

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ศึกษากระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด

แบบ Multi-Stripe

Study on Fabrication and Characterization of Silicon Multi-Stripe Photodiodes

โดย

นาย เจริญพงษ์ ชินสกุลเจริญ

นาย ฌณัฐ กัลยาณสันต์

เลขหมู่.....

เลขทะเบียน..... 72684

วัน,เดือน,ปี... 21 ส.ย. 2550

b.....

i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงการ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อ โครงการ ศึกษากระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอด

แบบ Multi-Stripe

Study on Fabrication and Characterization of Silicon Multi-Stripe Photodiodes

นักศึกษาผู้จัดทำ

1. นาย เจริญพงษ์ ชินสกุลเจริญ รหัส 46010129

2. นาย ณัฏฐ์ กัลยาณสันต์ รหัส 46010186



โครงการนี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ศึกษากระบวนการสร้างและคุณลักษณะทางไฟฟ้าของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ Multi-Stripe

นักศึกษาผู้จัดทำ นายเจริญพงษ์ ชินสกุลเจริญรหัส 46010129
นายณณภัฏร์ กัลยาณสันต์ รหัส 46010186
อาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สมเกียรติ สุกเดช
ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอผลการพัฒนาโครงสร้างของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN แบบแนวตั้ง เพื่อเพิ่มสมรรถนะของ โฟโตไดโอดให้มีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง โดยออกแบบให้เป็น โครงสร้างที่มีชั้นอินทรีนซิคและชั้นปลดพาหะอยู่ที่บริเวณผิวเพื่อเพิ่มกระแสแสง ซึ่ง โครงสร้างนี้แตกต่างจากโครงสร้างของโฟโตไดโอดทั่วไป โดยพื้นที่รับแสงมีลักษณะเป็นแถบสลับระหว่างชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดพีและชนิดอินทรีนซิค ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ ได้แก่ ความกว้างและระยะห่าง จากการศึกษาพบว่า ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบใหม่นี้ จะมีสมรรถนะที่ดีขึ้น โดยมีคุณสมบัติการตอบสนองทางแสงสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study on Fabrication and Characterization of Silicon Multi-Stripe Photodiodes

Authors Mr.Charoenpong Chinsakulcharoen 46010129

Mr. Nanut Kanlayanasant 46010186

Advisor Assoc.Prof.Dr.Somkiat Supadech

Year 2006



Abstract

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้ประสบผลสำเร็จล่วงได้ด้วยดี ผู้จัดทำขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่
ปรึกษา รศ.ดร. สมเกียรติ สุขเกษ ที่ได้กรุณาให้คำชี้แนะแนวทางในการแก้ปัญหา รวมทั้งรายละเอียด
ต่างๆที่เกี่ยวข้องกับโครงการนี้

ขอขอบพระคุณรุ่นพี่นักศึกษาปริญญาโทนายจิรวุฒิ ปราบเขต สำหรับความช่วยเหลือ
และดูแลการทำงานในทุกๆเรื่อง ทั้งคำปรึกษา ตลอดจนคำชี้แนะ รวมทั้งรายละเอียดต่างๆ ที่
เกี่ยวข้องกับ โค โรงงานรวมถึงเพื่อนๆทุกคน และทุกกำลังใจที่ให้ตลอดมา

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำให้โครงการนี้สำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณบิดาและมารดา ที่สนับสนุนและให้กำลังใจตลอดมา

(นาย เจริญพงษ์ ชินสกุลเจริญ)

(นาย วัฒนภูฏ์ กัลยาณสันต์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	V
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 สารกึ่งตัวนำ	3
2.2 รอยต่อพี-เอ็น	8
2.2.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล	8
2.2.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับแสงไปข้างหน้า	12
2.2.3 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับแสงไปถอยหลัง	13
2.2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อ	15
2.3 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง	18
2.4 โฟโตไดโอดแบบ p-i-n	20
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง	23
3.1 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n	23
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองใช้ halogen	37
4.1 การทดลองหาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe	37
4.1.1 ศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อกระแสมืด (I_{DARK})	38
4.1.2 ศึกษาผลของความกว้างของ p stripe ที่มีผลต่อกระแสมืด (I_{DARK})	39
4.1.3 ศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อกระแสแสง (I_{LIGHT})	40
4.1.4 ศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อกระแสแสง (I_{LIGHT})	41
4.1.5 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
4.1.6 ศึกษาผลของความกว้างของ p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})	43
4.1.7 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})	44
4.2 การทดลองหาคุณสมบัติของความจุไฟฟ้าและแรงดันของซีลิกอน โฟโตไดโอด แบบ p-i-n ชนิด Multistripe	47
4.2.1 ศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อความจุไฟฟ้า (Capacitance)	47
บทที่ 5 สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	48
บรรณานุกรม	50



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n	2
รูปที่ 2.1 สัญลักษณ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำ (ก) และ (ข) แสดงภาพสองมิติของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำ	4
รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างผลึกสารกึ่งตัวนำแบบ 3 มิติ	5
รูปที่ 2.3 ภาพสองมิติของ โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค	5
รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ของอะตอมสารเจือชนิดพีและเอ็น	6
รูปที่ 2.5 (ก) การเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนและอะตอมสารเจือ ชนิดเอ็นและ (ข) ระดับผู้ให้ในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็นที่ 0 เคลวิน	7
รูปที่ 2.6 (ก) การเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนและอะตอมสารเจือ ชนิดพีและ (ข) ระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ชนิดพีที่ 0 เคลวิน	7
รูปที่ 2.7 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น	8
รูปที่ 2.8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	10
รูปที่ 2.9 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน	11
รูปที่ 2.10 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น	12
รูปที่ 2.11 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะ ได้รับแรงดันไบอัสตรง	13
รูปที่ 2.12 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะ ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	13
รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็น ขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	14
รูปที่ 2.14 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อ	15
รูปที่ 2.15 การเกิดไฟฟ้าแสงใน โฟโตไดโอด (ก) การให้ไบอัสแก่ โฟโตไดโอดและ (ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสง	16
รูปที่ 2.16 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n	20
รูปที่ 2.17 ภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n	20

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.18 ลักษณะการกระจายความหนาแน่นประจุบริเวณปลดลอค พาหะ สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและศักดาไฟฟ้าใน บริเวณรอยต่อตามลำดับ	21
รูปที่ 2.19 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอดแบบ p-i-n (ก) การให้ไบแอส แก่ไดโอดและ (ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง	22
รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางของกระบวนการ oxidation	27
รูปที่ 3.2 ภาคตัดขวางของการสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching)	28
รูปที่ 3.3 ภาคตัดขวางของการ Drive-in ของฟอสฟอรัส	29
รูปที่ 3.4 ภาคตัดขวางของ Photo Mask # 1	30
รูปที่ 3.5 ภาคตัดขวางของการ Drive-in ของ โบรอน	31
รูปที่ 3.6 ภาคตัดขวางของ Photo Mask # 2	32
รูปที่ 3.7 ภาคตัดขวางของกระบวนการ Oxidation	32
รูปที่ 3.8 ภาคตัดขวาง Photo Mask # 3	33
รูปที่ 3.9 ภาคตัดขวางของกระบวนการ Aluminium Evaporation	34
รูปที่ 3.10 ภาคตัดขวางของกระบวนการ Al etching	35
รูปที่ 4.1 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล พิจารณาแสง halogen	37
รูปที่ 4.2 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stripe กับกระแสมืด (I_{DARK})	38
รูปที่ 4.3 กราฟความสัมพันธ์ของความกว้างระหว่าง p stripe กับกระแสมืด (I_{DARK})	39
รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มแสงกับกระแสแสง (I_{LIGHT})	40
รูปที่ 4.5 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})	41
รูปที่ 4.6 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})	42
รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของ p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})	43
รูปที่ 4.8 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 20, 40, 60 μm	44

รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 20, 40, 60 μm	44
รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 20 μm	45
รูปที่ 4.11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 40 μm	46
รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 60 μm	46
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง stripe กับค่าความจุ (Capacitance)	47



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 ตารางแสดงการออกแบบส่วนที่ 1	35
ตารางที่ 2 ตารางแสดงการออกแบบส่วนที่ 2	36
ตารางที่ 3 ตารางแสดงการออกแบบส่วนที่ 3	36



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

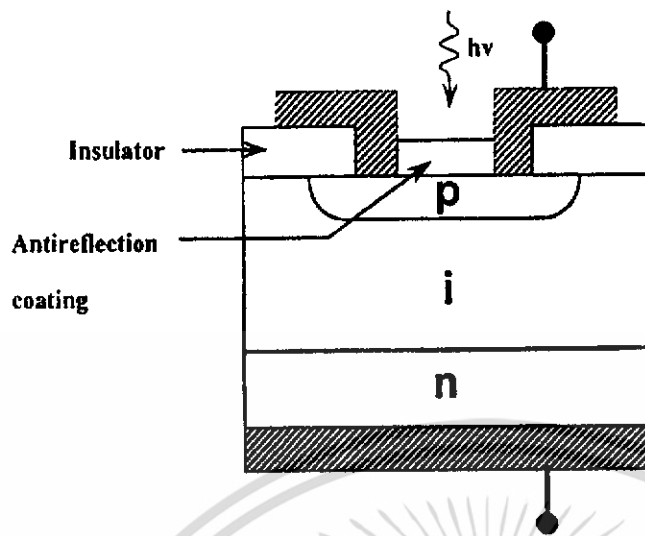
บทนำ

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปล่งแสง(Optical-Semiconductor Device) และงานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optical Electronics) เป็นงานที่ได้รับการพัฒนาและก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทั้งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทุกๆด้านอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง (Opto-Communication System) การสื่อสารระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งความเร็ว ความแม่นยำ และความประหยัด เมื่อเทียบกับระบบดั้งเดิม สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเปล่งแสงที่สำคัญๆได้แก่ โฟโตดีเทคเตอร์ (Photodetector) หรือตัวตรวจจับแสง โฟโตไดโอด (Photodiode) หรือไดโอดเปล่งงานแสงชนิดต่างๆเช่น โฟโตไดโอดแบบ p-i-n หรือ โฟโตไดโอดแบบอะวาลานซ์ โฟโตไดโอดซึ่งเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเปล่งแสงมีหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นพลังงานทางไฟฟ้าซึ่งจะนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่อไป สารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เปล่งแสงจะต้องมีคุณสมบัติการดูดกลืนแสง (Optical Absorbption) ของวัสดุสารกึ่งตัวนำที่ดีและสามารถเปลี่ยนสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าที่สามารถนำไปใช้ในวงจรได้ดี เช่น เยอรมันเนียม (Ge) ซิลิคอน (Si) และแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงมากที่สุดเพราะ ตอบสนองต่อความถี่สูงๆ ได้ดีกว่าซิลิคอน ในงานวิจัยนี้เราจะมาทำการศึกษาระบวนการสร้างโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างแบบ p-i-n ซึ่งใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างเป็นซิลิคอนเนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่าแกเลียมอาเซไนด์ (GaAs) และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายอย่าง

โฟโตไดโอดแบบ p-i-n เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงและอัตราเร็วในการทำงานที่สูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา มีลักษณะ โครงสร้างที่ประกอบไปด้วย ส่วน p ส่วน i และส่วน n แต่มีขั้วไฟฟ้าเพียงสองขั้วคือ ขั้ว p เป็นแอนโนดและขั้ว nเป็นคาโทดสารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้เป็นส่วนใหญ่ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงคือ แกเลียมอาเซไนด์ เพราะว่ามีคุณสมบัติที่น่าสนใจดังนี้คือ มีแถบพลังงานแบบช่องตรง (Direct Band Gap) ซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนที่มีแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรง (Indirect Band Gap) พลังงานแสงที่ต้องการจะให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในการนำกระแสของแกเลียมอาเซไนด์จึงน้อยกว่าของซิลิคอนและการตอบสนองความถี่ก็ดีกว่าอีกด้วยแต่ถึงอย่างไรซิลิคอนก็มีข้อดีที่น่าสนใจหลายอย่างเช่น กระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า ราคาที่ถูกกว่า อีกทั้งกระบวนการสร้างวงจรรวมที่ใช้ในปัจจุบันก็ใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย

วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัยมีดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multi-stripe
2. ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multi-stripe

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 สารกึ่งตัวนำ

ปัจจุบันนี้เป็นยุคของสารกึ่งตัวนำโดยแท้จริงเพราะอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำคือกลจักรสำคัญของไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์ทุกสาขา อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำมีมากมายหลากหลายชนิดซึ่งแต่ละชนิดก็จะให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าที่แตกต่างกัน ดังนั้นจึงถูกนำไปใช้ในหน้าที่ต่างๆอย่างกว้างขวางเพื่อความเข้าใจในเรื่องราวของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำอย่างถ่องแท้ จำเป็นต้องศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานและความรู้ทั่วไปของสารกึ่งตัวนำเสียก่อน

วัสดุต่างๆที่มีอยู่ในโลกนี้ อาจพิจารณาจัดแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 หมู่ คือ

1. วัสดุตัวนำ (Conductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
 2. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวนแต่เลวกว่าตัวนำ เช่น ซิลิคอน เยอรมันเนียม เป็นต้น
 3. วัสดุฉนวน (Insulator) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดี เช่น แก้ว เบกาไลต์ ไมก้า เป็นต้น
- สารกึ่งตัวนำอาจถูกพิจารณาจัดกลุ่มและจำแนกออกเป็นประเภทใหญ่ๆที่สำคัญได้ 3 ประเภทดังนี้คือ

1. สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว (Single Element Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ ธาตุต่างๆในหมู่ที่ IV ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ธาตุคาร์บอน (c) ธาตุซิลิคอน เยอรมันเนียม เป็นต้น สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยวที่นิยมนำไปใช้มากที่สุดได้แก่ ซิลิคอน โดยสามารถนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้แทบทุกชนิด

2. สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ (Compound Semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้เกิดขึ้นจากสารประกอบของธาตุสองธาตุได้แก่ สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ III และ III เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs), แกลเลียมฟอสไฟด์ (GaP) เป็นต้น สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ II และหมู่ที่ VI เช่น แคดเมียมซัลไฟด์ (CdS), แคดเมียมซีรีไนด์ (CdSe) เป็นต้น สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ IV และหมู่ที่ VI เช่น ลีดซัลไฟด์ (PbS), ลีดเทลลูไรด์ (PbTe) เป็นต้น สารประกอบของธาตุในหมู่ที่ IV สองชนิด เช่น ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) เป็นต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

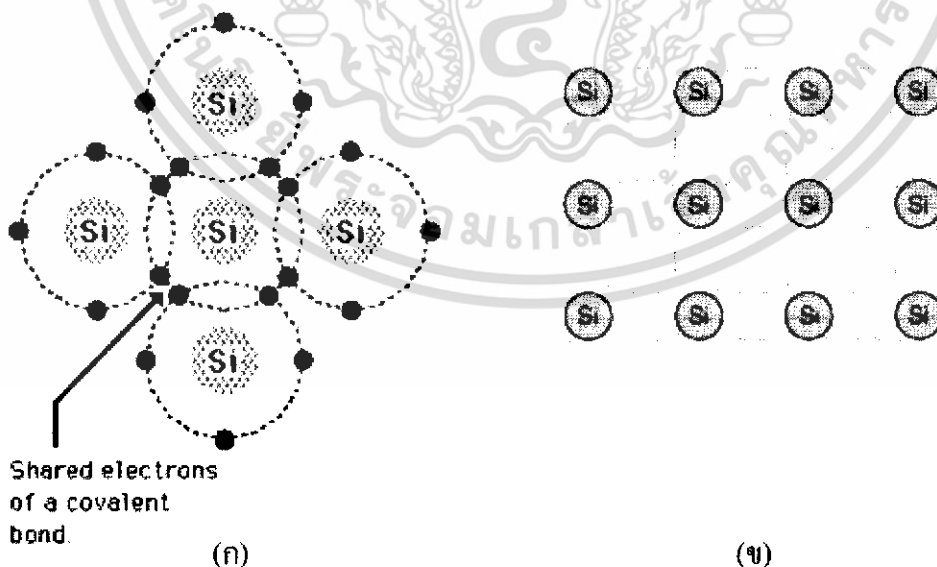
3. สารกึ่งตัวนำประเภทสารอัลลอย (Alloy Semiconductor)

ได้แก่ อัลลอยที่เกิดจากธาตุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไป

