

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาผลของการ์ดริงในซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง

Study on Effect of Guard Ring of Vertical Silicon p-i-n Photodiode



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลของการ์ดริงในซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง
Study on Effect of Guard Ring of Vertical Silicon p-i-n Photodiode



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาานิพนธ์ ปีการศึกษา 2549

ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง

หัวข้อปริญญาานิพนธ์ การศึกษาผลของการดริ้งในซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง

Study on Role of Guard Ring of Vertical Silicon p-i-n Photodiode

นักศึกษาผู้จัดทำ

1. นายศรารุช เจ๊ะเซ็น รหัส 47015222

2. นายศุภชัย ชายเพชร รหัส 47015223

ปริญญาานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(รศ. ดร. สมเกียรติ สุภเดช)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาผลของการ์ดริงในซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง

นายศราวุธ เจ๊ะเซ็น รหัส 47015222

นายศุภชัย ชายเพชร รหัส 47015223

รศ.ดร. สมเกียรติ สุภเดช อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2549

บทคัดย่อ

การสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีผลการตอบสนองทางแสงสูงนั้น กระแสมีคเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณา ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพสูงต้องมีกระแสมีคต่ำ โดยกระแสมีคของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง เกิดขึ้นในเนื้อสารและกระแสบริเวณผิวสัมผัสของตัวอุปกรณ์ ซึ่งวิธีหนึ่งที่ใช้ควบคุมกระแสบริเวณดังกล่าว คือการสร้างการ์ดริงล้อมรอบ ในรายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาผลของการ์ดริงในซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง โดยการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการ์ดริง เช่น ลักษณะ ขนาด และตำแหน่งของการ์ดริงเพื่อลดกระแสมีคของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง

Study on Role of Guard Ring of Vertical Silicon p-i-n Photodiode

Mr. Sarawut Jesen ID. 47015222

Mr. Supachai Chaiphath ID. 47015223

Assoc. Prof. Dr. Somkiat Supadech Advisor

Educational Years 2006

Abstract

Dark current is the important parameter in producing silicon p-i-n photodiode such that the photo response. The high efficient silicon photodiode must have low dark current. The dark current of vertical silicon p-i-n photodiode will be in the bulk and leakage current at the interface of device. The result of guard ring to increase the ability of vertical silicon p-i-n photodiode will be discussed in this report by finding size, characteristic and position are proper condition in order to reduce the dark current of vertical silicon p-i-n photodiode.

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ประสบความสำเร็จไปได้ด้วยดีนั้นนั้นทางคณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาคือ อาจารย์สมเกียรติ ศุภเดช ที่ได้ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการทำปริญญาานิพนธ์ ตลอดจนคณาจารย์ทุกท่านที่ได้ให้ความรู้กับทางคณะผู้จัดทำทั้งอดีตและปัจจุบันรวมทั้งที่นักศึกษาปริญญาโทผู้ให้คำปรึกษาและคำแนะนำในการทำปริญญาานิพนธ์ตลอดมา

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณพ่อ คุณแม่ผู้ที่เป็นแรงบันดาลใจอันสำคัญยิ่งรวมถึงกำลังใจที่ได้รับเสมอมาจากคุณพ่อ คุณแม่ อีกทั้งญาติพี่น้องของทางคณะผู้จัดทำ ทำให้คณะผู้จัดทำมีความมานะพากเพียรทำปริญญาานิพนธ์ฉบับนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คณะผู้จัดทำขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ. ที่นี้

