2

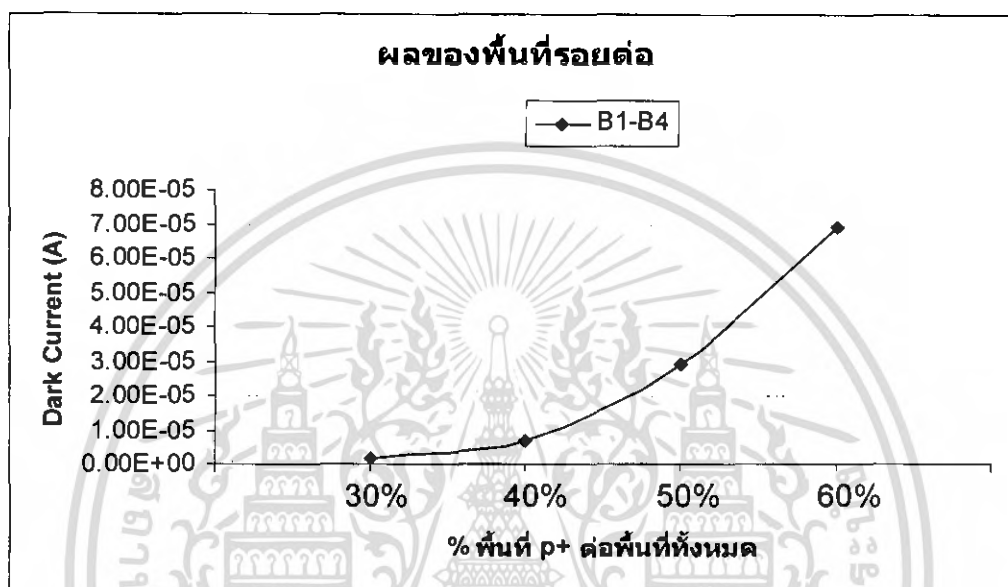
จากกราฟสามารถหาค่าแรงดันขีดเริ่มได้จากขณะแรงดันไบอัสตรง ลากเส้นกราฟในช่วงที่เป็นเชิงเส้นลงมาตัดแกนนอน (แกนของแรงดัน) แล้วอ่านค่าที่กราฟตัดแกนนอน จะได้แรงดันขีดเริ่ม ( $V_T$ ) = 0.6 Volt จากนั้นสามารถหาค่าทรานคอนดักแตนซ์ ( $g_m$ ) ได้จาก Slope ของกราฟ I-V โดย

$g_m = \frac{\Delta I}{\Delta V} = 2.295 \times 10^{-3} \text{ A/V}$  และยังสามารถหาค่า  $R_{series}$  ได้จากส่วนกลับของค่าทรานคอนดัก

แตนซ์ โดย  $R_{series} = \frac{1}{g_m} = 435.7 \Omega$

#### 4.2 การทดลองเพื่อหากระแสมืด( $I_{\text{dark}}$ )

ได้ทำการทดลองวัดกระแสมืดโดยให้แกนนอนเป็นพื้นที่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่เปลี่ยนแปลง ซึ่งเป็นการศึกษาผลของพื้นที่  $p^+ - i$  และ  $n^+ - i$  ที่มีผลต่อกระแสมืด ที่แรงดันย้อนกลับเท่ากับ 10 V จะได้กราฟดังรูปที่ 4.7

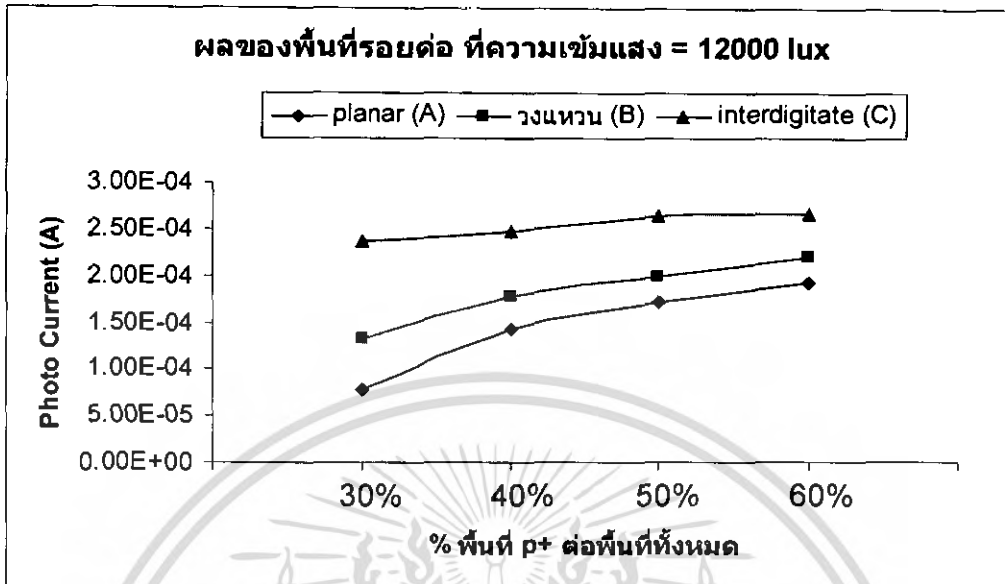


รูปที่ 4.7 กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่  $p^+$  และ  $n^+$  ของ pin photodiode