ในบรรดาวัสดุไฟฟ้า เช่น ตัวนำ, ฉนวน และสารกึ่งตัวนำ จะเห็นได้ว่าสารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุที่น่าสนใจที่สุด เนื่องจากมีคุณสมบัติพิเศษอื่นๆแตกต่างจากตัวนำและฉนวน คุณสมบัติที่เห็นได้ชัดก็คือ ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงได้โดยง่ายกับอุณหภูมิหรือแสงจากภายนอกและที่สำคัญเมื่อมีการเติมอะตอมสารเจือปนลงไปแม้เพียงเล็กน้อย ค่าความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากมาย ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้จะมีเฉพาะในสารกึ่งตัวนำเท่านั้น

โครงสร้างผลึกสารกึ่งตัวนำ

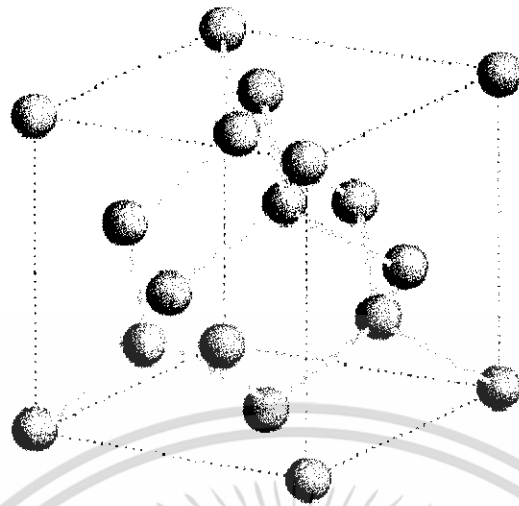
เมื่ออะตอมหลายๆอะตอมเข้ามาอยู่ใกล้ชิดกัน อะตอมดังกล่าวจะยึดเกาะเกี่ยวกันและกัน เพื่อรวมตัวกันเป็น โมเลกุล การเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมของธาตุเช่นนี้เราเรียกว่า บอนด์ (Bond) ซึ่งบอนด์ดังกล่าว จะเกิดระหว่างอะตอมที่อยู่ใกล้เคียง สำหรับกรณีของสารกึ่งตัวนำการเกาะเกี่ยวของอะตอมจะเป็นแบบที่เรียกว่า “โควาเลนต์บอนด์ (Covalent Bond)” โดยที่อะตอมซึ่งอยู่ใกล้เคียงกัน จะใช้อิเล็กตรอนร่วมกันเพื่อให้อะตอมอยู่ในภาวะที่มั่นคงซึ่งแต่ละอะตอมของสารกึ่งตัวนำ (ในที่นี้เราใช้ซิลิคอน) จะประกอบไปด้วยอิเล็กตรอนที่อยู่วงโคจรชั้นนอกสุดหรือที่เรานิยมเรียกว่า “วาเลนซ์อิเล็กตรอน (Valence Electron)” จำนวน 4 อิเล็กตรอน เมื่ออะตอมเข้ามาเกาะเกี่ยวกันอยู่ในลักษณะผลึก (Crystal) อะตอมหนึ่งๆจะเกาะเกี่ยวแบบโควาเลนต์บอนด์กับอะตอมข้างเคียงอีก 4 อะตอม



รูปที่ 2.1 (ก) สัญลักษณ์ของอะตอมสารกึ่งตัวนำ

(ข) ภาพสองมิติของโครงสร้างผลึก

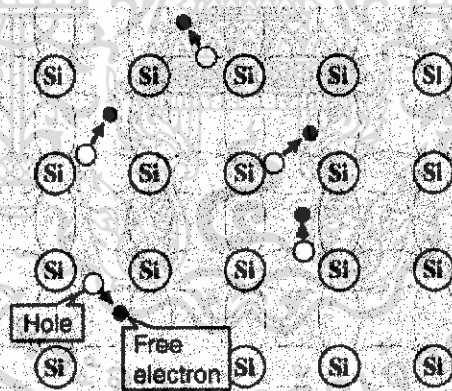
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.2 ลักษณะ โครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำแบบ 3 มิติ

โดยปกติสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามความบริสุทธิ์ คือ

1. สารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (Intrinsic Semiconductor) หมายถึงสารกึ่งตัวนำที่ปราศจากการเจือปนด้วยอะตอมแปลกปลอมหรืออะตอมเจือปน (Impurity Atom)



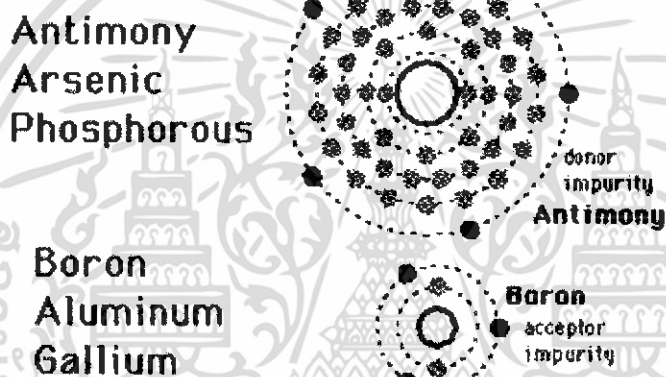
รูปที่ 2.3 ภาพสองมิติของ โครงสร้างผลึกสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์

2. สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic Semiconductor) เนื่องจากในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์จะมีความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลน้อย ซึ่งถ้านำมาคำนวณค่าความนำไฟฟ้าแล้วจะมีค่าน้อยกว่าวัสดุจำพวกตัวนำมากและในทางปฏิบัติเพื่อให้สารกึ่งตัวนำสามารถถูกนำไปใช้ได้อย่างกว้างขวาง เช่น การนำไปสร้างเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เราจำเป็นต้องเติมอะตอมสารเจือ ซึ่งผลของอะตอมสารเจือที่เติมลงไปจะทำให้สารกึ่งตัวนำสามารถนำไฟฟ้าได้ดีขึ้นอย่างมากและยังสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมค่าความนำไฟฟ้าได้อีกด้วย ซึ่งเราเรียกสารกึ่งตัวนำที่ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุอื่นว่า “สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic Semiconductor)”

อะตอมสารเจือ (Impurity Atom) หมายถึง อะตอมของธาตุในหมู่ที่ III หรือหมู่ที่ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ ซึ่งใช้เติมลงไปในผลึกสารกึ่งตัวนำด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้พาหะซึ่งก็คือ อิเล็กตรอนหรือโฮล และปริมาณพาหะตามที่ต้องการ อะตอมที่นำมาเป็นสารเจือควรจะต้องมีขนาดของอะตอมและคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับอะตอมสารกึ่งตัวนำนั้นๆ เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเสียหายของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำได้ อะตอมสารเจืออาจถูกจัดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.4



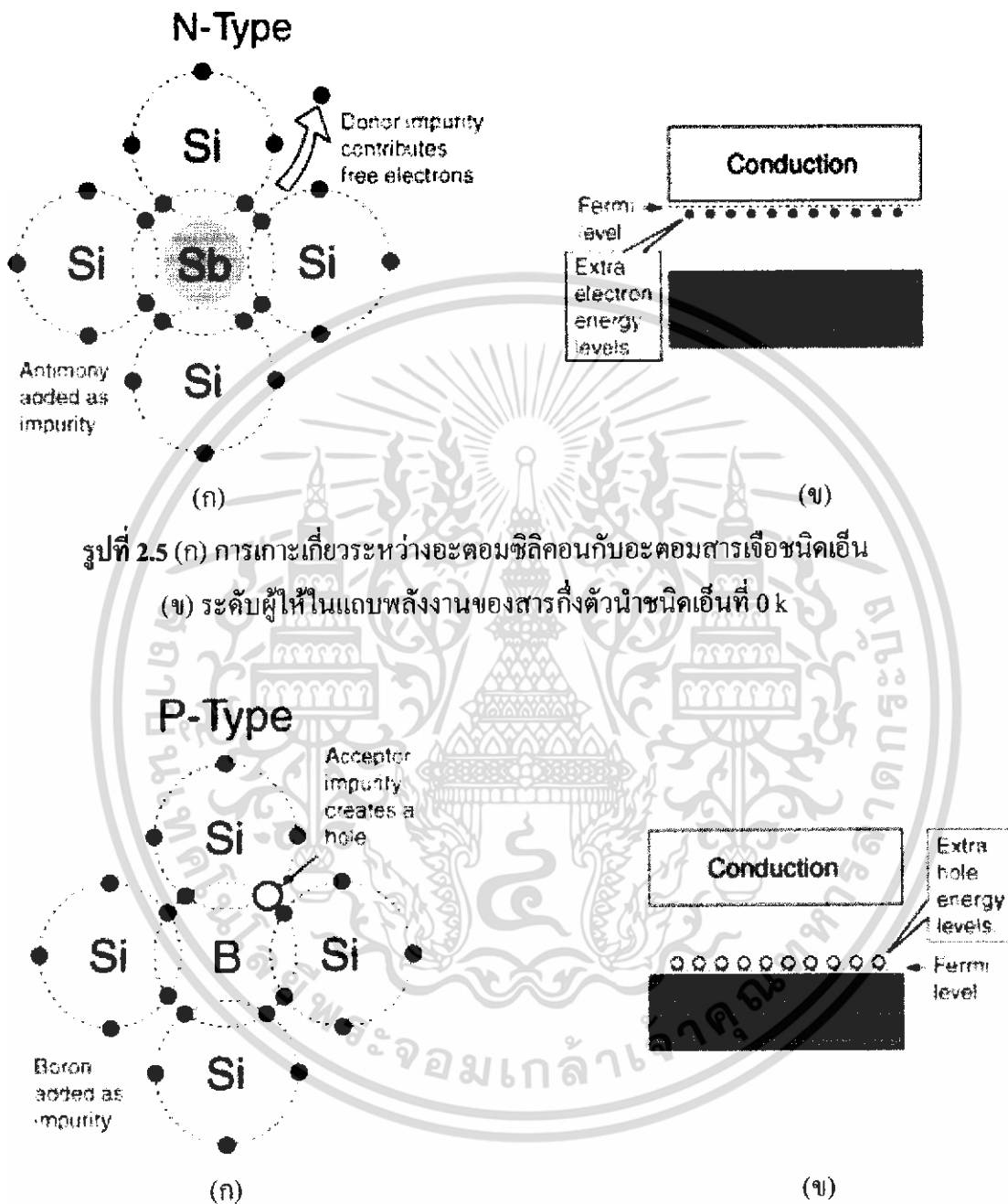
รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ของอะตอมสารเจือชนิดเอ็นและพี

(ก) อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (n-type Impurity Atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส (P), สารหนู (As) เป็นต้น และที่นิยมมากที่สุด ได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน ดังนั้น บางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้ให้ (Donor Atoms)” ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้จะมีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมาก อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะส่วนมากและเป็นหลักในการนำไฟฟ้า จึงทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type Semiconductor)”

(ข) อะตอมสารเจือชนิดพี (p-type Impurity Atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุที่อยู่ในหมู่ที่ III ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น โบรอน (B), อะลูมิเนียม (Al) เป็นต้น และที่นิยมใช้งานมากที่สุด ได้แก่ โบรอน (B) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้โฮลหรือผู้รับอิเล็กตรอน ดังนั้น บางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่า “อะตอมผู้รับ (Acceptor Atoms)” ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผู้รับจะมีปริมาณ โอลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โอลจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้า ทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่า “สารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type Semiconductor)”



รูปที่ 2.5 (ก) การเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมสารเจือชนิดเอ็น

(ข) ระดับผู้ให้ในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ 0 k

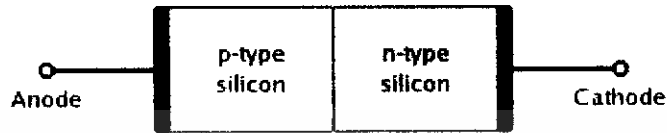
รูปที่ 2.6 (ก) การเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมสารเจือชนิดพี

(ข) ระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ 0 k

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 รอยต่อพี-เอ็น (p-n junction)

การสร้างรอยต่อพี-เอ็นในการสร้างไดโอดมักใช้วิธีการแพร่สารเจือปน (impurity) ชนิดเอ็นหรือพีเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นชนิดที่ตรงข้ามกัน



รูปที่ 2.7 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อพี-เอ็น

2.2.1 รอยต่อพี-เอ็นในสภาวะสมดุล

เมื่อยรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น ซึ่งเราสามารถสรุปได้ดังนี้คือ เนื่องจากโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) มีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type) มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type) ดังนั้นด้วยความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกันนี้เองจะทำให้เกิดการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่มีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านซึ่งมีความหนาแน่นน้อยกว่า กล่าวคือ โฮลทางด้านพีบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้ามาเข้าไปในด้านเอ็นซึ่งจะทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionize) ทำให้มีประจุลบซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อยู่ที่บริเวณรอยต่อทางด้านพีและในทำนองเดียวกันอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพีซึ่งจะทำให้เกิดการไอออไนซ์ (ionize) ทำให้มีประจุบวกซึ่งไม่สามารถเคลื่อนที่ได้อยู่ที่บริเวณรอยต่อทางด้านเอ็นซึ่งประจุบวกและลบทั้งสองด้านของรอยต่อจะเพิ่มขึ้นหรือพูดอีกนัยหนึ่งก็คือเกิดการสะสมของประจุซึ่งอำนาจของประจุบวกและประจุลบจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นการแพร่ข้ามรอยต่อของอิเล็กตรอนและโฮลจะค่อยๆ ลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีอำนาจมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสองแพร่ข้ามรอยต่อได้อีกต่อไป ซึ่งเราเรียกสภาวะนี้ว่า “สมดุล”

นอกจากนี้แล้วปรากฏการณ์ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อนั้นไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิด คงเหลือแต่ประจุที่ถูกไอออไนซ์เป็นไอออนลบและบวกแล้วอยู่ในบริเวณภายในรอยต่อ เราจะเรียกบริเวณนี้ว่า “บริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region)” สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (built-in voltage) ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เองที่เป็นกำแพงกั้นต่อการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

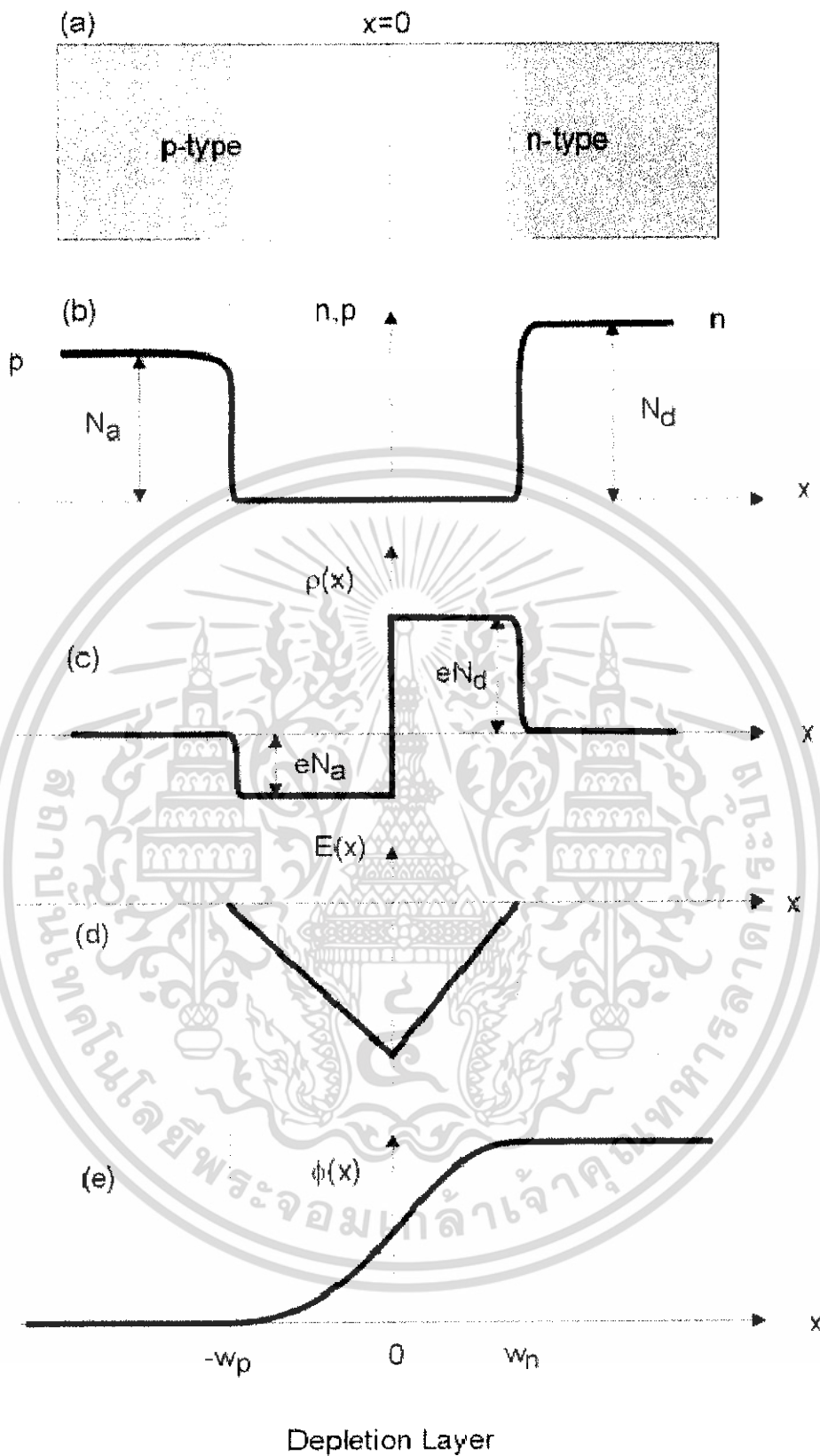
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะการกระจายความหนาแน่นของประจุ, สนามไฟฟ้าและความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริ
รอยต่อพี-เอ็นแสดงได้ดังในรูปที่ 2.8