คณะผู้จัดทำ

นายศราวุธ

เจ๊ะเซิน

นายศุภชัย

ชวยเพชร

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
Abstract	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	V
สารบัญกราฟ	VI
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของโครงการ	1
1.2 วัตถุประสงค์และขอบเขตของงานวิจัย	2
บทที่ 2 ทฤษฎี	3
2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง	3
2.1.1 ประเภทของตัวตรวจวัดแสง	3
2.1.2 สารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง	3
2.1.3 คุณสมบัติของคลื่นแสง	4
2.1.4 คุณสมบัติในการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน	6
2.1.5 อุปกรณ์โฟโตไดโอด	7
2.1.6 กระแสรั่วของโฟโตไดโอด	7
2.2 สารกึ่งตัวนำ	8
2.2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำ	9
2.2.2 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ	9
2.2.3 อะตอมสารเจือ (Impurity atoms)	10
2.2.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้การสร้างโฟโตไดโอด	12
2.3 รอยต่อ พี-เอ็น	14
2.3.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล	14
2.3.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับไบอัสตรง	18
2.3.3 รอยต่อพีเอ็นในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ	19

2.4	โฟโตไดโอด	21
2.4.1	ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	21
2.4.2	ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n	24
2.4.3	กระแสมืด	27
2.4.4	ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีกั้วตรง	29
บทที่ 3	การออกแบบและกระบวนการสร้าง	31
3.1	การสร้างกระจกต้นแบบ	31
3.2	กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีกั้วตรง	34
3.2.1	แผ่นผลึกที่ใช้สร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	34
3.2.2	การทำความสะอาดผิวซิลิคอน	35
3.2.3	การออกซิเดชัน	35
3.2.4	การเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)	38
3.2.5	การฉายแสง (Exposure)	39
3.2.6	การแพร่สารเจือ (Diffusion)	39
3.2.7	กระบวนการเมทัลไลเซชัน	40
3.2.8	กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)	40
3.2.9	กระบวนการสร้าง Si Photodiode แบบ p-i-n	41
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	50
4.1	การทดลองหาคุณสมบัติพื้นฐานของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีกั้วตรง	50
4.2	การทดลองหาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีกั้วตรง เงื่อนไขต่างๆ	52
บทที่ 5	สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง	57

สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 1.1 โครงสร้างซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์คริง	2
รูปที่ 2.1 ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด	4
รูปที่ 2.2 การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงในสารกึ่งตัวนำ	5
รูปที่ 2.3 สัญลักษณ์ของโฟโตไดโอด	7
รูปที่ 2.4 แสดงภาพสองมิติของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิก	9
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของอะตอมสารเจือชนิดพี (Boron) และเอ็น (Antimony)	10
รูปที่ 2.6 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดเอ็น (ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ 0 K	11
รูปที่ 2.7 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดพี (ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ 0 K	11
รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะกราฟความสัมพันธ์ E – k ของสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบช่องตรง (ข) แบบช่องไม่ตรง	12
รูปที่ 2.9 โครงสร้างรอยต่อ พี-เอ็น	14
รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลดพาหะ สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและศักดาไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับของ p-n	16
รูปที่ 2.11 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงาน ในภาวะสมดุล	17
รูปที่ 2.12 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น	18
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง	19
รูปที่ 2.14 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ	20
รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น	21
รูปที่ 2.16 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด (ก) การให้ไบอัสแก่โฟโตไดโอดและ (ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง	22
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้น	23
รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n	24
รูปที่ 2.19 แสดงภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n	24

รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าภายในบริเวณรอยต่อและศักย์ไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับของ p-i-n	25
รูปที่ 2.21 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอดแบบ p-i-n	26
(ก) การให้ไบอัสแก่ไดโอดและ	
(ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง	
รูปที่ 2.22 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์ดริง	28
รูปที่ 2.23 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์ดริง	29
รูปที่ 2.24 แสดงการวัดกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์ดริง	29
รูปที่ 3.1 ลักษณะมาสก์ที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ	32
รูปที่ 3.2 ลักษณะมาสก์ที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ	32
รูปที่ 3.3 ลักษณะมาสก์ที่ 3 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม	33
รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง	36
รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ	36
รูปที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไอน้ำอิ่มตัว	37
รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ	38
รูปที่ 3.8 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์ดริง	47
รูปที่ 4.1 วิธีการวัดหาคุณสมบัติกระแสของ p-i-n โฟโตไดโอดที่มีอาร์ดริง	50