ชุด B

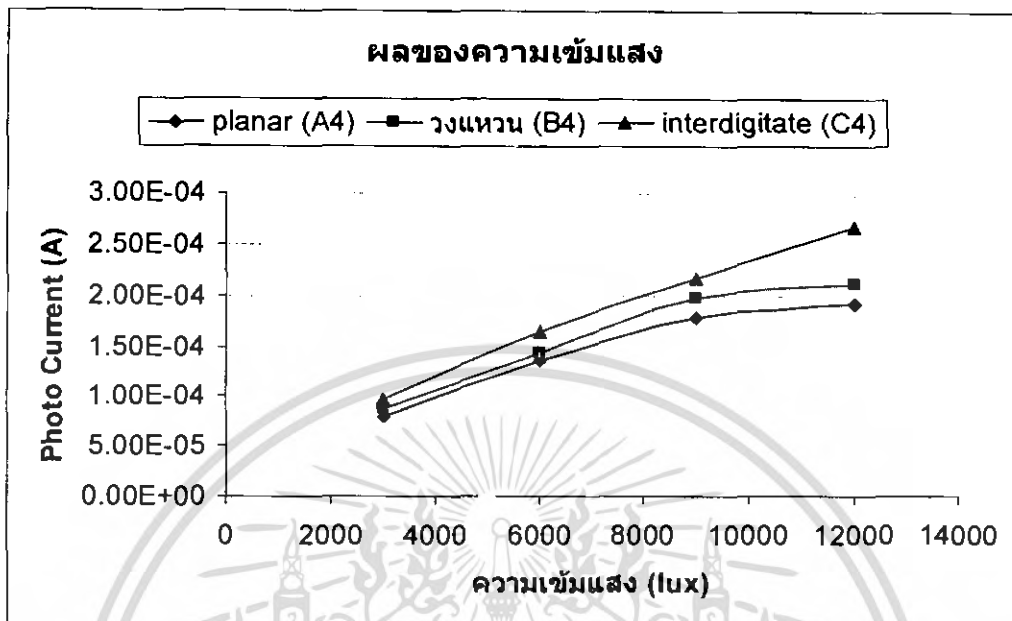
#### 4.3 การทดลองเพื่อหากระแสแสง( $I_{\text{photo}}$ )

ได้ทำการทดลอง วัดค่ากระแสแสงเพื่อศึกษาผลของพื้นที่ไวแสง  $p^+ - i$  และ  $n^+ - i$  โดยเปรียบเทียบ 3 โครงสร้าง คือแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate โดยเปลี่ยนแปลงพื้นที่รับแสงเป็น  $p^+$  และ  $n^+$  เพื่อดูผลของกระแสแสง ให้แกนนอนเป็นพื้นที่  $p^+$  ที่เพิ่มขึ้น จะได้กราฟดังรูปที่ 4.8



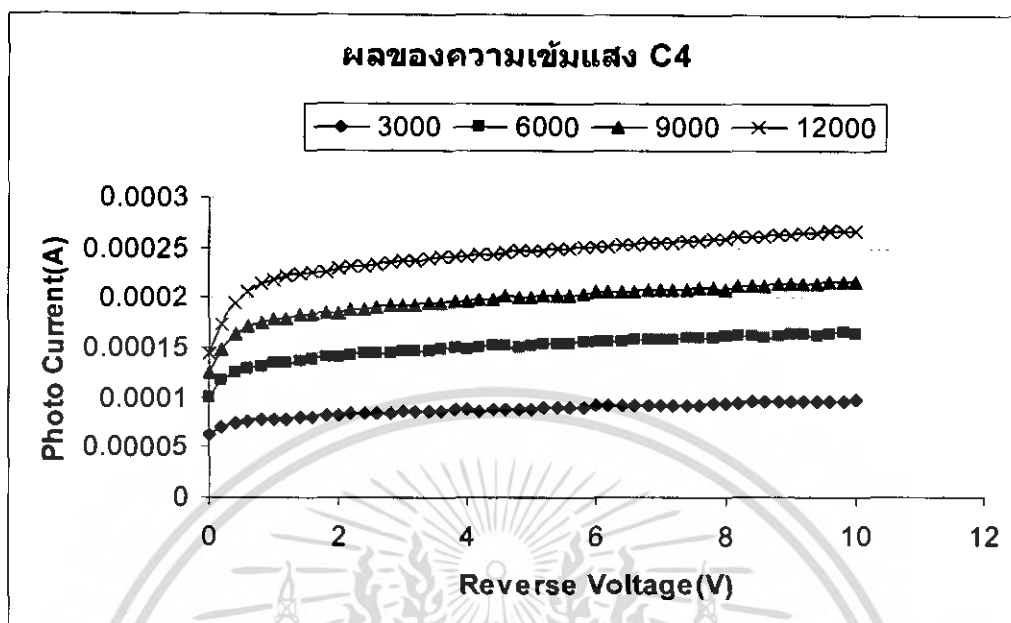
รูปที่ 4.8 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงพื้นที่รับแสงจาก  $n^+$  เป็น  $p^+$  โดยเปรียบเทียบทั้ง โครงสร้างแบบ planar แบบ วงแหวน และแบบ interdigitate ที่แรงดันย้อนกลับ 10V ความเข้มแสง 12000 Lux