โดยแรงดันไฟฟ้าภายในซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อพี-เอ็นสามารถแสดง
ได้ด้วยสมการ 2.1

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

โดย	V_{bi}	:	ศักย์สัมผัส (v)
	K	:	ค่าคงตัวของ โบสตันน์มีค่า = 8.62×10^{-5} eV/k
	T	:	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (k)
	q	:	ประจุอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมบ์
	N_A	:	ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (cm^{-3})
	N_D	:	ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (cm^{-3})
	n_i	:	ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ บริสุทธิ์ (cm^{-3})



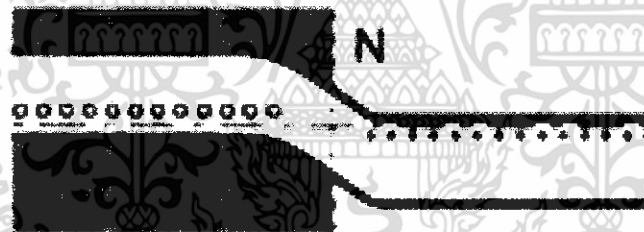
รูปที่ 2.8 คุณสมบัติทางไฟฟ้าบริเวณรอยต่อพี-เอ็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีที่เรากำลังพิจารณาลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงาน จะพบว่าขณะที่รอยต่อพี-เอ็นเกิดขึ้น ระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองจะต้องปรับให้อยู่ในระดับเดียวกันเนื่องจากหลังจากการสัมผัสกันจะถือว่าเป็นสารเดียวกัน ในขณะที่ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองกำลังปรับให้เท่ากัน จะตรงกับภาวะที่โฮลและอิเล็กตรอนแพร่ข้ามรอยต่อ จนกระทั่งเกิดสนามไฟฟ้าภายในต่อต้านการแพร่ของประจุพาหะ และในที่สุดอิเล็กตรอนและ โฮลก็ไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้ ซึ่งเป็นภาวะสมดุลของรอยต่อ ในขณะนี้เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าภาวะสมดุล ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ แสดงได้ดังสมการ 2.2

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon v_{bi}(N_A+N_D)}{q N_A N_D}} \tag{2.2}$$

โดยที่ ϵ : คือ permittivity ของสารกึ่งตัวนำ
 V_{bi} : ศักย์สัมผัส (v)



รูปที่ 2.9 รอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน

และนอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับ โครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้าที่รอยต่อแสดงได้ดังในสมการ 2.3

$$C_j = \sqrt{\frac{\epsilon q N_A N_D}{2 v_{bi}(N_A+N_D)}} \tag{2.3}$$

โดยที่ C_j : ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ (F/m^2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น

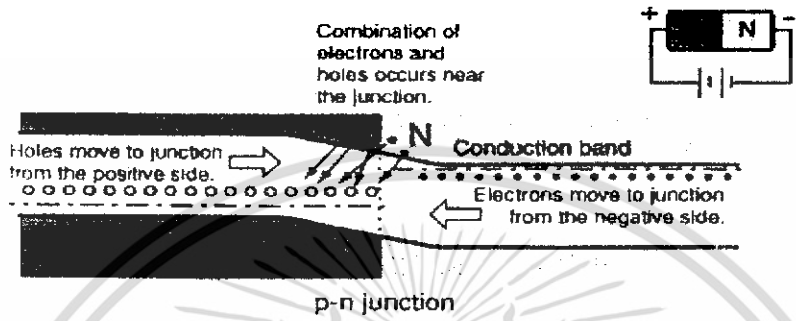
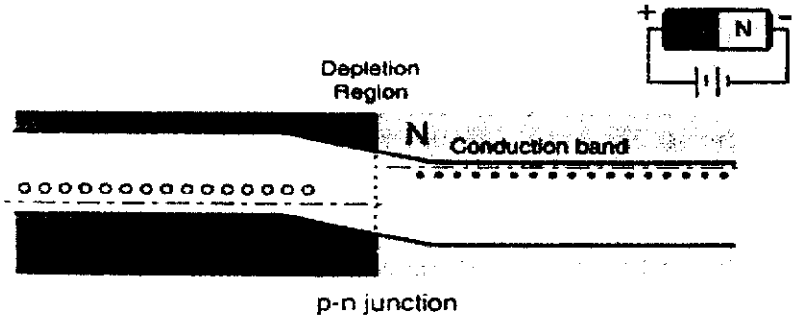
2.2.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับไบอัสตรง

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แรงดันไบอัสภายนอกค่า V_A จะไปปรากฏที่รอยต่อพี-เอ็น เพราะฉะนั้นจะทำให้โฮลจากด้านพีและอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นถูกฉีดข้ามรอยต่อพี-เอ็น และปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะแปรผันกับแรงดันไบอัสแบบเอ็กซ์โปเนนเชียล จากการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เองจะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร ซึ่งแสดงได้ด้วยสมการ 2.4

$$I = I_0 (e^{qV_A / kT} - 1) \quad 2.4$$

$$I_0 = Aq n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_A} + \frac{D_n}{L_n N_D} \right) \quad 2.5$$

โดยที่	I	:	คือกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็น
	I_0	:	คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
	V_A	:	คือแรงดันไบอัสตรง
	A	:	คือพื้นที่ของรอยต่อพี-เอ็น
	D_p, D_n	:	คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ
	L_p, L_n	:	คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ

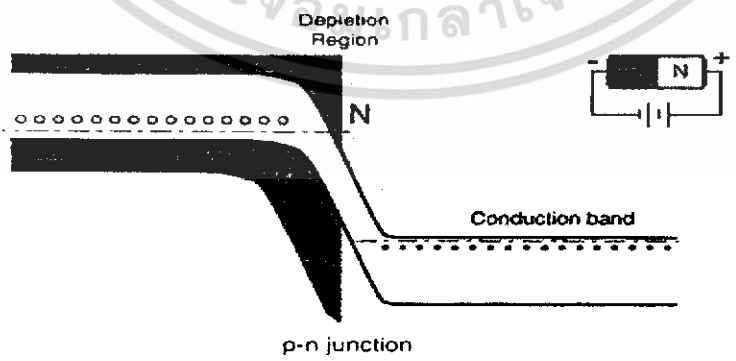


รูปที่ 2.11 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะ ได้รับแรงดันไบอัสตรง V_A

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังในรูปที่ 2.11 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) ของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลงดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ และเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้

2.2.3 รอยต่อพี-เอ็นในขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับไบอัสย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.12 กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพี-เอ็น มีค่า V_A โวลต์แล้วจะพบว่า แรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายใน ซึ่งปรากฏที่บริเวณรอยต่อ V_{bi}



รูปที่ 2.12 ลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็นขณะ ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้น จะทำให้ค่าแรงศักย์ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดใหญ่ขึ้น อิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็น และ โฮลจากทางด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้ รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวนไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ อย่างไรก็ตามจะพบว่าในขณะที่โฮลทางด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านพี ซึ่งเป็นพาหะส่วนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปรากฏว่ามีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อไปในทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง ซึ่งอาจพิจารณาได้จากสมการที่ 2.4 เมื่อแทนค่าของ V_A ด้วย

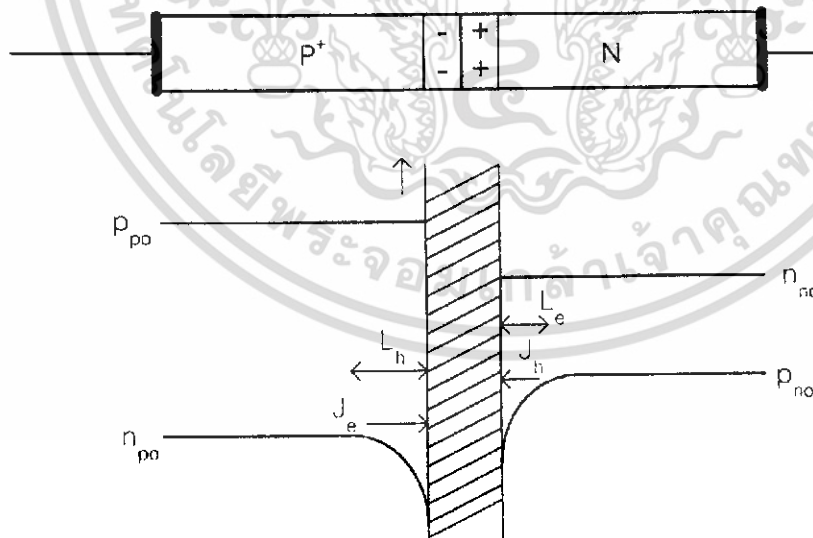
$$-V_A$$

ดังนั้นขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

$$I = -I_0$$

2.6

ลักษณะแถบพลังงานในขณะนี้ได้แสดงดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพี-เอ็นในขณะนี้จะมีทิศทางตรงกันข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง แต่ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมากและมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิค่าหนึ่งๆ



รูปที่ 2.13 ความหนาแน่นของพาหะที่ด้านทั้งสองของรอยต่อพี-เอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัส

ย้อนกลับ

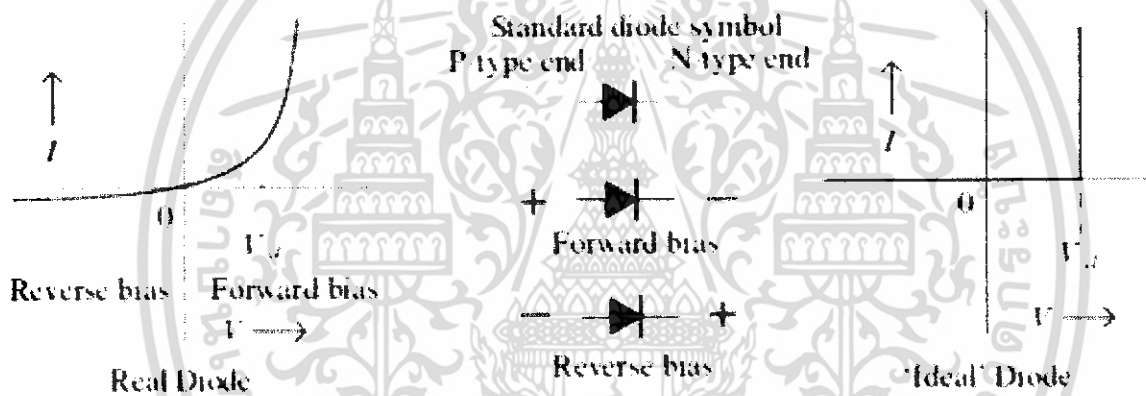
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

1). ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

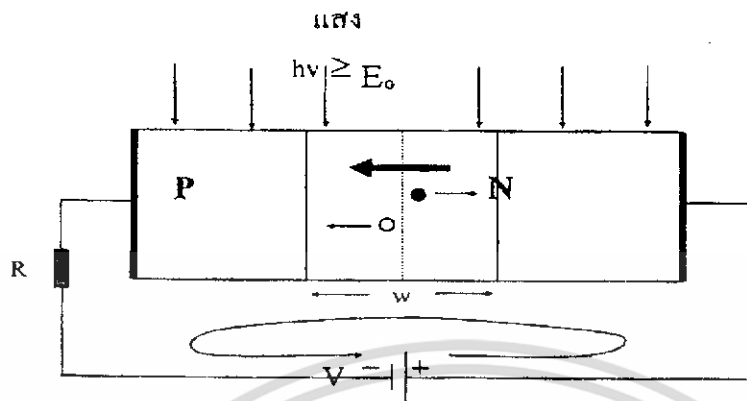
ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในตอนๆที่ 2.2.2 และ 2.2.3 เมื่อยรอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดัน ไบอัสย้อนกลับจะมีกระแสจำนวนน้อยมากไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันเราสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังแสดงในรูปที่ 2.14 ซึ่งกราฟนี้ได้มาจากสมการที่ 2.4

ลักษณะกราฟดังแสดงในรูปที่ 2.14 แสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟรี่ของรอยต่อพี-เอ็น

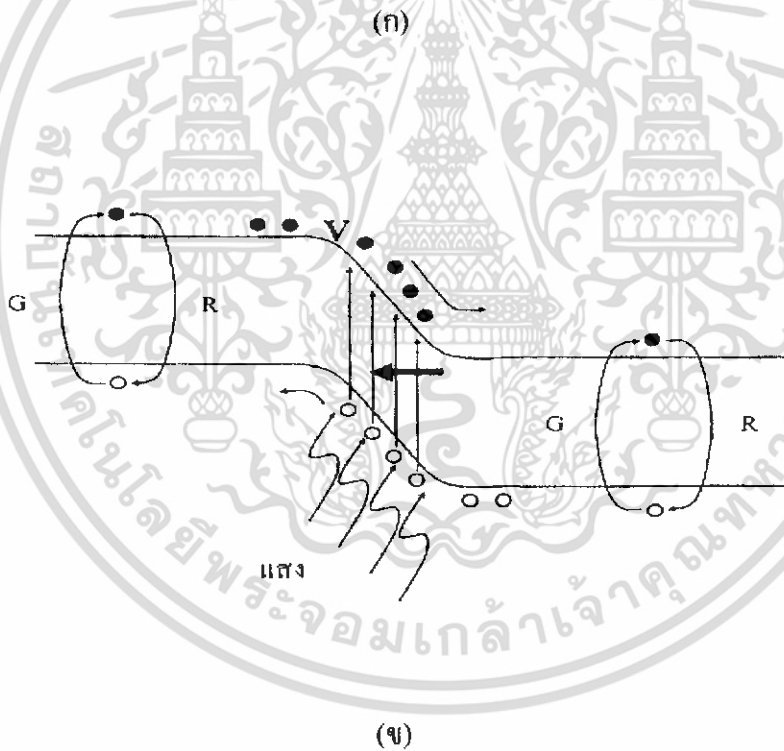


รูปที่ 2.14 ลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

2). ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง



● อิเล็กตรอน
 ○ โฮล



รูปที่ 2.15 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด

(ก). การให้ไบอัสแก่ไดโอด

(ข). ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในขณะที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแสง เราพิจารณาว่าในลำแสงประกอบด้วยกลุ่มของโฟตอน ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่งดังแสดงในสมการที่ 2.7

$$E_{\text{photon}} = hv \quad 2.7$$

โดยที่	E_{photon}	:	พลังงานของโฟตอน
	h	:	ค่าคงตัวพลังค์ = 6.624×10^{-34} j/s
	v	:	ค่าความถี่ของคลื่นแสง

เมื่อแสงตกกระทบบรอยต่อพี-เอ็นซึ่งเป็นเนื้อสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์ทำให้อิเล็กตรอนสามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระ อยู่ในแถบความนำได้ และทิ้งให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิสระที่เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อหรือใกล้ๆกับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลของสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะเคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าที่ไหลในทิศทางเดียวกันกับกระแสไฟฟ้าที่เกิดจากการที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.15

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง” (photo current) หรือเขียนย่อๆว่า I_L ดังนั้นกรณีที่รอยต่อได้รับแสงเราสามารถเขียนเป็นสมการใหม่ได้ว่า

$$I = I_D + I_L \quad 2.8$$

โดยที่	I_D	:	กระแสขณะไม่ได้รับแสง
	I_L	:	กระแสเนื่องจากแสง

และกระแสเนื่องจากแสงสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.9

$$I_L = qAg_{op}(L_n + L_p) \quad 2.9$$

โดยที่	g_{op}	:	อัตราการเกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮล เนื่องจากแสง
--------	----------	---	---

72684

2.3 หลักการพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง (Optical detector principle)