VI

สารบัญกราฟ

กราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของ โฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีการ์ดริง	51
กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสย้อนกลับกับกระแสมืด	51
กราฟที่ 3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสย้อนกลับกับกระแสแสง	52
กราฟที่ 4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสแสงของ โฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่ทำการไบอัสการ์ดริงที่ความเข้มต่างๆ (LX)	52
กราฟที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืด กับความเข้มแสงต่างๆ (LX) ของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n	53
กราฟที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับการ์ดริง	53
กราฟที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดกับระยะห่างระหว่าง พื้นที่รับแสงกับการ์ดริง	54
กราฟที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะความกว้างของการ์ดริง	55
กราฟที่ 9 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดกับระยะความกว้าง ของการ์ดริง	55
กราฟที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับจำนวนการ์ดริง	56
กราฟที่ 11 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดกับจำนวนการ์ดริง	56

บทที่ 1

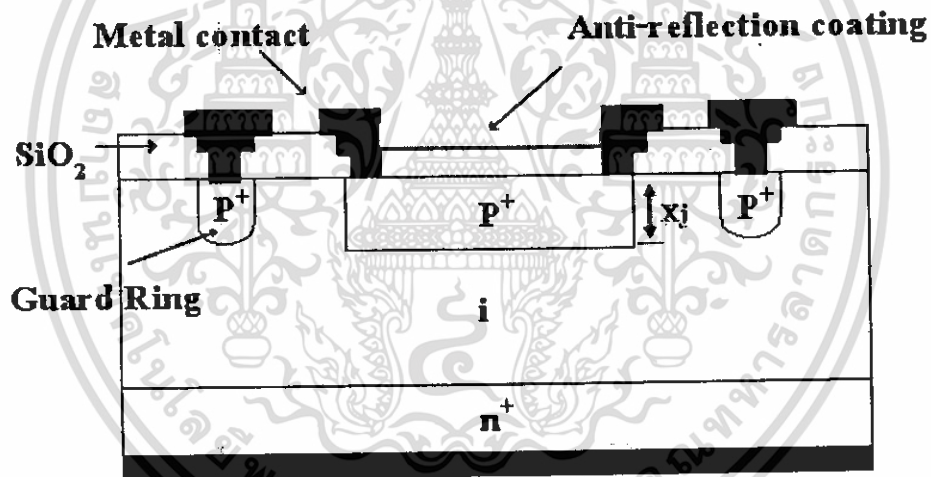
บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำพื้นฐานที่มีความสำคัญและมีบทบาทในงานไฟฟ้าอิเล็กทรอนิกส์อย่างสูง โดยถูกนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างกว้างขวาง สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง (Optical Semiconductor devices) เป็นกลุ่มหนึ่งที่มีบทบาทและถูกนำไปใช้งานซึ่งเกี่ยวกับแสง งานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงเป็นงานที่ได้รับการพัฒนาและก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทั้งถูกนำมาใช้ประโยชน์ในทุกๆด้านอย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะในระบบการสื่อสารยุคใหม่ ซึ่งเป็นการสื่อสารด้วยคลื่นแสง (Opto-communication system) การสื่อสารระบบนี้มีประสิทธิภาพสูงกว่าทั้งความเร็ว ความแม่นยำ เทียบตรงและประหยัดเมื่อเทียบกับระบบเดิม ดังนั้นความรู้เกี่ยวกับคุณสมบัติและการทำงานของสิ่งประดิษฐ์ทางแสงจึงจำเป็นอย่างยิ่ง