จากนั้นทำการวัดผลของความเข้มแสง เปรียบเทียบกันระหว่าง 3 โครงสร้าง คือแบบ planar แบบ วงแหวนและแบบ interdigitate ที่ความเข้มแสงค่าต่างๆคือ 3000 lux , 6000 lux , 9000 lux และ 12000 lux ที่แรงดันย้อนกลับเท่ากับ 10 V จะได้กราฟดังรูปที่ 4.9



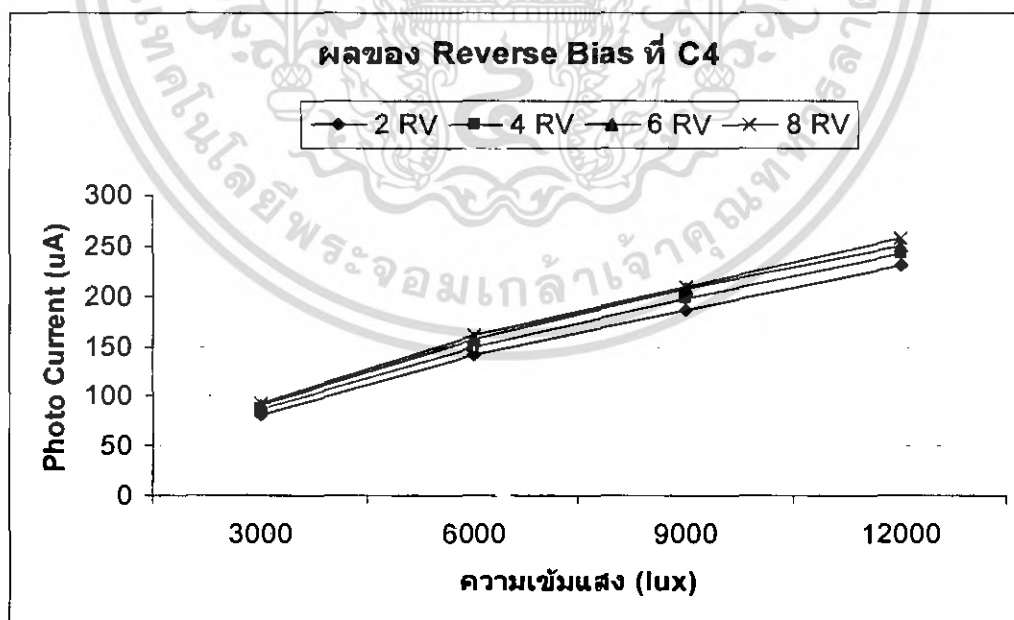
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ของโครงสร้างแบบ planar แบบ วงแหวนและแบบ interdigitate ที่พื้นที่รับแสง  $p^+$  เท่ากันคือ  $2.894 \text{ mm}^2$

จากนั้นทำการทดสอบ วัดค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ คือ 3000 Lux , 6000Lux , 9000Lux และ 12000Lux ของ โครงสร้างแบบ interdigitate โดยให้แกนนอนเป็นแรงดันไบอัสย้อนกลับ จะได้กราฟดังรูปที่ 4.10



รูปที่4.10 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่พื้นที่รับแสง C4

จากนั้นทำการวัดค่ากระแสแสงที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ โดยให้แกนนอนเป็นความเข้มแสง จะได้กราฟดังรูปที่4.11