พื้นฐานของการเกิดการตรวจวัดแสง (optical detection) คือ การเกิดคู่ประจุพาหะ อิเล็กตรอน-โฮล ในส่วนที่เรียกว่า “intrinsic absorber” โดยในขณะที่โฟโตไดโอดทำงานจะต้องได้รับไบอัสย้อนกลับซึ่งการที่โฟโตไดโอดได้รับไบอัสย้อนกลับจะทำให้ที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็นมีความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเพิ่มมากขึ้น ทำให้เกิดสนามไฟฟ้าซึ่งจะทำหน้าที่เป็นตัวขยับยั้งการเคลื่อนที่ของประจุพาหะส่วนมากที่จะข้ามรอยต่อพี-เอ็น แต่สังเกตได้ว่าสนามไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการเร่งให้พาหะส่วนน้อยเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อพี-เอ็นทำให้เกิดกระแสย้อนกลับ (reverse leakage current) ของไดโอด ในบริเวณปลอดพาหะนี้เองจะมีลักษณะของ “intrinsic condition” เนื่องจากไม่มีพาหะส่วนเกินเกิดขึ้น

เมื่อโฟตอนภายนอกเข้ามาในบริเวณหรือใกล้เคียงกับบริเวณปลอดพาหะ โดยโฟตอนนั้นต้องมีพลังงานที่มากกว่าหรือเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารที่ใช้สร้างไดโอดนั้นคือ $h\nu \geq E_g$ ก็จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ทำให้เกิดคู่ประจุพาหะ อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น พาหะที่เกิดขึ้นจะถูกสนามไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อพี-เอ็น ผลักให้เคลื่อนที่ในทิศตรงข้ามกัน โดยโฮลจะไปทางด้านพีและอิเล็กตรอนจะไปทางด้านเอ็น ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสเพิ่มขึ้นจากกระแสรั่วไหลย้อนกลับเดิมที่มีอยู่เรียกว่า “กระแสแสง” (photo current) ในบริเวณปลอดพาหะทำให้ความเร็วในการทำงานของไดโอดลดลงดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดความกว้างของบริเวณนี้ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพิจารณาในทางสวนกันระหว่างจำนวนของโฟตอนที่จะเกิดการดูดกลืน ซึ่งหมายถึงความไว (sensitivity) กับความเร็วของการทำงาน

การดูดกลืน (Absorbtion)

การดูดกลืนโฟตอนในโฟโตไดโอดจะทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮลซึ่งจะเป็นผลทำให้เกิดกระแสแสงตามมา การดูดกลืนของแสงจะขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์ในการดูดกลืน (Absorbtion Coefficient, α_0) ของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างเป็นไดโอด การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำจะเป็นไปตามสมการ

$$P(x) = P_0(1 - e^{-\alpha_0 x}) \quad 2.10$$

โดยที่	$P(x)$:	กำลังงานของแสงที่ดูดกลืนในช่องว่างระยะทาง
	P_0	:	กำลังงานของแสงที่เข้ามา
	α_0	:	สัมประสิทธิ์ของการดูดกลืนแสงซึ่งขึ้นอยู่กัสารกึ่งตัวนำที่นำมาสร้างไดโอดและความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะเห็นได้ว่าค่า α_0 ของสารแต่ละชนิดจะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงที่เข้ามาและสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดจะใช้ได้กับความยาวคลื่นเพียงแค่วงแค่นั้น ซึ่งเนื่องมาจากความแตกต่างของแถบช่องว่างพลังงาน (Band gap Energy)

ค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (Quantum Efficiency)

ค่าประสิทธิภาพทางควอนตัม (η) คือ ค่าประสิทธิภาพของการเกิดโฟโตอิเล็กตรอน (photo electron) เนื่องจากโฟตอนที่เข้ามาดั่งสมการ

$$\eta = \frac{\text{number of electron collection at terminal}}{\text{number of incident photon}}$$

$$= \frac{r_e}{r_p} \quad 2.11$$

โดยที่ r_p : Incident photon rate
 r_e : electron rate

เนื่องจากผลของปรากฏการณ์ไฟฟ้าแสง (Photo electric effect) คือ โฟตอนหนึ่งตัวจะชนกับอิเล็กตรอนเพียงหนึ่งตัวเท่านั้นแต่โฟตอนทั้งหมดที่เข้ามาไม่ได้ชนกับอิเล็กตรอนทุกตัวนั้น หมายถึงไม่ใช่โฟตอนทุกตัวที่เข้ามาจะถูกดูดกลืนแล้วทำให้เกิดคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮลได้ทั้งหมดดังนั้นค่าประสิทธิภาพทางควอนตัมจะน้อยกว่า 1 ซึ่งมีผลโดยตรงมาจากค่าของ α_0 นั้นเอง

ผลการตอบสนอง (responsively)

ผลการตอบสนอง (R) เป็นคุณสมบัติที่สำคัญโฟโตดีเทคเตอร์ โดย

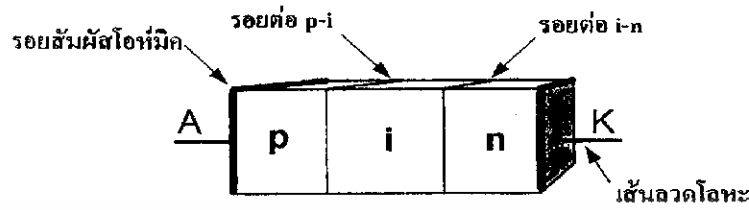
$$R = \frac{IL}{p_0} \quad 2.12$$

โดยที่ IL : ค่ากระแสแสง

p_0 : incident optical power

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

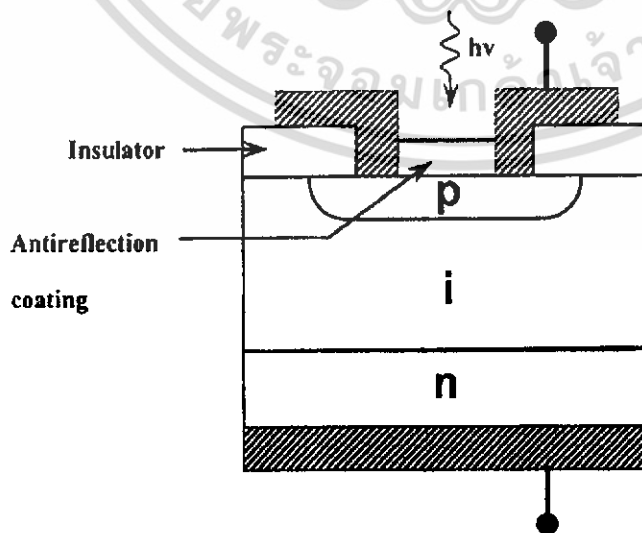
2.4 ซิลิกอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n



รูปที่ 2.16 ลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n

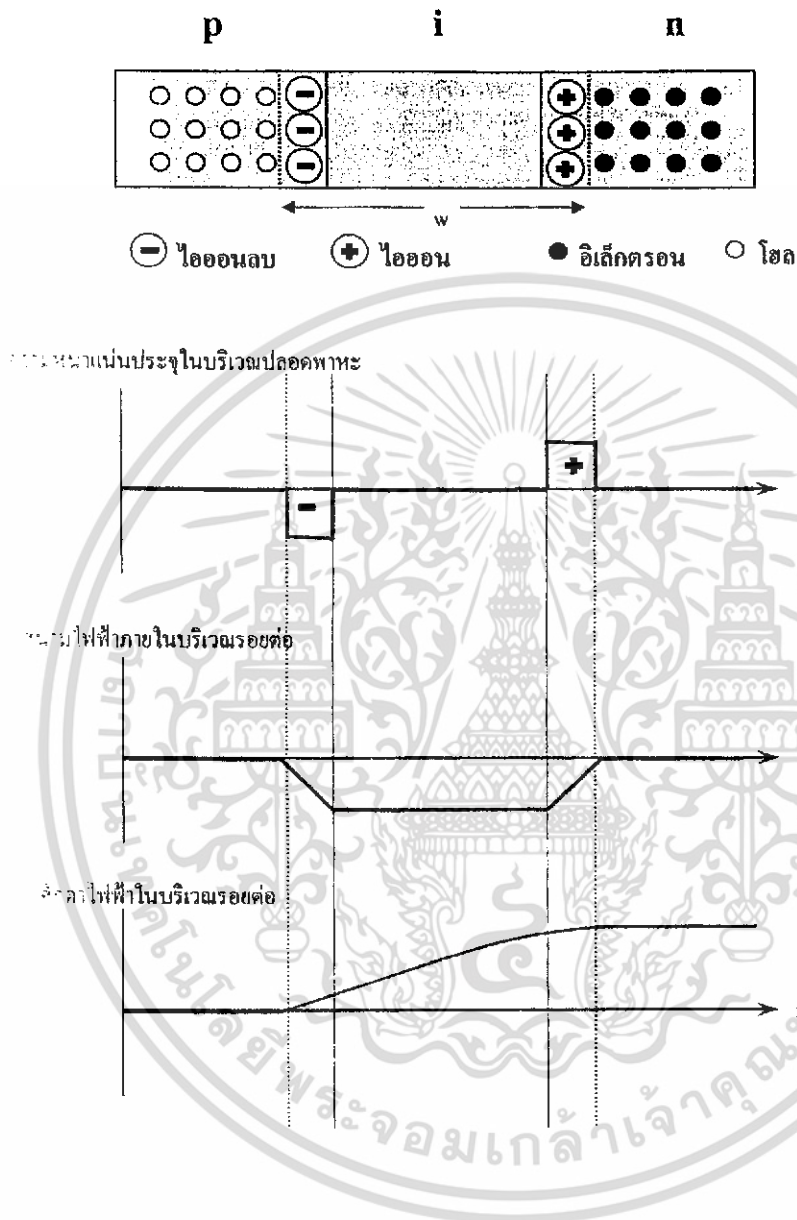
โฟโตไดโอดแบบ p-i-n เป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนสูงและอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา เนื่องจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ โดยปกติในการใช้งานโฟโตไดโอดแบบ p-i-n เรามักจะให้ไบอัสย้อนกลับค่าคงที่ค่าหนึ่งให้กับโฟโตไดโอดหรือก็คือการจ่ายไฟบวกเข้าทางด้านเอ็น (ขั้วแคโทด) และจ่ายไฟลบเข้าทางด้านพี (ขั้วแอโนด) เพื่อต้องการที่จะทำให้บริเวณปลอดพาหะระหว่างรอยต่อ p-i และรอยต่อระหว่าง i-n เชื่อมต่อกัน เมื่อให้แสง (โฟตอน) ที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้

โฟตอนสามารถเข้าไปอยู่ในชั้น i และ โฟตอนจะแตกตัวเป็นคู่ประจุพาหะอิเล็กตรอน-โฮล และเนื่องจากค่าสนามไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะมีค่าสูงมากพอที่จะครีฟท์ให้อิเล็กตรอนพุ่งกลับไปทางด้านเอ็นและ โฮลพุ่งกลับ ไปทางด้านพี ซึ่งการเกิดการครีฟท์ของพาหะนี้เองจะทำให้เกิดกระแสขึ้นซึ่งกระแสนี้ถูกเรียกว่า “กระแสแสง”



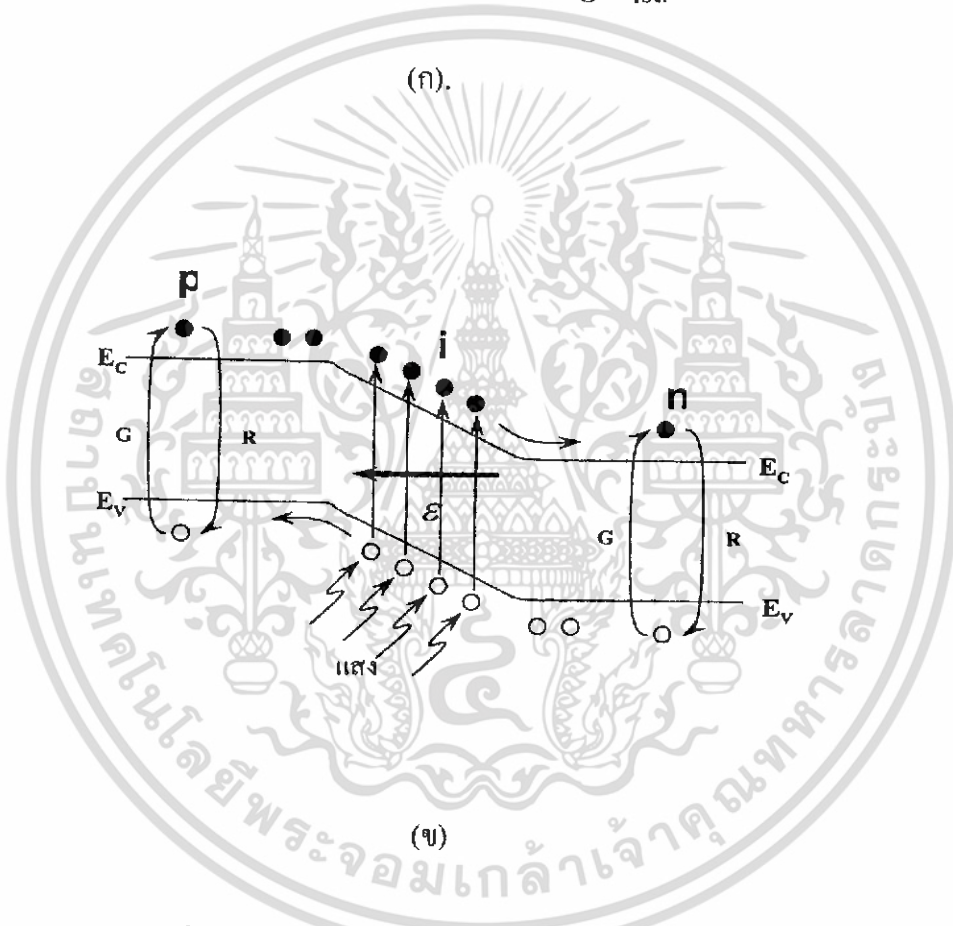
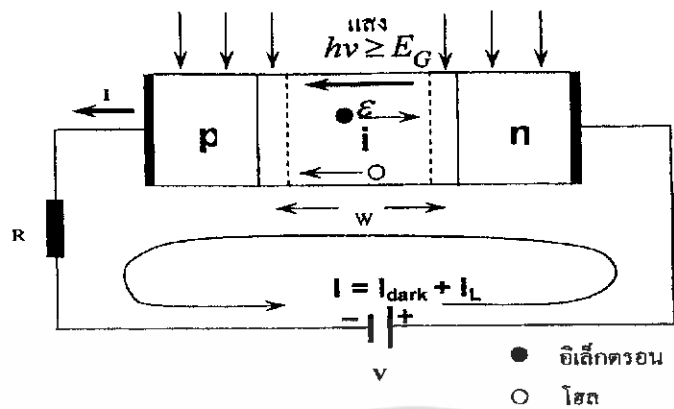
รูปที่ 2.17 ภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.18 ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและศักดาไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.19 การเกิดไฟฟ้าแสงโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

(ก). การให้ไบอัสแก่ไดโอด

(ข). ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ในการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แบบ Multi-stripe เพื่อการศึกษาถึงการเพิ่มขึ้นของกระแสแสง การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบ โครงสร้างและกระบวนการสร้าง โดยการออกแบบจะกล่าวถึงการออกแบบกระจกชั้นแบบเพื่อใช้ในการสร้าง และรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แบบ Multi-stripe

3.1 การสร้างกระจกชั้นแบบ

ในการออกแบบจะเป็นการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แบบ Multi-stripe โดยเปลี่ยนแปลงค่าความกว้างของชั้น p, ความห่างระหว่างชั้น p และความอัตราส่วนระหว่างชั้น p ต่อชั้น i

ออกแบบโครงสร้างของไดโอดและทำการถ่ายลงฟิล์มแล้วนำมาติดบนกระจกโฟโตมาส์ กระจกชั้นแบบทั้งหมดมี 4 มาส์ก็คือ

- มาส์ที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ (Boron diffusion)
- มาส์ที่ 2 ลอกชั้นออกไซด์ (Oxide etched)
- มาส์ที่ 3 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ (Contact windows)
- มาส์ที่ 4 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม (Aluminium etched)

3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แบบ Multi-stripe

3.2.1 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

โดยเริ่มต้นการเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิด i ระนาบ (111) ความหนาแน่นของแผ่นซิลิคอนประมาณ 275 ไมครอน

การตัดแบ่งแผ่นซิลิคอน จะใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษที่เรียกว่า Diamond-edged saw การลดความคมของแผ่นซิลิคอน โดยการใช้ผงขัดของซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีหลายเบอร์หลายขนาดดังนี้