ในรายฉบับนี้จะกล่าวถึงโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ซึ่งเป็นโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสง และอัตราเร็วในการทำงานสูงกว่าโฟโตไดโอดแบบธรรมดา มีลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำ 3 ส่วน หรือสามชั้นประกอบด้วย สารกึ่งตัวนำชนิด p+ ส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิด i (intrinsic) และส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิด n+ แต่มีมีขั้วไฟฟ้าเพียง 2 ขั้ว คือขั้วของส่วน p+ เป็นแอโนด และขั้วของส่วน n+ เป็นขั้วแคโทด ในทางปฏิบัติชั้นสารชนิด i มักถูกเติมอะตอมสารเจืออย่างเจือจางเพื่อทำให้มีสภาพความต้านทานสูงคล้ายกับสารอินทรีนซิก ชั้นของ สารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนและเป็นด้านที่รับแสงจะถูกสร้างขึ้นมาให้มีขนาดบางมาก เพื่อให้โฟตอนในลำแสงสามารถทะลุลงไปถึงชั้น i และที่ชั้น i จะมีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมด จึงสามารถทำงานได้รวดเร็วขึ้นหรือมีผลตอบสนองทางด้านเวลาที่รวดเร็ว ด้วยเหตุนี้จึงมีการนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นอุปกรณ์รับแสงเพื่อตรวจวัดการเปลี่ยนแปลงของแสง ใช้ในการสื่อสารด้วยเส้นใยแสง ใช้ในระบบการสื่อสารด้วยแสงเลเซอร์ เป็นต้น นอกจากนี้สารกึ่งตัวนำที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงคือ แกลเลียมอาเซไนด์เพราะว่ามีคุณสมบัติที่ดีคือ มีแถบพลังงานแบบช่องตรง (Direct Band Gap) ซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนที่แถบพลังงานเป็นแบบช่องไม่ตรง (Indirect Band Gap) พลังงานแสงที่ต้องการจะให้เกิดอิเล็กตรอนอิสระในการนำกระแสของแกลเลียมอาเซไนด์จึงน้อยกว่าของซิลิคอนและการตอบสนองความถี่ก็ดีกว่า แต่ถึงอย่างไรซิลิคอนก็มีข้อดีที่น่าสนใจหลายอย่างเช่น กระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า ราคาที่ถูกกว่าอีกทั้งกระบวนการสร้างวงจรรวมที่ใช้ในปัจจุบันก็ใช้สารกึ่งตัวนำที่เป็นซิลิคอนอีกด้วย

1.1 ความเป็นมาของการทำโครงการ

การสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด PIN ที่มีผลการตอบสนองทางแสงสูงนั้น กระแสมีค เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่จะต้องนำมาพิจารณา ซิลิคอนโฟโตไดโอดที่มีประสิทธิภาพสูงต้องมี กระแสมีคต่ำ โดยกระแสมีคของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง เกิดขึ้นในเนื้อสาร และกระแสรั่วบริเวณผิวสัมผัสของตัวอุปกรณ์ ซึ่งวิธีหนึ่งที่ใช้ควบคุมกระแสรั่วบริเวณดังกล่าว คือ การสร้างการ์ดริงล้อมรอบ ในรายงานฉบับนี้เป็นการศึกษาผลของการ์ดริงในซิลิคอนโฟโตไดโอด ชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง โดยการทดลองหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของการ์ดริง เช่น ลักษณะ ขนาด และ ตำแหน่งของการ์ดริงเพื่อลดกระแสมีคของซิลิคอนโฟโตไดโอดชนิด p-i-n แบบแนวตั้ง



รูปที่ 1.1 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษาการออกแบบโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง
2. ศึกษากระบวนการสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง
3. ศึกษาการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของโฟโตไดโอด โครงแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง ด้วยการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ
4. ศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

2.1 อุปกรณ์ตรวจวัดแสง

ปัจจุบันนี้งานอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว เพื่อตอบรับกับการขยายตัวของระบบสื่อสาร โทรคมนาคม ส่งผลให้อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง หรือ โฟโตดีเทคเตอร์มีการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าที่ดีกว่าเดิม และมีการพัฒนาให้สามารถจัดการข้อมูลทางแสงได้หลายรูปแบบ ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้จึงถูกนำมาใช้งานอย่างแพร่หลายเช่น ในชุดควบคุมการเปิด-ปิดแบบไร้สาย ใช้ตรวจนับจำนวนและตรวจสอบคุณภาพของสินค้าในทางอุตสาหกรรม ใช้เป็นตัวรับสัญญาณทางไกลในระบบสื่อสารความเร็วสูง และใช้ในการตรวจวัดรังสีต่างๆ เป็นต้น