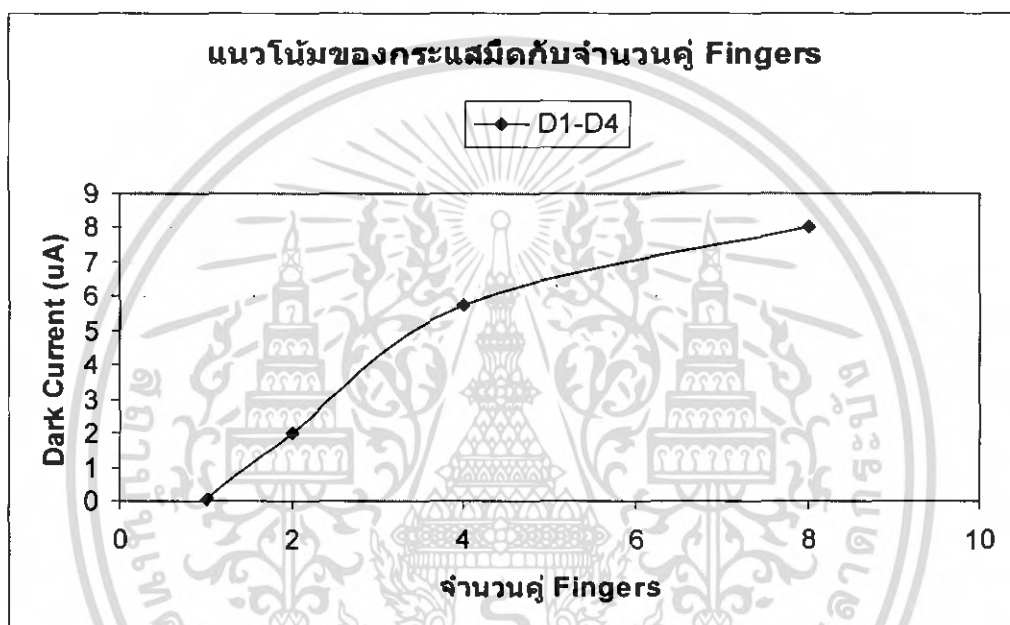
รูปที่4.11 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อแรงดันไบอัสย้อนกลับค่าต่างๆ ที่พื้นที่รับแสง C4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนคู่ $p^+$ และ $n^+$ ของโครงสร้างแบบ interdigitate

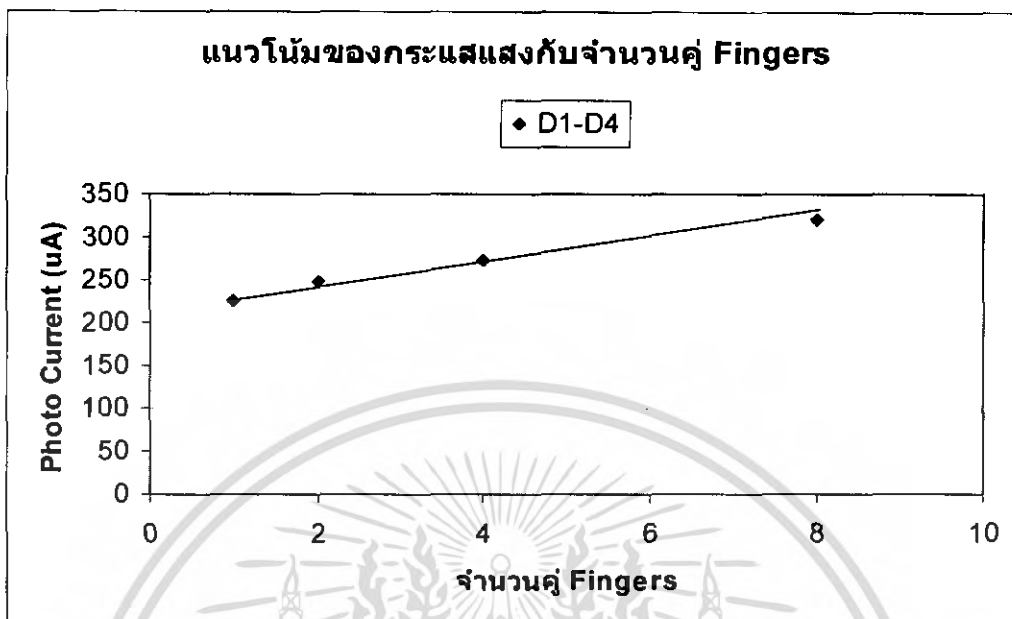
หัวข้อนี้จะศึกษาผลของจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสมืดและกระแสแสง โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ตั้งแต่ 1 คู่, 2 คู่, 4 คู่ และ 8 คู่

ทำการวัดค่ากระแสมืด โดยให้แกนนอนเป็นจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่เปลี่ยนแปลง ค่าแรงดันย้อนกลับ เท่ากับ 10V จะได้กราฟดังรูปที่ 4.13