- # 600 เส้นผ่าศูนย์กลาง 20 ไมครอน
- # 1000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 16 ไมครอน
- # 2000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 7.9 ไมครอน
- # 4000 เส้นผ่าศูนย์กลาง 3 ไมครอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สุดท้ายใช้ผงอลูมินา (Al_2O_3) ขัดเพื่อให้เป็นเงาคล้ายกระจก โดยผงอลูมินาเนี่ยมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ไมครอนและ 0.05 ไมครอน

3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน

การทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

1. การทำความสะอาดครั้งแรก เพื่อล้างสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนแผ่นซิลิคอน
2. การทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอนและกำจัดไขมันและสิ่งแปลกปลอม

3.2.3 กระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันคือ กระบวนการสร้างชั้น ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งนั้นเป็นสารที่มีคุณภาพเป็นฉนวนลักษณะ โปร่งแสง เพื่อเคลือบผิวหน้า และใช้ควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น โดยความหนาของชั้น (SiO_2) ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ เวลา และกระบวนการสร้าง ซึ่งการสร้าง โดยวิธีออกซิเดชันแบบแห้งนั้น จะใช้เวลามากกว่าวิธีออกซิเดชันแบบชื้น แต่ลักษณะการเกิดชั้น (SiO_2) จะมีข้อดีและมีผลกระทบต่อผิวหน้าของซิลิคอนน้อยกว่า

การสร้างชั้น (SiO_2) ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. ออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation)



2. ออกซิเดชันแบบชื้น (Wet Oxidation)



หมายเหตุ Wet Oxidation เกิดชั้น SiO_2 เร็วกว่า Dry Oxidation โมเลกุล H_2O เล็กกว่าโมเลกุล O_2

3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography)

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นกระบวนการที่ใช้ถ่ายภาพกระจกมาสก์ลงบนแผ่นซิลิคอน เพื่อเตรียมเปิดช่องออกไซด์เฉพาะบริเวณที่ต้องการแพร่สารเจือ โดยเคลือบผิวของแผ่นซิลิคอนด้วยน้ำยาไวแสง (Photo-resist) ซึ่งแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1. สารไวแสงชนิดลบ (Negative photo resist) โดยเมื่อถูกแสงแล้วจะแข็งตัวไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

2. สารไวแสงชนิดบวก (Positive photo resist) โดยเมื่อถูกฉายแสงแล้วจะอ่อนตัว และสามารถละลายในน้ำยาล้าง (Developer)

3.2.5 การฉายแสง (Exposure)

อัตราความไวต่อแสงของความยาวคลื่น λ อยู่ในช่วง 300-500 nm คือแสงที่เรามองเห็น สีม่วงและสีน้ำเงินนั่นเอง กรณีแสงที่มีความยาวคลื่น $\lambda > 500$ nm คือแสงสีเหลืองในห้องปฏิบัติการเทคนิคโฟโตลิโทกราฟี

Negative resist ไวต่อสเปกตรัม 405 nm

Positive resist ไวต่อสเปกตรัม 365 nm

3.2.6 กระบวนการแพร่อะตอมสารเจือ (Diffusion)

3.2.6.1 กระบวนการแพร่สารเจือโบรอน (Boron) เป็นกระบวนการแพร่สารเจือโบรอน ด้วยแหล่งสารเจือ BN ลงไปบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ไว้

3.2.6.2 กระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส (Phosphorus) เป็นกระบวนการแพร่สารเจือฟอสฟอรัส ด้วยแหล่งสารเจือ SiP_2O_5 (PH1000) ลงไปบริเวณที่เปิดช่องออกไซด์ไว้

3.2.7 Metallization Process

Metallization Process คือ กระบวนการทำขั้วโลหะ (Metal contact) หรือแถบตัวนำเชื่อมต่อภายใน (Metal wire interconnection)

คุณสมบัติโลหะที่ดี

1. Contact resistance (RC) ต่ำหรือมีสภาพเป็น good electrical contact และมีสภาพเป็น Ohmic contact ไม่ใช่ Rectifier contact

2. ρ ต่ำหรือ High conductivity เพื่อลด Voltage drop ในโลหะ และลดค่า Propagation delay

3. ไม่ทำปฏิกิริยาอื่นๆ ได้ง่าย คุณสมบัติไม่เปลี่ยนแปลง มีอายุการใช้งานนานๆ

4. ต้องสามารถทำ Photo etching ได้ และได้ลวดลายที่คมชัด

5. ต้องยึดติดกับชั้น SiO_2 ได้ดีไม่ลอกง่าย รวมทั้งต่อเชื่อมโลหะภายนอกได้ดี

6. ราคาถูก สร้างง่าย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.8 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอน ทำให้เกิดส่วนยึดลยระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอนขึ้นในขณะเดียวกัน โดยการนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในเตาแพร่สารในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ซีซี/นาที เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 500°C

3.2.9 กระบวนการสร้าง Si Photodiode แบบ (p-i-n) แบบ Multi-stripe

1. การเตรียมแผ่นซิลิคอนและการตรวจสอบคุณสมบัติ

- แผ่นซิลิคอนชนิดอินทรีนซิกระนาบ(111)
- พิกัดความต้านทาน $\approx 2000 \Omega\text{-cm}$
- ความหนา $\approx 275 \mu\text{m}$

2. ทำความสะอาดผิว

- Ultrasonic ในน้ำ DI (น้ำบริสุทธิ์) 3 นาที (เพื่อกำจัดฝุ่นละออง)
- ล้างในน้ำ DI เป่าแห้งด้วยก๊าซ N_2
- ดมใน $\text{HNO}_3 \approx 10$ นาที (เพื่อกำจัดโลหะหนัก เช่น เศษ Si)
- ล้างในน้ำ DI
- ดมน้ำ DI (I) 5 นาที
- ดมน้ำ DI (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย N_2

3. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน

- ดมใน Trichloroethylene 5 นาที (กำจัดสิ่งสกปรกประเภทไขมัน)
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

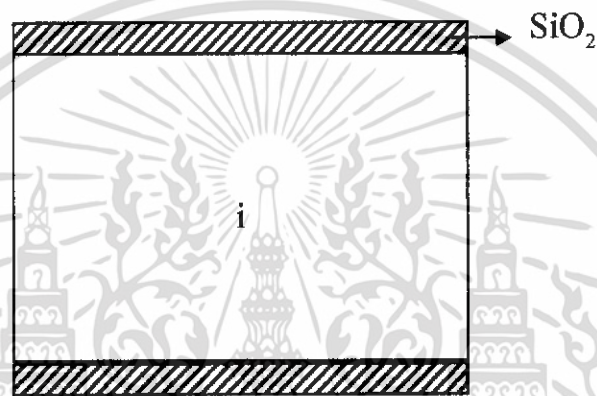
4. Slice etching (เพื่อกำจัด SiO_2 ที่อยู่บนผิว Si ก่อนการ Oxidation)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. Oxidation

- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min 1 ชั่วโมง
 - Wet ด้วย O_2 1000 cc/min 3 ชั่วโมง
 - Dry ด้วย O_2 1200 cc/min 1 ชั่วโมง
- อุณหภูมิเตา 1050 °C, อุณหภูมิน้ำ 90°C



รูปที่ 3.1 ภาคตัดขวางของกระบวนการ Oxidation

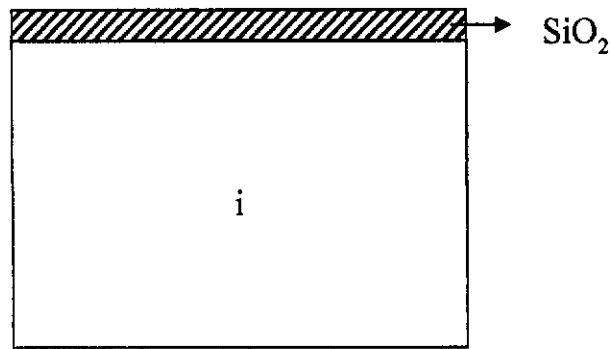
6. เคลือบน้ำยาไวแสงด้านหน้า

- อบแผ่นไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบฟิล์มด้านหน้า
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ 95°C 30 นาที

7. การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching), (ด้านหลัง)

- จุ่มในสารละลาย Buffer
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ภาคตัดขวางของการสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching)

8. ลอกฟิล์ม (ด้านหน้า)

- แช่ใน Acetone (I) 1 นาที
- แช่ใน Acetone (II) 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย N₂

9. ทำความสะอาดผิวหน้ามาตรฐาน

- ดมใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂

10. Slice etching (ด้านหลัง)

- จุ่มใน HF 5% 11 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N₂

11. Pre-deposition (ด้านหลัง)

- Phosphorus (สารเจือชนิด n)
- Pre-dep 1000°C ด้วย N₂ 1000 cc/min, 30 นาที

12. ลอกชั้น Phosphorus

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

- ล้างในน้ำ DI (II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วย N_2
13. ทำความสะอาดผิวหน้า (ด้านหลัง)

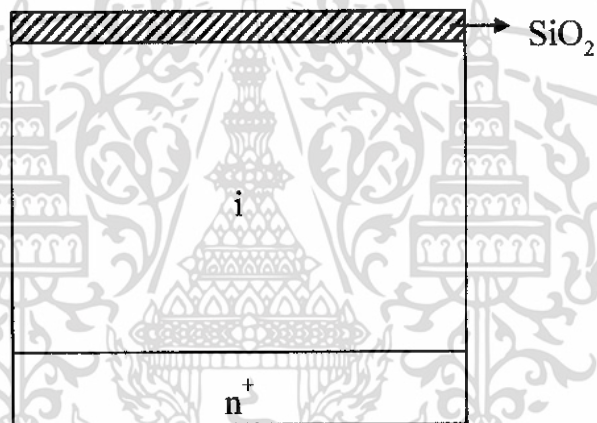
- ดั้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

14. Drive-in (ด้านหลัง)

Drive-in (Phosphorus) $1000^\circ C$

- Dry O_2 1200 cc/min.

Wafer (1-3) 7 ชั่วโมง



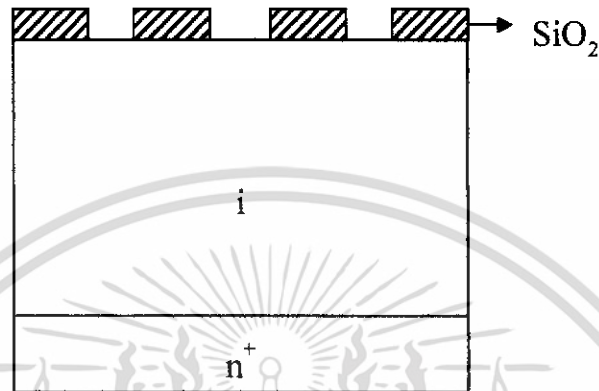
รูปที่ 3.3 ภาดตัดขวางของการ Drive-in ของฟอสฟอรัส

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

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ $120^\circ C$ 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin) 3000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ 30 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟิล์มโดย
- AZ Developer (I) 15 วินาที
- AZ Developer (II) 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วย N_2
- นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ 10 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ 30 นาที



รูปที่ 3.4 ภาคตัดขวางของ Photo Mask # 1

16. Oxide etching

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

17. ลอกฟิล์ม

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

18. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

19. Slice etching

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

20. Pre-deposition (ด้านหลัง)

- Boron (สารเจือชนิด p)
- Pre-dep $1000^{\circ}C$ ด้วย N_2 1000 cc/min, 20 นาที

21. ลอกชั้น Pre-deposition, Boron

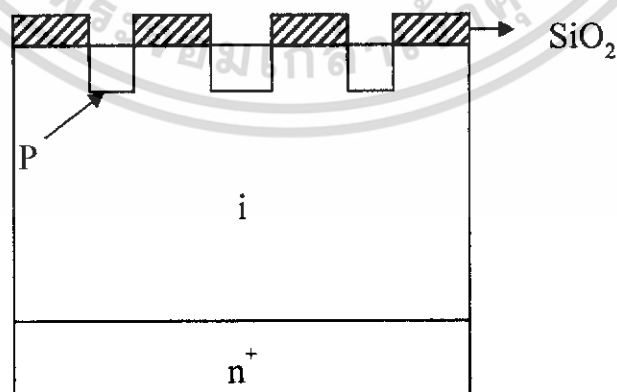
- จุ่มใน HF 5% 10 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

22. ทำความสะอาดผิว (ด้านหน้า)

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

23. Drive-in

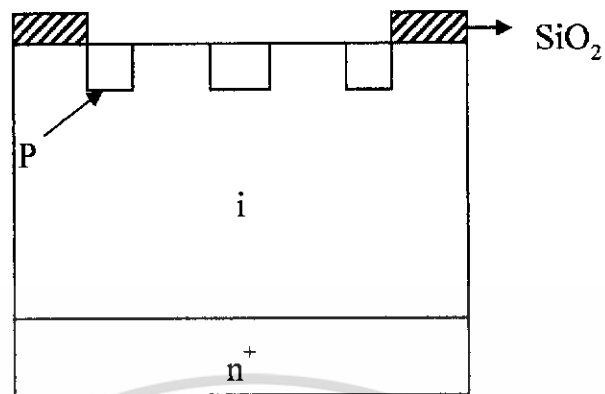
Drive-in (Boron) $1000^{\circ}C$ ด้วย O_2 (Dry) 1200 cc/min.



รูปที่ 3.5 ภาคตัดขวางของการ Drive-in ของโบรอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

24. Photo Mask # 2 (Oxide etched)

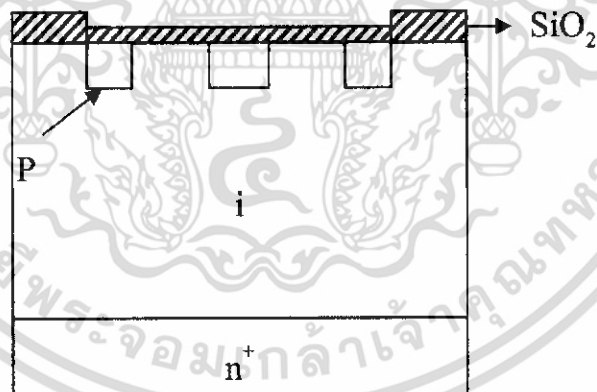


รูปที่ 3.6 ภาคตัดขวางของ Photo Mask # 2

25. Oxidation

- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min
- Wet ด้วย O_2 1000 cc/min
- Dry ด้วย O_2 1200 cc/min

อุณหภูมิเตา $1050^\circ C$, อุณหภูมิน้ำ $90^\circ C$



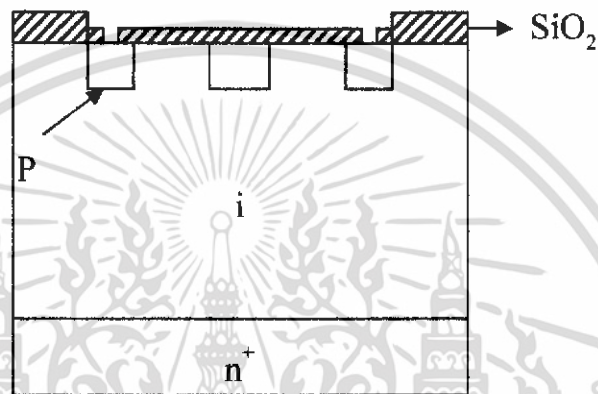
รูปที่ 3.7 ภาคตัดขวางของกระบวนการ Oxidation

26. Photo Mask # 3 (contact window)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Developer พิสูจน์ โดย
- AZ Developer (I) 15 วินาที
- AZ Developer (II) 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ 30 นาที



รูปที่ 3.8 ภาคตัดขวาง Photo Mask # 3

27. Oxide etching

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

28. ลอกฟิล์ม

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

29. ทำความสะอาดผิว (ด้านหน้า)

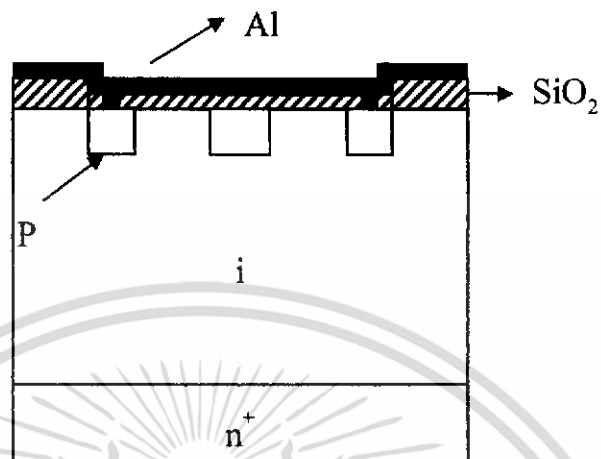
- ต้มใน Trichloroethylene 5 นาที
- Ultrasonic ใน Acetone 5 นาที