2.1.1 ประเภทของตัวตรวจวัดแสง

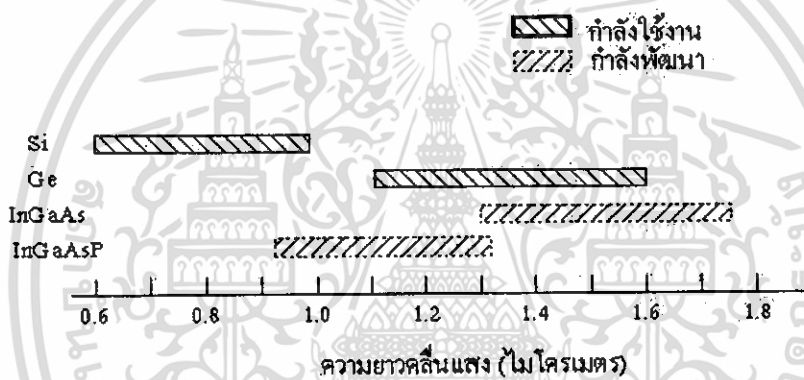
ตัวตรวจวัดแสง(Photo detector) คืออุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งในปัจจุบันนี้มีอยู่ด้วยกันหลายชนิด ซึ่งในแต่ละประเภทนั้นต่างก็มีข้อดี-ข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป โดยขึ้นอยู่กับลักษณะของการใช้งาน ตัวตรวจวัดแสงมีหลายประเภทเช่น

1. โฟโตอิมิชชันดีเทคเตอร์(Photoemission detector)
2. โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor)
3. โฟโตไดโอดชนิดรอยต่อพี-เอ็น(p-n photodiode)
4. โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor photodiode)
5. โฟโตไดโอดชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ(metal-semiconductor-metal photodiode)
6. โฟโตไดโอด ชนิดอะวาแลนซ์ (Avalanche PhotoDiode : APD)
7. โฟโตไดโอดชนิด พี-ไอ-เอ็น (p-i-n photodiode)

2.1.2 สารและโครงสร้างของอุปกรณ์รับแสง

สารที่ใช้สร้างอุปกรณ์รับแสง สำหรับอุปกรณ์รับแสงก็เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสงนั้นมีสารหลายชนิด นอกจากนั้นผลต่างของพลังงานของระดับพลังงานสูง และระดับพลังงานต่ำของอุปกรณ์รับแสงมีค่าแตกต่างกันทำให้มีย่านความยาวคลื่นต่างกันที่ดูดสัญญาณที่เข้ามาได้ง่าย (ความไวในการรับแสง) คุณสมบัติความไวในการรับแสงของสารแต่ละชนิดดังรูปที่2.1 ในการออกแบบระบบการสื่อสาร

ด้วยเส้นใยนำแสงนั้นจะต้องเลือกอุปกรณ์รับแสงที่เหมาะสมกับความยาวคลื่นที่ใช้เช่นเดียวกับอุปกรณ์กำเนิดแสง สำหรับย่านความยาวคลื่นที่ต่ำกว่า 1 ไมโครเมตร จะใช้สารซิลิกอน สำหรับย่านความยาวคลื่น 1 - 1.7 ไมโครเมตร ใช้เจอร์มันเนียมเป็นส่วนใหญ่ นอกจากนั้นในปัจจุบันสำหรับความยาวคลื่นในช่วง 1.55 ไมโครเมตร เป็นความยาวคลื่นมีการสูญเสียในเส้นใยนำแสงน้อยมาก และเป็นความยาวคลื่นที่อยู่ในวินโดว์ที่สาม (Third Window) การใช้งานอุปกรณ์รับแสงชนิดใหม่ที่ทำจากสารที่เป็นสารประกอบของ สารกึ่งตัวนำอินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์และอื่นๆ ซึ่งมีความไวในการรับแสงดีมากนั้น กำลังได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ