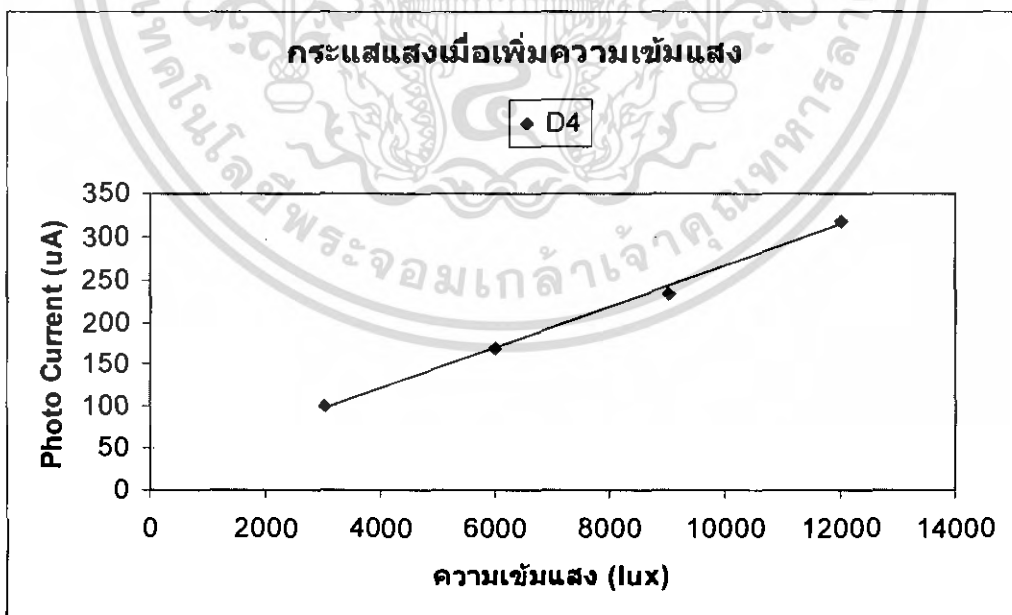
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$

จากนั้นทำการทดลองวัดค่ากระแสแสง โดยให้แกนนอนเป็นจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่เปลี่ยนแปลง ค่าแรงดันย้อนกลับ เท่ากับ 10V จะได้กราฟดังรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$

จากนั้นทำการวัดค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ คือ 3000 Lux , 6000Lux , 9000Lux และ 12000Lux ที่แรงดันย้อนกลับเท่ากับ 10 V จะได้กราฟดังรูปที่ 4.15



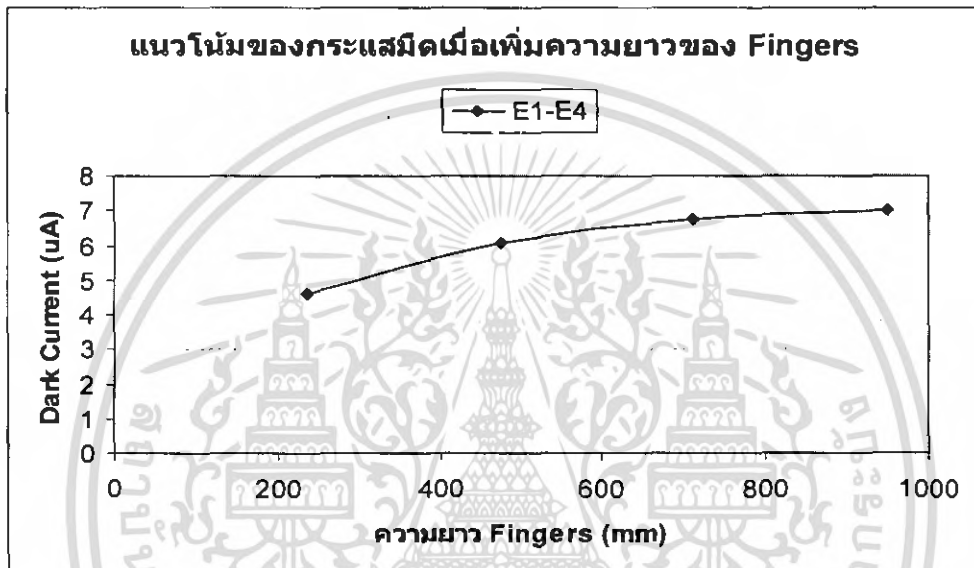
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อความความเข้มแสงค่าต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