- ล้างในน้ำ DI (I)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

30. Aluminium Evaporation ที่ความดัน 2×10^{-6} มม.ของปรอท



รูปที่ 3.9 ภาคตัดขวางของกระบวนการ Aluminium Evaporation

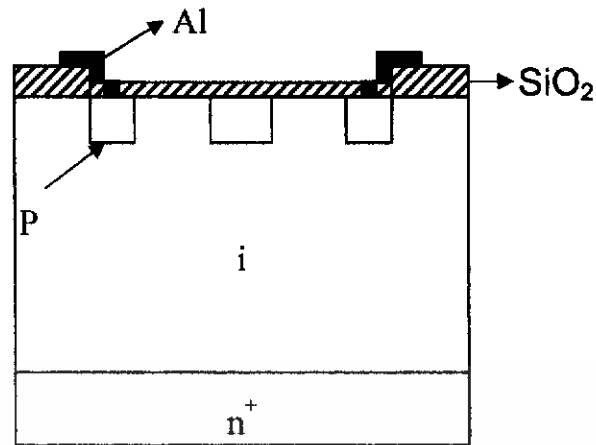
31. Photo Mask # 4 (contact mask)

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin) 3000 rpm.
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $85^{\circ}C$ 20 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟิล์ม โดย
- AZ Developer (I) 15 วินาที
- AZ Developer (II) 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $90^{\circ}C$ 30 นาที

32. Al etching

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.10 ภาคตัดขวางของกระบวนการ Al etching

33. ลอกฟิล์ม

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

34. Sintering $500^{\circ}C$

- Dry N_2 1000 cc/min 12 นาที

โดยในการออกแบบซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แบบ Multi-stripe จะมีด้วยกัน 3 ส่วนดังนี้
 1. การเปลี่ยนแปลงความห่างระหว่างชั้น p โดยกำหนดให้ความกว้างของชั้น p มีค่าคงที่ $20 \mu m$
 โดยเราสามารถสรุปข้อมูลการออกแบบเป็นตารางได้ดังนี้

Sample	ความห่างของชั้น p						
SP1	$25 \mu m$	$50 \mu m$	$100 \mu m$	$200 \mu m$	$400 \mu m$	$600 \mu m$	ไม่มี

ตารางที่ 3.1 ตารางแสดงการออกแบบส่วนที่ 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. การเปลี่ยนแปลงความกว้างของชั้น p โดยกำหนดให้มีจำนวน stripe ทั้งหมด 8 stripes โดยเราสามารถสรุปข้อมูลการออกแบบเป็นตารางได้ดังนี้

Sample	ความ กว้างของ ชั้น p						
SP1	20 μm	40 μm	60 μm	80 μm	100 μm	120 μm	ไม่มี

ตารางที่ 3.2 ตารางแสดงการออกแบบส่วนที่ 2

3. อัตราส่วนระหว่างชั้น p และชั้น i โดยเราสามารถสรุปข้อมูลการออกแบบเป็นตารางได้ดังนี้

Sample	อัตราส่วน ของชั้น p/i						
SP1	¼ โดยที่ ชั้น p/i กว้าง 20/80 μm	¼ โดยที่ ชั้น p/i กว้าง 40/160 μm	¼ โดยที่ ชั้น p/i กว้าง 60/240 μm	2/3 โดยที่ ชั้น p/i กว้าง 20/30 μm	2/3 โดยที่ ชั้น p/i กว้าง 40/60 μm	2/3 โดยที่ ชั้น p/i กว้าง 60/90 μm	ไม่มี

ตารางที่ 3.3 ตารางแสดงการออกแบบส่วนที่ 3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

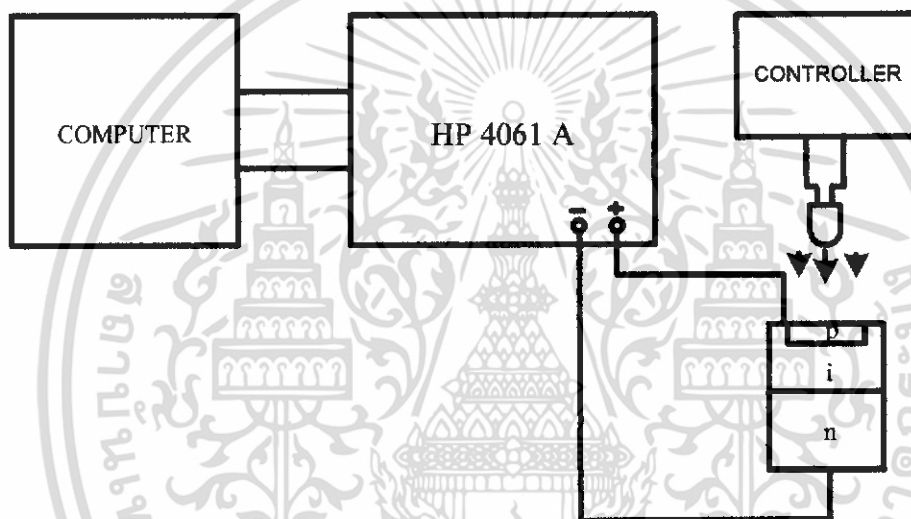
บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การทดลองหาคุณสมบัติของกระแสและแรงดันของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด

Multistripe

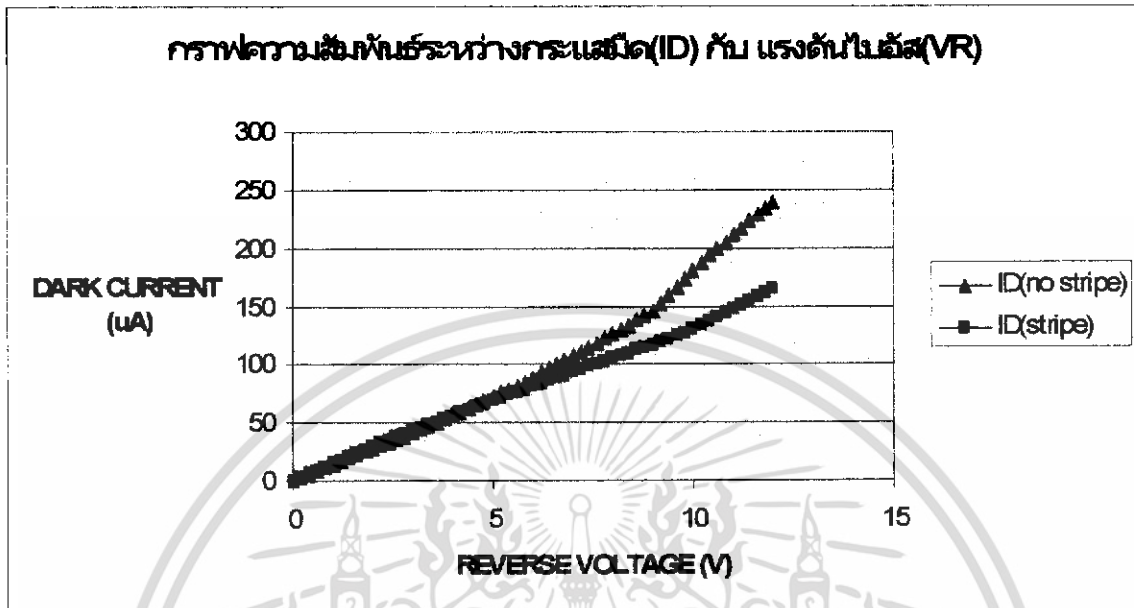
เพื่อศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe จึงนำโฟโตไดโอดที่สร้างไปทำการทดลองหาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดจากเครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูลดังรูป



รูปที่ 4.1 เครื่อง HP 4061 A ซึ่งใช้คอมพิวเตอร์ในการควบคุมและเก็บข้อมูล

4.1.1 ศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อกระแสมืด (I_{DARK})

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe กับซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดาที่ไม่มี stripe

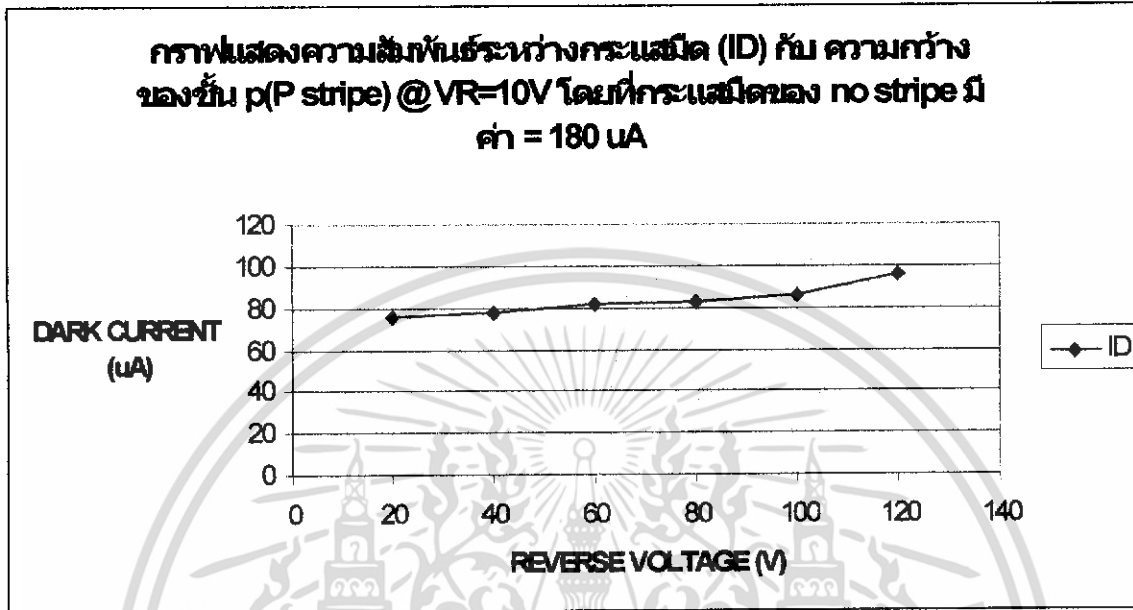


รูปที่ 4.2 ผลของผลของ stripe ที่มีต่อกระแสมืด (I_{DARK})

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.2 จะเห็นว่าค่าของ I_{DARK} ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe จะมีค่าน้อยกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา เนื่องจากซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe มีพื้นที่ active area ของชั้น p น้อยกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา จึงทำให้ค่าของกระแสมืด (I_{DARK}) มีค่าน้อยกว่านั่นเอง

4.1.2 ศึกษาผลของความกว้างของ p stripe ที่มีผลต่อกระแสมืด (I_{DARK})

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่มี ความกว้างของ p stripe ที่แตกต่างกัน โดยมีความกว้างของ p stripe ตั้งแต่ 20, 40, 60, 80, 100, 120 μm และ ไม่มี stripe

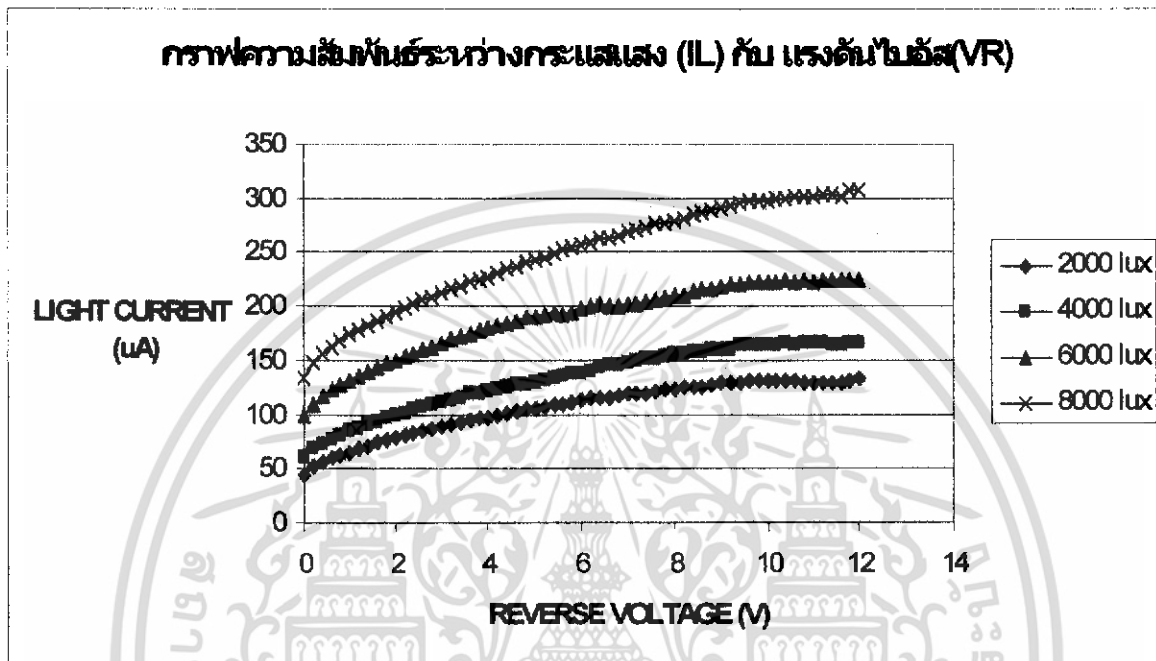


รูปที่ 4.3 ผลของความกว้างของ p stripe ที่มีผลต่อกระแสมืด (I_{DARK})

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.3 จะเห็นว่าค่าของ I_{DARK} ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่ความกว้างของ p stripe เพิ่มขึ้นจะมีค่าลดลงและจะมีค่าสูงสุดในกรณีที่ไม่มี stripe เลย เนื่องจากที่ความกว้างของ p stripe เพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างของบริเวณ active area มีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีค่ากระแสมืด (I_{DARK}) ลดลง

4.1.3 ศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อกระแสแสง (I_{LIGHT})

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่มีความกว้างของ stripe ที่เท่ากัน โดยให้ความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงไปตั้งแต่ 2000, 4000, 6000, 8000 lux

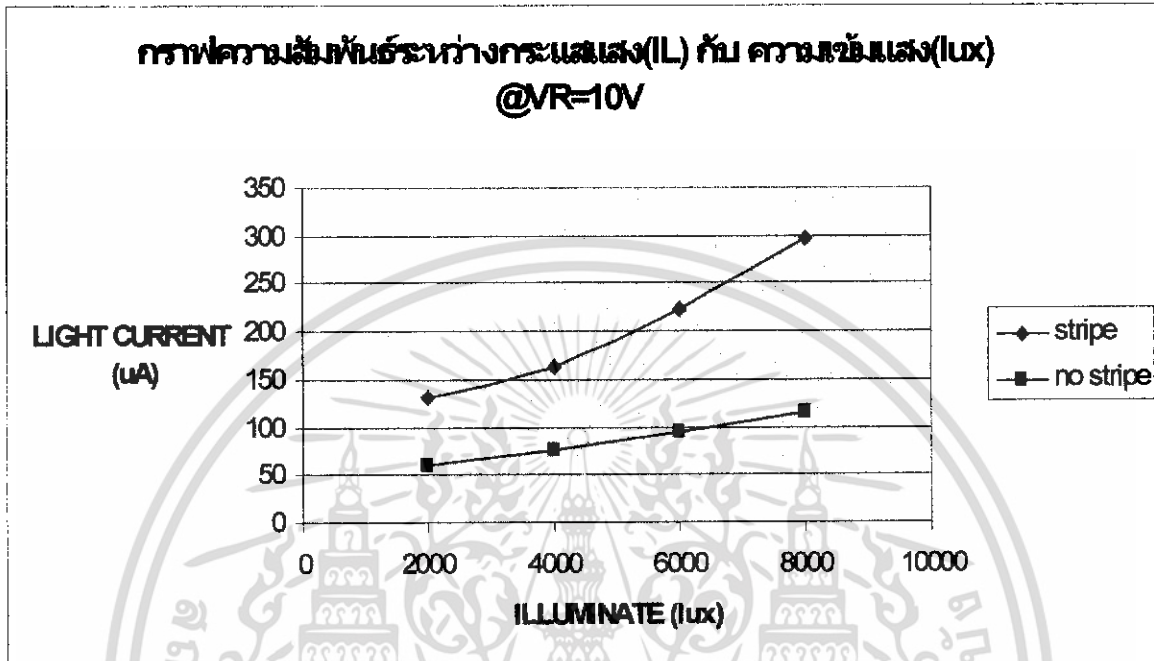


รูปที่ 4.4 ผลของความเข้มแสงที่มีต่อกระแสแสง (I_{LIGHT})

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าค่าของ I_{LIGHT} จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น เนื่องจากที่ความเข้มแสงมากขึ้นจะทำให้มีจำนวนโฟตอนตกลงบน active area มากขึ้นจึงเป็นผลทำให้กระแสแสงเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

4.1.4 ศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อกระแสแสง (I_{LIGHT})