รูปที่ 2.1 ความยาวคลื่นในการรับแสงของอุปกรณ์รับแสงแต่ละชนิด

2.1.3 คุณสมบัติของคลื่นแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ที่มีความยาวคลื่นแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (Visible light) ซึ่งมีคลื่นความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400 – 700 nm โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง คลื่น และอนุภาค ปรากฏการณ์ที่แสงแสดงคุณสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห และการแทรกสอด โดยความเร็วของแสงที่เดินทางมีความสัมพันธ์กับความยาวของคลื่นแสงและความถี่ของคลื่นแสงคือ

$$\lambda = c_0 / \nu \quad (2.1)$$

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (m)

c_0 คือ ความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ ($c_0 = 2.99792458 \times 10^8$ m/s)

ν คือ ความถี่ของคลื่นแสง (Hz)

ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีคุณสมบัติเป็นอนุภาคอีกด้วย โดยที่อนุภาคของแสงถูกเรียกว่า โฟตอน (Photon) อนุภาคของแสงนี้จะมีพลังงานอยู่ภายในโดยที่พลังงานของโฟตอนนี้จะแปรกับความถี่ของคลื่นแสงคือ

$$E_{\text{photon}} = h\nu = hc / \lambda = 1.24 / \lambda (\mu\text{m}) \quad (2.2)$$

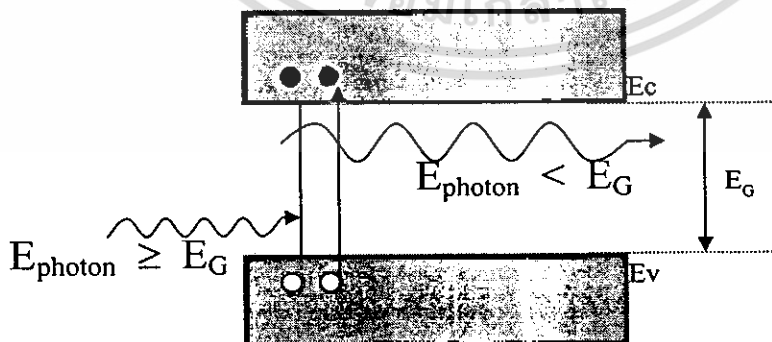
E_{photon} คือ พลังงานของโฟตอน (ev)

h คือ ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.626×10^{-34} J-sec

c คือ ความเร็วแสง = 3×10^8 m/s

ν และ λ คือ ความถี่และความยาวคลื่นของแสงตามลำดับ

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_G) ของสารกึ่งตัวนำหรือ $E_{\text{photon}} \geq E_{G(\text{semi})}$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสงทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสงแต่ในกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_{G(\text{semi})}$ การดูดกลืนจะไม่เกิดขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 การดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงในสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.4 คุณสมบัติในการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน

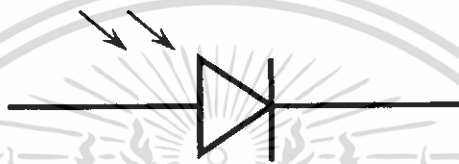
ในการที่เราจะทำการเลือกอุปกรณ์รับแสงมาใช้งาน จะต้องพิจารณาคุณสมบัติต่างๆ เพื่อให้ได้คุณสมบัติที่สมบูรณ์และ มีความคุ้มค่ากับสิ่งที่เราทำการลงทุนไปควรจะมีหลักการพิจารณาดังต่อไปนี้