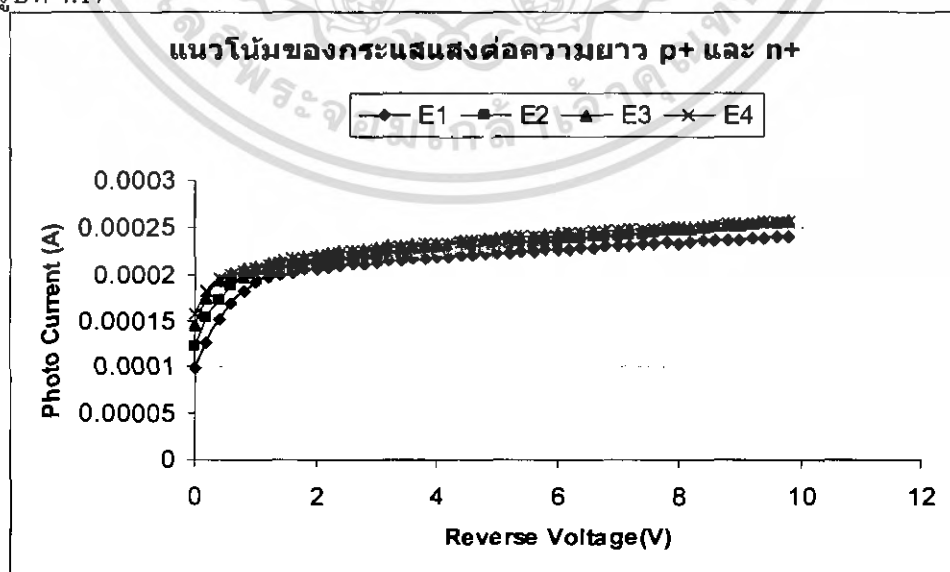
#### 4.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความยาว $p^+$ และ $n^+$ ของโครงสร้างแบบ interdigitate

หัวข้อนี้จะศึกษาผลของความยาว  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสมืดและกระแสแสง โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงความยาว  $p^+$  และ  $n^+$  ทั้งหมด 4 ค่า คือ 237 mm , 475 mm , 712 mm และ 950 mm

ทำการวัดค่ากระแสมืด โดยให้แกนนอนเป็นความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  ที่เปลี่ยนแปลงไป ค่าแรงดันย้อนกลับ เท่ากับ 10V จะได้กราฟดังรูปที่ 4.16



รูปที่ 4.16 กราฟแสดงค่ากระแสมืดที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว  $p^+$  และ  $n^+$  จากนั้นทำการวัดกระแสแสง โดยให้แกนนอนเป็นแรงดันย้อนกลับที่เปลี่ยนแปลง จะได้กราฟดังรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.17 กราฟแสดงค่ากระแสแสงที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงความยาว  $p^+$  และ  $n^+$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง

รายงานฉบับนี้ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีโครงสร้างแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate หลังจากผ่านกระบวนการสร้างมาแล้ว **การทดลองตอนที่ 4.1 การทดลองเพื่อหากราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดัน (I-V Characteristics)**

เมื่อทำการ plot กราฟระหว่างกระแสและแรงดัน(ดังรูป 4.7) ทำให้ทราบค่าคุณสมบัติต่างๆ ของโฟโตไดโอดดังนี้คือ ค่าแรงดันขีดเริ่ม( $V_T$ ) = 0.6 V , ค่าทรานคอนดักแตนซ์( $g_m$ ) =  $2.295 \times 10^{-3}$  A/V , ค่าความต้านทานภายใน( $R_{series}$ ) = 435.7  $\Omega$  และมีแรงดันเบรคดาวน์( $V_b$ ) ประมาณ 150 V ซึ่งวัดได้จากเครื่องวัดความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของทรานซิสเตอร์ จากค่าคุณสมบัติต่างๆที่วัดได้จาก I-V Characteristics จะเห็นว่าอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นมีค่าความต้านทานภายในน้อยมาก มีผลทำให้โฟโตไดโอดชนิดนี้ทำงานได้รวดเร็ว และค่าแรงดันเบรคดาวน์มีค่าสูงมากทำให้ขณะใช้งานที่แรงดันไบอัสย้อนกลับค่าสูงๆ ไม่ทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหาย

**การทดลองตอนที่ 4.2 การทดลองเพื่อหากระแสมืด( $I_{dark}$ )**

เมื่อพิจารณาผลของพื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  และ  $n^+ - i$  โดยการเปลี่ยนแปลงพื้นที่  $p^+ / n^+$  ตั้งแต่ 3:7 , 4:6 , 5:5 และ 6:4 ที่ระยะเวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที และแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V จะมีกระแสมืด 1.77  $\mu A$  , 6.97  $\mu A$  , 29  $\mu A$  และ 69.1  $\mu A$  ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อพื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  เพิ่มขึ้นจะทำให้กระแสมืดเพิ่มขึ้น(ดังรูปที่ 4.8)เนื่องจากขณะโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและไม่ได้รับแสงใดๆ จะมีกระแสอิมิตัวย้อนกลับไหลผ่านโฟโตไดโอด ซึ่งกระแสอิมิตัวย้อนกลับจะแปรผันตามขนาดพื้นที่รอยต่อ ดังสมการที่ 2.7

$$I_0 = Aqn_i^2 \left( \frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e p_p} \right)$$

$$I_0 \propto A$$

ดังนั้นกระแสมืดจึงเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  เพิ่มขึ้นนั่นเอง