เราจะทำการเปรียบเทียบกระแสแสงระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe กับซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา

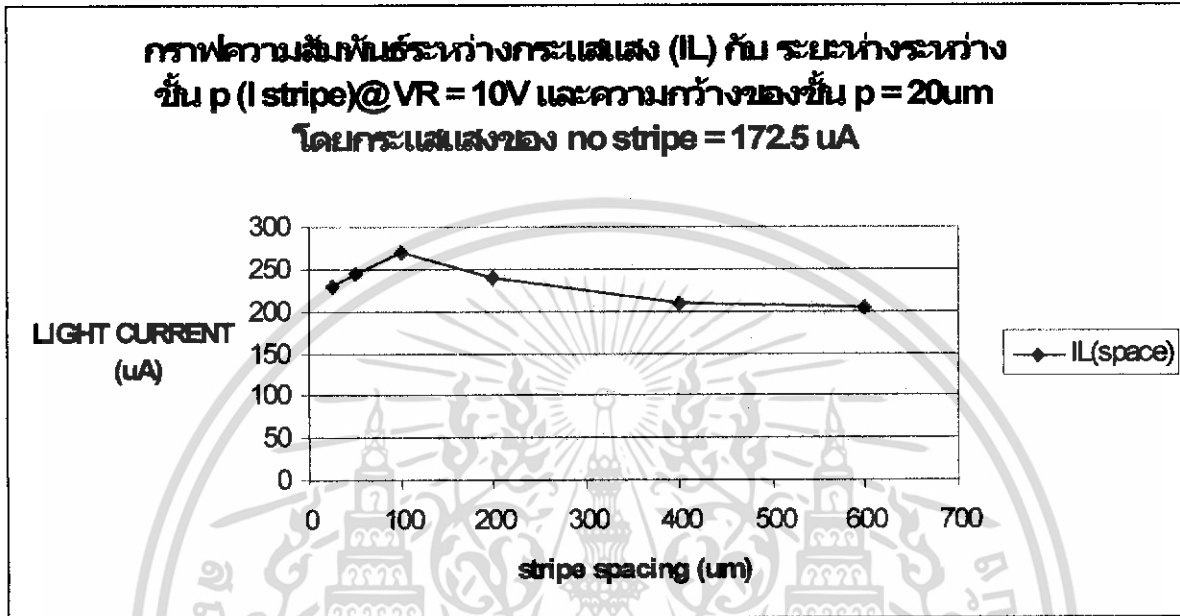


รูปที่ 4.5 ผลของ stripe ที่มีต่อกระแสแสง (I_{LIGHT})

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.5 จะเห็นว่าค่าของ I_{LIGHT} ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe จะมีค่ามากกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา เนื่องจากซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe นั้นมีบางส่วนของ i stripe ที่ได้รับแสงหรือทำหน้าที่เป็น active area โดยตรงซึ่งจะทำให้สามารถ generate ได้ I_{LIGHT} มากขึ้นนั่นเอง

4.1.5 ศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างชนิดของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่มี ความกว้างของ i stripe ที่แตกต่างกัน โดยมีความกว้างของ i stripe ตั้งแต่ 25, 50, 100, 200, 400, 600 μm และ ไม่มี stripe โดยทำการกำหนดให้มีจำนวน stripe คงที่

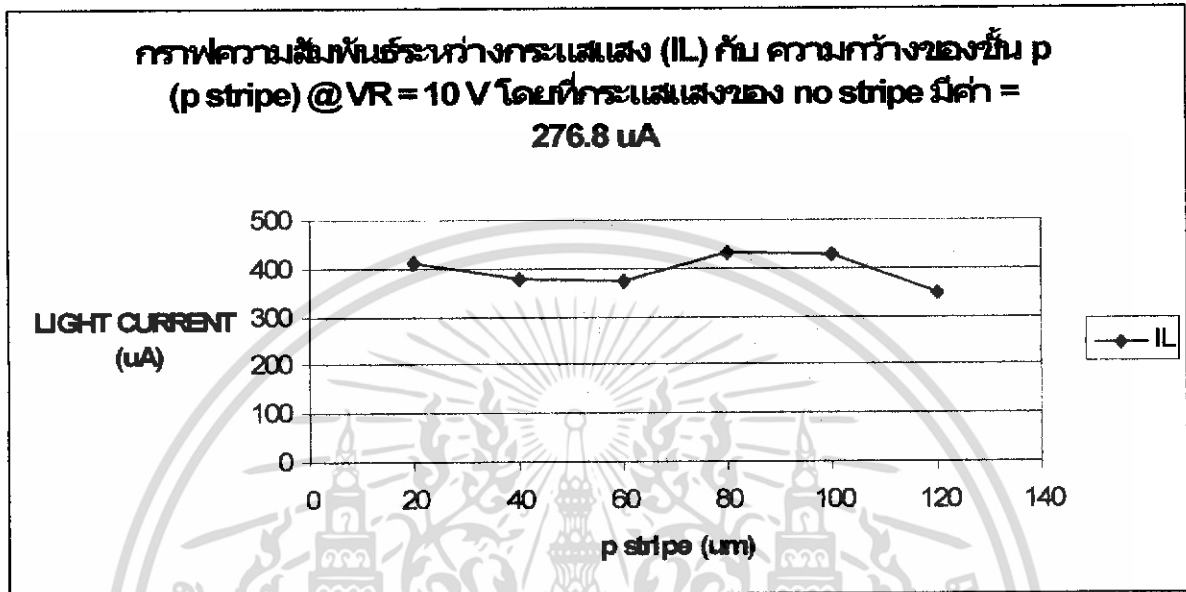


รูปที่ 4.6 ผลของระยะห่างระหว่าง p stripe ที่มีต่อกระแสแสง (I_{LIGHT})

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าของ I_{LIGHT} ของชนิดของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe จะมีค่ามากที่สุดที่ระยะห่างระหว่าง p stripe มีค่าเท่ากับ 100 μm ทั้งนี้เนื่องจากที่ ระยะห่างระหว่าง p stripe มีค่าเท่ากับ 100 μm เป็นระยะห่างที่เหมาะสมที่สุด นั่นจึงทำให้ได้ ค่ากระแสแสงสูงที่สุดนั่นเอง

4.1.6 ศึกษาผลของความกว้างของ p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่มี ความกว้างของ p stripe ที่แตกต่างกัน โดยมีความกว้างของ p stripe ตั้งแต่ 20, 40, 60, 80, 100, 120 μm และ ไม่มี stripe

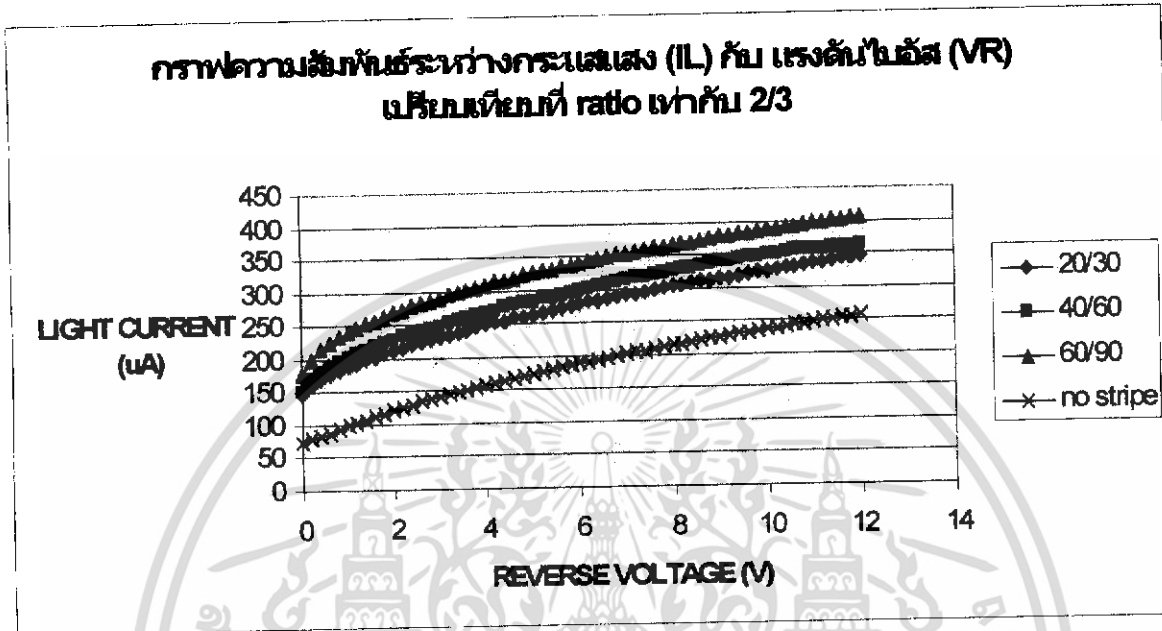


รูปที่ 4.7 ผลของความกว้างของ p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})

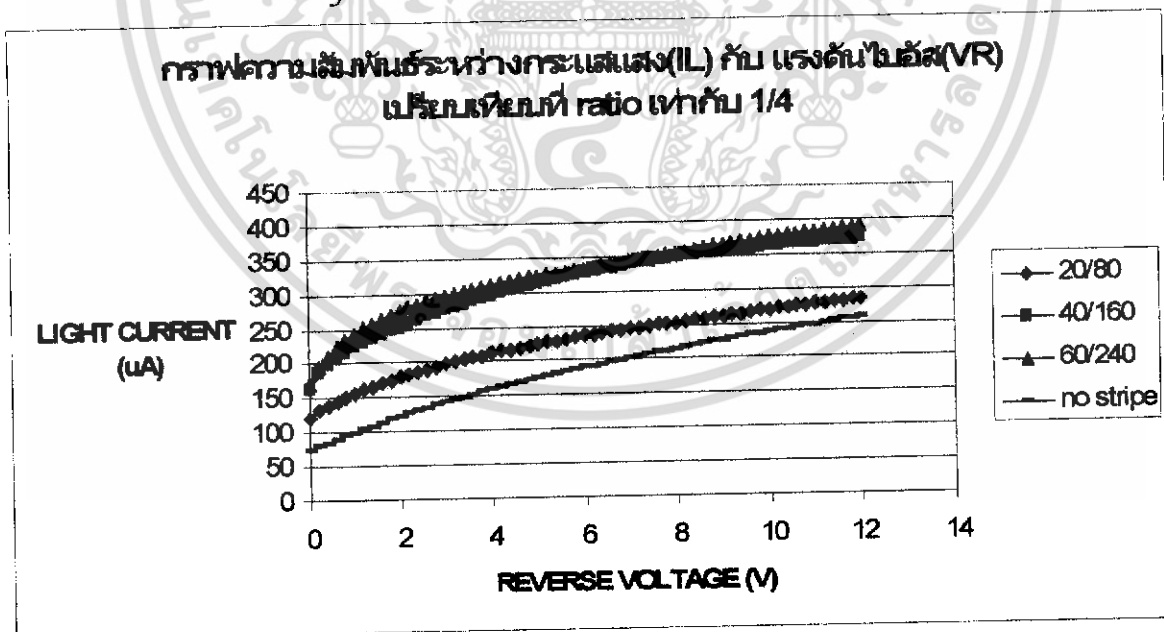
จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าค่าของ I_{LIGHT} ของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe จะมีค่ามากที่สุดที่ความกว้างของ p stripe มีค่าเท่ากับ 80 μm ทั้งนี้เนื่องจากที่ความกว้างของ p stripe มีค่าเท่ากับ 80 μm เป็นระยะห่างที่เหมาะสมที่สุด นั่นจึงทำให้ได้ค่ากระแสแสงสูงที่สุดนั่นเอง

4.1.7.1 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe เท่ากัน โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 20, 40, 60 μm ตามลำดับ



รูปที่ 4.8 ผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดยมีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 20, 40, 60 μm ตามลำดับ



รูปที่ 4.9 ผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดยมี

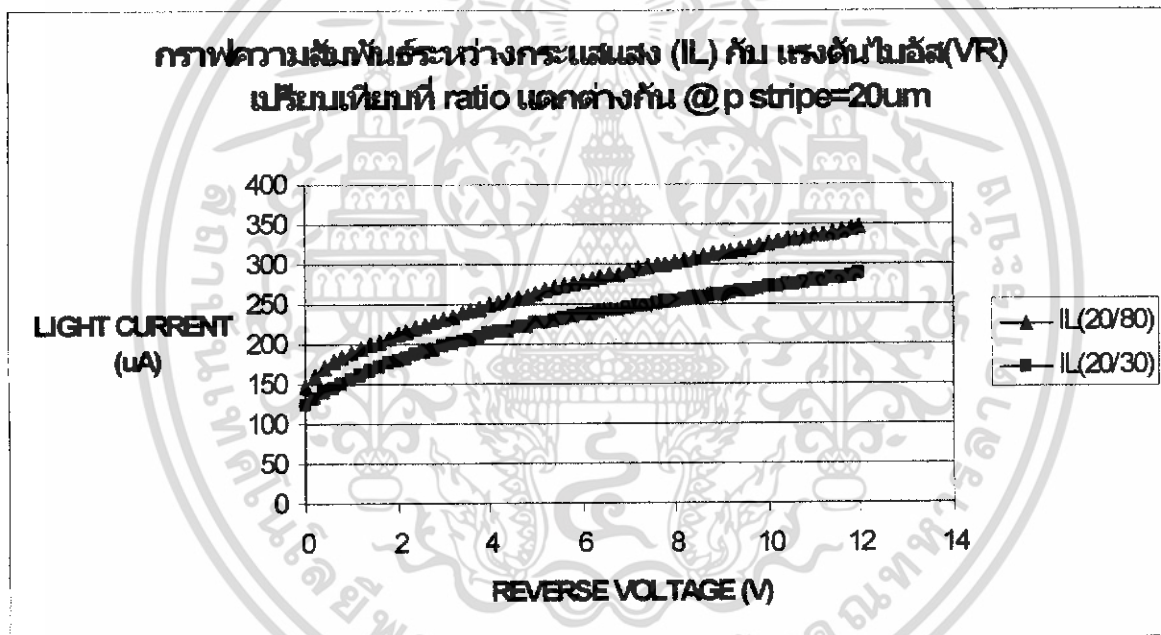
อัตราส่วนเป็น $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 20, 40, 60 μm ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.8 และ 4.9 จะเห็นว่าค่าของ I_{LIGHT} ของ ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่อัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe ที่เท่ากันนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากความกว้างของชั้น i ที่เพิ่มขึ้นที่อัตราส่วนเดียวกันนั้นจะทำให้พื้นที่ของบริเวณ active area ของชั้น i มีมากขึ้น จึงทำให้ที่ความกว้างของชั้น i ที่เพิ่มขึ้นมีค่าของ I_{LIGHT} มากกว่านั่นเอง

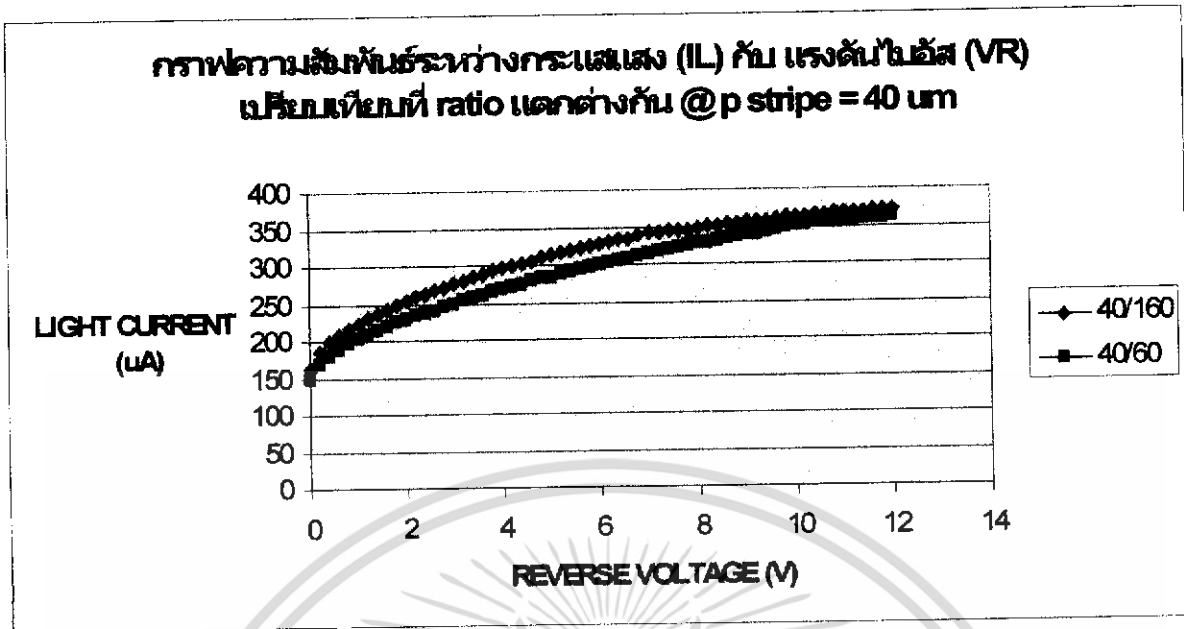
4.1.7.2 ศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT})