1. มีความไวสูงในช่วงความยาวคลื่นที่ใช้งาน ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องสร้างให้สามารถตอบสนองต่อความยาวคลื่นดังกล่าวได้ดีโดยการเลือกใช้สารที่เหมาะสม
2. ความสามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสงได้มาก ความสามารถในการสร้างสัญญาณไฟฟ้าจากสัญญาณแสง จะขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพทางควอนตัมของสารที่ใช้สร้าง โดยทั่วไป ประสิทธิภาพทางควอนตัมจะถูกกำหนดโดยสัมประสิทธิ์ การดูดกลืน(Absorption Coefficient) ของสารนั้นค่าดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นคือสารแต่ละชนิดจะมีค่าดูดกลืนที่ความยาวคลื่นต่างๆไม่เท่ากัน
3. มีความไวสูงในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุต เพื่อให้เหมาะสมกับแบนด์วิดท์ เนื่องจากในปัจจุบันแบนด์วิดท์ในการส่งสัญญาณโดยใช้เส้นใยนำแสงจะมีค่าตั้งแต่หลายร้อยเมกะเฮิรตซ์ ดังนั้นอุปกรณ์รับแสงจะต้องมีความไวในการตอบสนองต่อสัญญาณอินพุตสูงเพื่อให้สามารถทำงานได้ทันกับสัญญาณอินพุตที่ได้รับ
4. สัญญาณรบกวนต่ออุปกรณ์แสงจะต้องมีค่าต่ำ สัญญาณรบกวนที่สำคัญได้แก่ สัญญาณรบกวนควอนตัม (Quantum Noise) เกิดขึ้นเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงกระแสโฟโต โดยการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดจากแสงที่มาตกกระทบในบางช่วงเป็นแสงที่ไม่มีเฟสเดียวกัน หรือมีหลายความยาวคลื่นทำให้อิเล็กทรอนิกส์ได้รับพลังงานไม่เท่ากัน จึงทำให้จำนวนอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นแตกต่างกัน ดังนั้นปริมาณกระแสโฟโต จึงเกิดการเปลี่ยนแปลงตามไปด้วย สัญญาณรบกวนควอนตัมนี้จะแปรผันโดยตรงกับแรงดันไฟฟ้าที่ไบอัสกลับ
5. มีขนาดเล็กเพื่อให้สามารถนำอุปกรณ์ดังกล่าวมาใช้งานได้สะดวก และเชื่อมต่อกับเส้นใยนำแสงซึ่งมีขนาดเล็กได้ง่าย
6. ใช้แรงดันไบอัสต่ำเพื่อประหยัดพลังงานไฟฟ้า
7. มีความเชื่อถือได้สูง อุปกรณ์รับแสงจะต้องสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง และต่อเนื่องเป็นเวลาหลายปี
8. มีราคาต่ำ เนื่องจากในการออกแบบระบบ ปัจจัยทางการเงินมักจะเป็นสิ่งสำคัญที่ใช้ในการออกแบบด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.5 อุปกรณ์โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดเป็นไดโอดที่จะทำงานเมื่อมีแสงมาตกกระทบ สัญลัักษณ์ของโฟโตไดโอดแสดงดังรูปที่ 1 ในสถานะที่การนำโฟโตไดโอดไปต่อใช้งานต้องต่อในลักษณะไบแอสกลับคือ ต่อแอโนดเข้ากับไฟลบ แคโทดเข้ากับไฟบวก จนเมื่อมีแสงมาตกกระทบจึงสามารถนำกระแสได้ แต่อย่างไรก็ตามในขณะที่ไม่มีแสงมาตกกระทบก็จะมีกระแสรั่วไหลอยู่ค่าหนึ่ง เมื่อมีแสงมาตกกระทบกระแสจะไหลเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.3 สัญลัักษณ์ของโฟโตไดโอด