### การทดลองตอนที่ 4.3 การทดลองเพื่อหากระแสแสง ( $I_{photo}$ )

เมื่อพิจารณาผลของพื้นที่รับแสงที่มีต่อกระแสแสงพบว่า ที่เวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที่ เท่ากันทุกโครงสร้าง, แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V และความเข้มแสง 12000 Lux โดยการเปลี่ยนแปลงพื้นที่  $p^+ / n^+$  ตั้งแต่ 3:7, 4:6, 5:5 และ 6:4 เหมือนกันทุกโครงสร้าง ซึ่งก็คือเปลี่ยนพื้นที่รับแสงจาก  $n^+ - i$  เป็น  $p^+ - i$  ด้วย โดยที่พื้นที่รอยต่อ  $p^+ / n^+$  เท่ากับ 3:7 โครงสร้างแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate จะได้กระแสแสง 77.2  $\mu A$ , 131.6  $\mu A$ , 238.1  $\mu A$  ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มพื้นที่รอยต่อ  $p^+ / n^+$  เท่ากับ 6:4 โครงสร้างแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate จะได้กระแสแสง 192.1  $\mu A$ , 220  $\mu A$ , 267  $\mu A$  ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อพื้นที่รับแสงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระแสแสงเพิ่มขึ้นเช่นกัน(ดังรูปที่ 4.9)เนื่องจากสามารถพิจารณาได้ในลักษณะเช่นเดียวกับกระแสมีดักกล่าวคือ กระแสแสงจะแปรผันตรงกับพื้นที่รับแสง ดังสมการที่ 2.14

$$I_p = qAg_{op}(L_p + L_n)$$

$$I_p \propto A$$

ซึ่งถ้าเปรียบเทียบ โครงสร้างทั้ง 3 แบบ จะได้ว่าโครงสร้างแบบ interdigitate จะได้กระแสแสงมากที่สุดที่พื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  ที่เท่ากัน

จากนั้นเมื่อพิจารณาผลของความเข้มแสงพบว่า ที่เวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที่ เท่ากันทุกโครงสร้าง พื้นที่รับแสง 2.89mm<sup>2</sup> เท่ากันทุกโครงสร้าง แรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V และความเข้มแสง 3000Lux, 6000Lux, 9000Lux และ 12000Lux โครงสร้างแบบ planar แบบวงแหวน และแบบ interdigitate ที่ความเข้มแสง 6000 Lux เท่ากับ 135.1  $\mu A$ , 143.3  $\mu A$ , 164.6  $\mu A$  ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระแสแสงมากขึ้นเช่นกัน(ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11)เนื่องจากเมื่อความเข้มแสงเพิ่มมากขึ้นจะทำให้แสงมีพลังงานไปกระตุ้นอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ให้กลายเป็นอิเล็กตรอนในแถบความนำมากยิ่งขึ้นดังนั้นกระแสแสงจึงมากขึ้น

จากนั้นเมื่อพิจารณาผลของแรงดันไบอัสย้อนกลับที่มีผลต่อกระแสแสงพบว่า ที่เวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที่ พื้นที่รับแสง 2.89mm<sup>2</sup> โครงสร้างแบบ interdigitate ความเข้มแสง 9000 Lux แรงดันไบอัสย้อนกลับ 2V, 4V, 6V และ 8V จะมีกระแสแสง 185.88  $\mu A$ , 197.72  $\mu A$ , 206.47  $\mu A$  และ 209.20  $\mu A$  ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มมากขึ้นจะทำให้กระแสแสงมากขึ้นเช่นกัน(ดังรูปที่ 4.12) เนื่องจากเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับเพิ่มขึ้นจะทำให้แรงดันภายในที่รอยต่อเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้อิเล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนน้อยทางด้านพีและโฮลที่เป็นพาหะส่วนน้อยทางด้านเอ็น ไหลไปรวมกับอิเล็กตรอนที่เป็นพาหะส่วนมากทางด้านเอ็นและโฮลที่เป็นพาหะส่วนมากทางด้านพีได้มากขึ้นตามลำดับ ดังนั้นจึงเกิดกระแสมากขึ้นนั่นเอง