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่มีอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ที่เท่ากันแต่อัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe แตกต่างกัน โดยเปรียบเทียบที่อัตราส่วนระหว่าง $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ ตามลำดับ



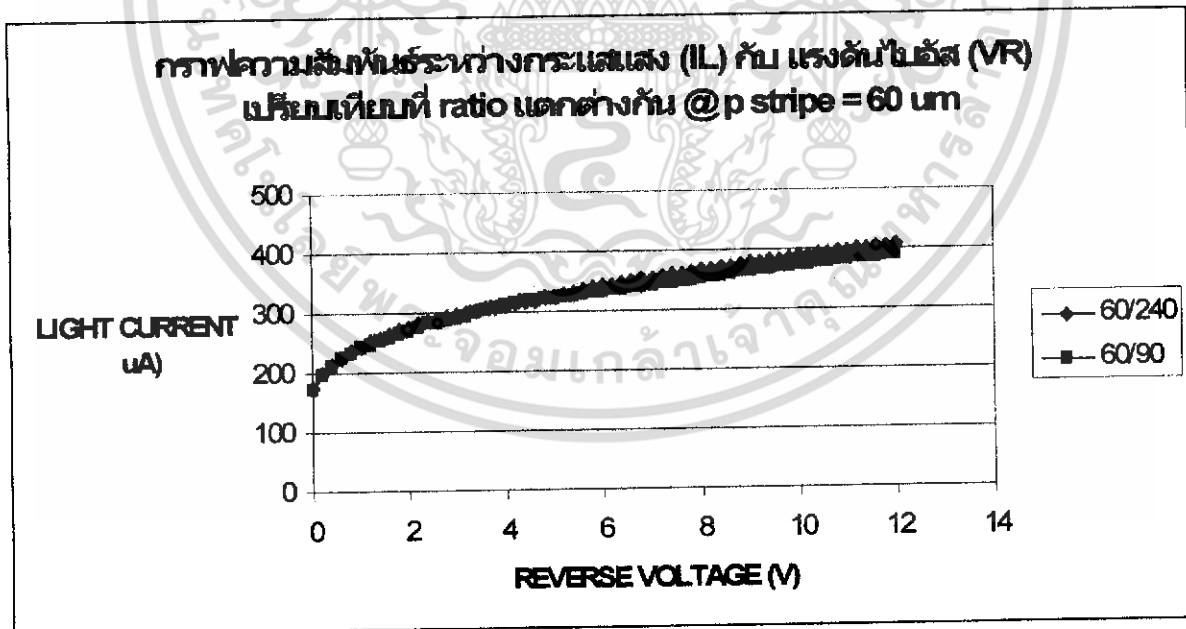
รูปที่ 4.10 ผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดย

มีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 20 μm



รูปที่ 4.11 ผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดย

มีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 40 μm



รูปที่ 4.12 ผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) โดย

มีอัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ ที่ความกว้างของชั้น p เป็น 60 μm

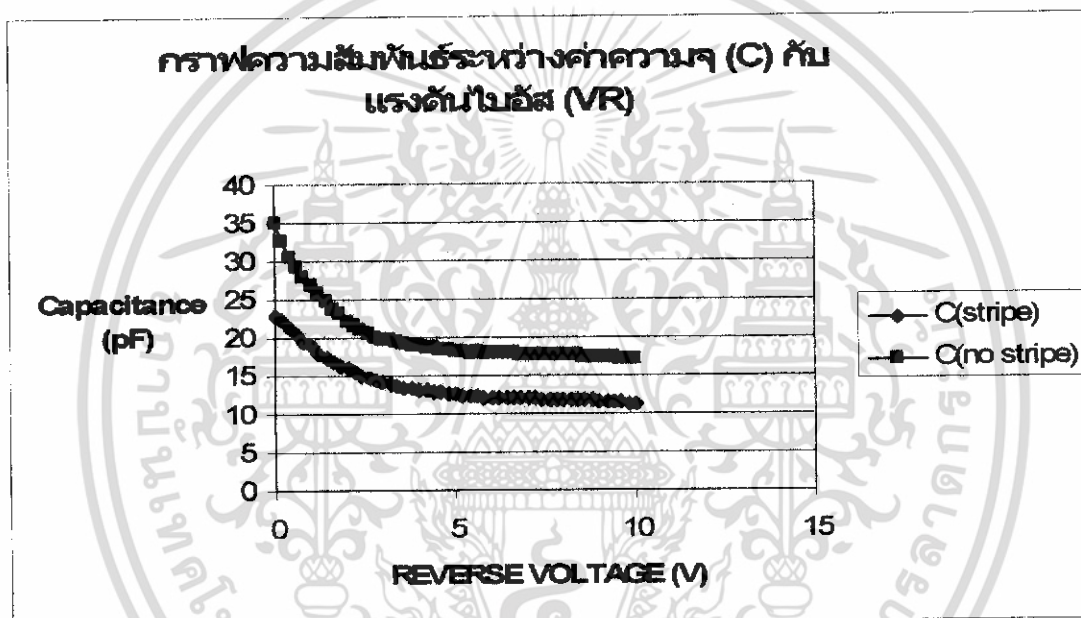
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.10, 4.11 และ 4.12 จะเห็นว่าค่าของ I_{LIGHT} ของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ที่มีความกว้างของ p stripe ที่เท่ากันนั้นจะมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากความกว้างของชั้น i ไม่เท่ากันจึงทำให้ได้ I_{LIGHT} ที่ไม่เท่ากันนั่นเอง

4.2 การทดสอบหาคุณสมบัติของความจุไฟฟ้าและแรงดันของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe

4.2.1 ศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อความจุไฟฟ้า (Capacitance)

เราจะทำการเปรียบเทียบระหว่างซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe กับซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา



รูปที่ 4.13 ผลของ stripe ต่อค่าความจุ (Capacitance)

จากการสังเกตกราฟรูปที่ 4.13 จะเห็นว่าค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive) ของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe มีค่ามากกว่าซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา เนื่องจากซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe นั้นมี active area ของชั้น p น้อยกว่าของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดานั่นเอง ซึ่งค่าความจุไฟฟ้า (Capacitive) สามารถหาได้จากสูตร

$$C = \frac{\epsilon A}{W}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ซึ่งในส่วนแรกเป็นการศึกษาคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ในส่วนของผลการศึกษาค้นคว้าผลของ stripe ที่มีต่อกระแสมืด (I_{DARK}) เนื่องจาก stripe เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอด ดังนั้นเพื่อการศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อกระแสมืด (I_{DARK}) ทำได้โดยการสร้าง โฟโตไดโอดที่มี stripe และทำการเปรียบเทียบกับ โฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe พบว่า โฟโตไดโอดที่มี stripe จะมีค่ากระแสมืด (I_{DARK}) ประมาณ $130 \mu A$ และ โฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe จะมีค่ากระแสมืด (I_{DARK}) ประมาณ $180 \mu A$ ทั้งนี้เนื่องมาจากซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe ซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe มีพื้นที่ active area ของชั้น p น้อยกว่าซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา จึงทำให้ค่าของกระแสมืด (I_{DARK}) มีค่าน้อยกว่านั่นเอง

ในส่วนของผลการศึกษาค้นคว้าผลของความกว้างของ p stripe กับกระแสมืด (I_{DARK}) เพื่อศึกษาผลของความกว้างของ p stripe กับกระแสมืด (I_{DARK}) ทำได้โดยการสร้าง โฟโตไดโอดที่มี stripe โดย p stripe มีความกว้าง 20, 40, 60, 80, 100, 120 μm และ โฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe เพื่อทำการเปรียบเทียบ พบว่าจะได้กระแสมืด (I_{DARK}) เป็น 75.2, 78, 81.4, 82.7, 86.2, 95.5, $180 \mu A$ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความกว้างของ p stripe เพิ่มขึ้นจะทำให้ความกว้างของบริเวณ active area มีค่าเพิ่มขึ้นจึงทำให้มีค่ากระแสมืด (I_{DARK}) ลดลง

ในส่วนของการศึกษาค้นคว้าผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อกระแสแสง (I_{LIGHT}) เพื่อการศึกษาผลของความเข้มแสงที่มีผลต่อกระแสแสง (I_{LIGHT}) ทำได้โดยให้แสงที่มีความเข้มแสงแตกต่างกันกับ โฟโตไดโอดซึ่งให้ความเข้มแสงที่ 2000, 4000, 6000, 8000 lux จะได้กระแสแสง (I_{LIGHT}) เป็น 131, 164, 223, 298 μA ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นจะทำให้มีความหนาแน่นของโฟตอนมากขึ้นซึ่งทำให้สามารถ generate ให้คู่ประจุพาหะ electron-hole มากขึ้นทำให้ได้กระแสแสง (I_{LIGHT}) เพิ่มมากขึ้นนั่นเอง

ในส่วนของผลการศึกษาค้นคว้าผลของ stripe ที่มีต่อกระแสแสง (I_{LIGHT}) เพื่อศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อกระแสแสง (I_{LIGHT}) ทำได้โดยสร้าง โฟโตไดโอดที่มี stripe และทำการเปรียบเทียบกับ โฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe พบว่า โฟโตไดโอดที่มี stripe จะมีค่ากระแสแสง (I_{LIGHT}) 298 μA และ โฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe จะมีค่ากระแสแสง (I_{LIGHT}) 114 μA ทั้งนี้เนื่องมาจากซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe นั้นชั้น i บางส่วนจะทำหน้าที่เป็น active area ด้วย จึงทำให้มีโอกาสที่โฟ

ตอนจะผ่านชั้น i ที่บริเวณ active area ได้โดยตรงทำให้ชั้น i สามารถ generate ให้คู่ประจุพาหะ electron-hole ได้มากขึ้น จึงทำให้ได้กระแสแสง (I_{LIGHT}) เพิ่มขึ้นนั่นเอง

ในส่วนของผลการศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) เพื่อศึกษาผลของระยะห่างระหว่าง p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) ทำได้โดยสร้างโฟโตไดโอดที่มี stripe โดยระยะห่างระหว่าง p stripe มีความกว้าง 25, 50, 100, 200, 400, 600 μm และโฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe เพื่อทำการเปรียบเทียบ พบว่าจะได้กระแสแสง (I_{LIGHT}) เป็น 230, 245, 270, 240, 210, 205 μA ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ระยะห่างระหว่าง p stripe ที่เหมาะสมคือ 100 μm จะทำให้ได้ค่ากระแสแสง (I_{LIGHT}) มากที่สุดนั่นเอง

ในส่วนของผลการศึกษาผลของความกว้างของ p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) เพื่อศึกษาผลของความกว้างของ p stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) ทำได้โดยการสร้างโฟโตไดโอดที่มี stripe โดย p stripe มีความกว้าง 20, 40, 60, 80, 100, 120 μm และโฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe เพื่อทำการเปรียบเทียบ พบว่าจะได้กระแสแสง (I_{LIGHT}) เป็น 413, 376, 374, 434, 428, 347, 276 μA ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากที่ความกว้างของชั้น p ที่เหมาะสมคือ 80 μm จะทำให้ได้ระยะห่างระหว่างชั้น p ที่เหมาะสมด้วยคือ 80 μm จึงทำให้ได้ค่ากระแสแสง (I_{LIGHT}) มากที่สุดนั่นเอง

ในส่วนของผลการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) เพื่อศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe กับกระแสแสง (I_{LIGHT}) ทำได้โดยการสร้างโฟโตไดโอดที่มีอัตราส่วนระหว่าง p และ i stripe เป็นอัตราส่วนที่เท่ากันโดยให้อัตราส่วนเป็น $\frac{2}{3}$ และ $\frac{1}{4}$ โดยให้ p stripe มีความกว้างเป็น 20, 40, 60 μm ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองเราจะเห็นว่าอัตราส่วนระหว่างความกว้างของ p stripe ต่อ i stripe ที่เท่ากันนั้นจะมีกระแสแสง (I_{LIGHT}) มากขึ้นเมื่อมีจำนวน stripe น้อยลง

ในส่วนของผลการศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อความจุไฟฟ้า (Capacitance) เพื่อศึกษาผลของ stripe ที่มีต่อความจุไฟฟ้า (Capacitance) ทำได้โดยการสร้างโฟโตไดโอดที่มี stripe และทำการเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe พบว่าโฟโตไดโอดที่มี stripe นั้นจะมีค่าความจุไฟฟ้า (Capacitance) ที่ต่ำกว่าโฟโตไดโอดที่ไม่มี stripe ทั้งนี้เนื่องมาจาก active area ของโฟโตไดโอดที่มี stripe มี active area ของชั้น p น้อยลงจึงทำให้ได้ค่าความจุไฟฟ้าน้อยลงหรือทำให้ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิด Multistripe สามารถทำงานได้เร็วกว่าซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ชนิดธรรมดา

บรรณานุกรม

รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์,” แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542

รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, “อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ,” แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์

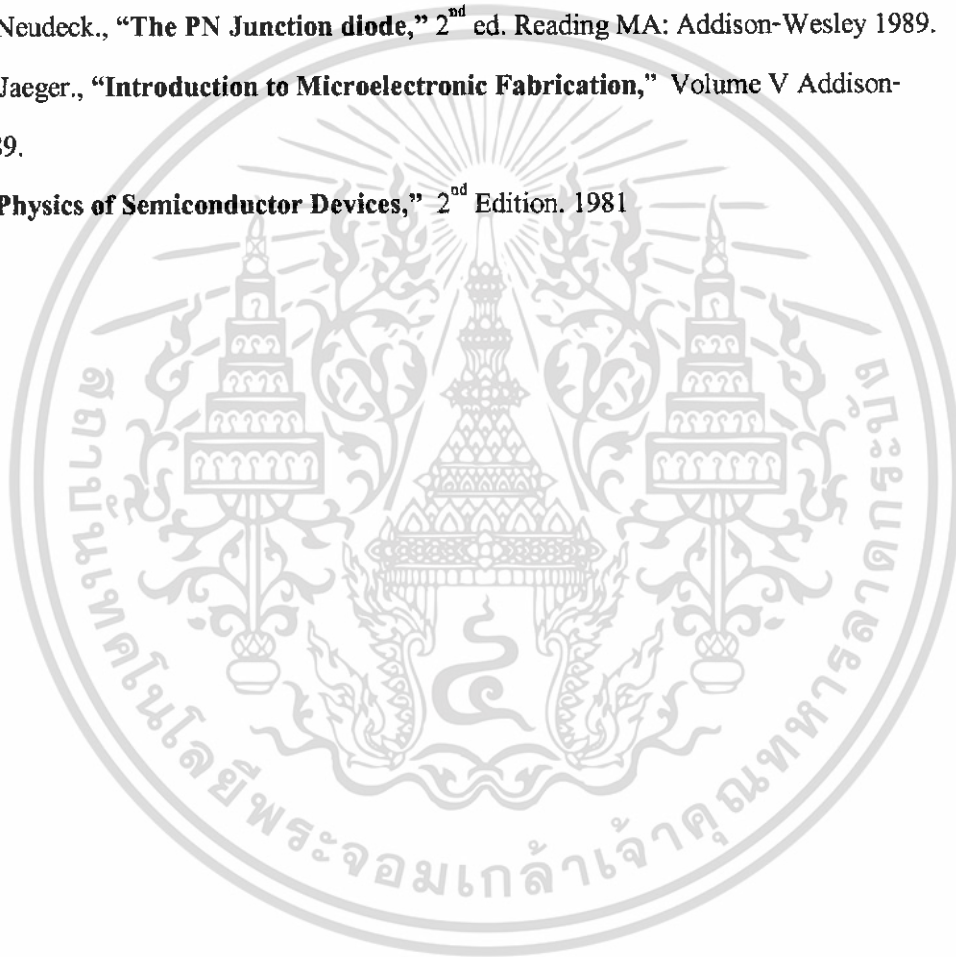
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545

Desmarais Louis, “**Applied Electro-optics,**” Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR. 1998.

Gerold W. Neudeck., “**The PN Junction diode,**” 2nd ed. Reading MA: Addison-Wesley 1989.

Richard C. Jaeger., “**Introduction to Microelectronic Fabrication,**” Volume V Addison-Wesley 1989.

Sze, “**S.M.Physics of Semiconductor Devices,**” 2nd Edition. 1981



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้