#### การทดลองตอนที่ 4.4 การทดลองเพื่อศึกษาผลของจำนวนคู่ $p^+$ และ $n^+$ ของโครงสร้างแบบ

##### interdigitate

เมื่อพิจารณาผลของจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสมืด โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ตั้งแต่ 1 คู่, 2 คู่, 4 คู่ และ 8 คู่ ค่าเวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที่ แรงดันย้อนกลับ เท่ากับ 10V จะมีกระแสมืด 0.055  $\mu A$  , 2.03  $\mu A$  , 5.75  $\mu A$  และ 8  $\mu A$  ตามลำดับ ค่ากระแสมืดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.13) เนื่องจากจากจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งพิจารณาเหมือนกับ pin โฟโตไดโอด แบบ planar ดังสมการที่ 2.7

$$I_0 = Aqn_i^2 \left( \frac{D_h}{L_h n_n} + \frac{D_e}{L_e p_p} \right)$$

$$I_0 \propto A$$

กระแสมืดจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  เพิ่มขึ้นนั่นเอง

จากนั้นเมื่อพิจารณาผลของจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสแสง โดยได้ทำการเปลี่ยนแปลงจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ตั้งแต่ 1 คู่, 2 คู่, 4 คู่ และ 8 คู่ ค่าเวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที่ แรงดันย้อนกลับ เท่ากับ 10V ที่ความเข้มแสง 12000 lux จะมีกระแสแสง 225.94  $\mu A$  , 246.73  $\mu A$  , 272.78  $\mu A$  และ 320.92  $\mu A$  ตามลำดับ ค่ากระแสแสงมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น (ดังรูปที่ 4.14) เนื่องจากจากจำนวนคู่  $p^+$  และ  $n^+$  ที่เพิ่มขึ้นทำให้พื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งพิจารณาเหมือนกับ pin โฟโตไดโอด แบบ planar ดังสมการที่ 2.14

$$I_p = qAg_{op}(L_p + L_n)$$

$$I_p \propto A$$

กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่รอยต่อ  $p^+ - i$  เพิ่มขึ้นนั่นเอง

จากนั้นเมื่อพิจารณาผลกระแสแสง ที่มีผลต่อความเข้มแสง โดยได้นำ pin photodiode แบบ interdigitate ที่มีจำนวนคู่ 8 คู่ มาวัดค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสง 3000Lux , 6000Lux , 9000Lux และ 12000Lux จะได้กระแสแสง 99.62  $\mu A$  , 169.22  $\mu A$  , 232.92  $\mu A$  และ 320.92  $\mu A$  ตามลำดับ จะได้ว่าเมื่อความเข้มแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น (ดังรูปที่ 4.15) pin photodiode แบบ interdigitate จะให้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้น เหมือนกับ pin photodiode ที่มีโครงสร้างแบบอื่นๆ

**การทดลองตอนที่ 4.5 การทดลองเพื่อศึกษาผลของความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  ของโครงสร้างแบบ interdigitate**

เมื่อพิจารณาผลของความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสมืด โดยได้ทำการ เปลี่ยนแปลงความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  มีค่า 237 mm , 475 mm , 712 mm และ 950 mm ค่าเวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที แรงดันย้อนกลับ เท่ากับ 10V จะมีกระแสมืด 4.6  $\mu\text{A}$  , 6.09  $\mu\text{A}$  , 6.75 $\mu\text{A}$  และ 7  $\mu\text{A}$  ค่ากระแสมืดมีแนวโน้มคงที่ (ดังรูปที่ 4.16) ความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  จึงไม่มีผลกับกระแสมืด

จากนั้นเมื่อพิจารณาผลของความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  ที่มีผลต่อกระแสแสง โดยได้ทำการ เปลี่ยนแปลงความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  มีค่า 237 mm , 475 mm , 712 mm และ 950 mm ค่าเวลาในการแพร่สารเจือ  $p^+$  45 นาที ความเข้มแสง 12000 lux ที่แรงดันย้อนกลับ เท่ากับ 4V จะมีกระแสแสง 219  $\mu\text{A}$  , 224  $\mu\text{A}$  , 232  $\mu\text{A}$  และ 233  $\mu\text{A}$  ค่ากระแสแสงมีแนวโน้มคงที่ (ดังรูปที่ 4.17) ความยาวของ  $p^+$  และ  $n^+$  จึงไม่มีผลกับกระแสแสง

## บรรณานุกรม

1. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช , “ เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์ ” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
2. รศ.ดร.สมเกียรติ สุภเดช , “ เซมิคอนดักเตอร์ควิซ ” , คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
3. เอกสารประกอบการอบรมความรู้ด้าน ไมโครอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น , ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (Electronics Research Center)
4. รศ.ดร. ดุสิต เครื่องงาม , “ สิ่งประดิษฐ์อปโตอิเล็กทรอนิกส์ ” , ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน
5. W.R.Runyan , “ Semiconductor Measurements and Instrumentation ” , Mc.Graw-Hill Inc, 1967

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้