ข้อดีของโฟโตไดโอด

- ทำงานเป็นเชิงเส้น
- ทำงานเร็วมาก
- ขนาดเล็ก
- สามารถประยุกต์ใช้งานได้กว้าง

2.1.6 กระแสรั่วของโฟโตไดโอด

ในขณะที่แสงไม่ไม่มีแสงจะมีกระแสรั่วไหลอยู่ กระแสรั่วเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่มีความสำคัญ โดยจัดว่าเป็นสัญญาณรบกวนชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการ ไอออไนซ์ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำเนื่องมาจากความร้อน และกระแสรั่วเป็นพารามิเตอร์ตัวหนึ่งที่บ่งบอกถึงความสามารถในการตรวจวัดสัญญาณ ซึ่งสัญญาณที่รับนั้นควรมีค่ามากกว่าพอที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสรั่ว เพราะหากว่าสัญญาณที่โฟโตไดโอดตรวจจับได้มีน้อยกว่ากระแสรั่ว กระแสโดยรวมอาจมีค่าใกล้เคียงกับกระแสรั่ว ส่งผลให้ไม่สามารถตรวจจับสัญญาณแสงได้อย่างชัดเจน ดังนั้นเราจึงพยายามที่จะลดกระแสรั่ว ซึ่งจะกล่าวไว้ในรายละเอียดต่อไป

2.2 สารกึ่งตัวนำ

เมื่อวิทยาการไฟฟ้าได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ในสมัยแรกๆ วัสดุไฟฟ้าที่ใช้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆมักได้แก่ ตัวนำไฟฟ้า เช่น สาย ทองแดง โลหะชนิดต่าง ๆ และฉนวนไฟฟ้าเช่น ยาง ลูกถ้วยเซรามิก เมื่อมีการพัฒนาหลอดสุญญากาศขึ้นมาเพื่อทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถขยายสัญญาณไฟฟ้า กำเนิดความถี่ ฯลฯ วัสดุไฟฟ้าก็ยังคงเป็นพวกตัวนำและฉนวนอยู่เช่นเดิม

สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำ และฉนวนมีการค้นพบมานานพร้อมๆ กับวัสดุชนิดอื่น ๆ แต่มิได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจังจนกระทั่งปี พ.ศ. ๒๔๕๐ ซึ่งมีการคิดค้นทรานซิสเตอร์ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก สารกึ่งตัวนำจึงได้รับความสนใจ และมีบทบาทในการพัฒนาวิทยาการด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก เพราะสามารถทำงานทดแทนหลอดสุญญากาศได้เกือบทั้งหมด ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา กินไฟฟ้าน้อย และมีราคาถูก

ปัจจุบันเราจะพบสิ่งประดิษฐ์ ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำจากสารกึ่งตัวนำอยู่ในอุปกรณ์ไฟฟ้าทุกชนิด ที่เราใช้งานในชีวิตประจำวัน เช่น วิทยุ โทรทัศน์ โทรศัพท์ เครื่องซักผ้า เต้าไมโครเวฟ รถยนต์ เครื่องคอมพิวเตอร์ ฯลฯ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำจึงกลายเป็นวัสดุไฟฟ้าที่มีความสำคัญต่อการใช้ชีวิตในโลกยุคปัจจุบันและอนาคต

วัสดุต่างๆที่มีอยู่ในโลกนี้ อาจพิจารณาจัดแบ่งออกเป็นหมู่ใหญ่ๆ ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้าได้เป็น 3 หมู่ คือ

1. วัสดุตัวนำ (Conductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น โลหะต่างๆ เป็นต้น
2. วัสดุสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ดีกว่าฉนวนแต่เลวกว่าตัวนำ เช่น ธาตุซิลิกอน เยอรมันเนียม เป็นต้น
3. วัสดุฉนวน (Insulator) ได้แก่ วัสดุที่นำไฟฟ้าได้ไม่ดี เช่น แก้ว เบกาไลต์ ไมกา ยาง ลูกถ้วยเซรามิก เป็นต้น

2.2.1 วัสดุสารกึ่งตัวนำ

วัสดุสารกึ่งตัวนำ แบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ๆที่สำคัญได้ 3 ประเภทดังนี้คือ

1. สารกึ่งตัวนำประเภทธาตุเดี่ยว(Element semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ ธาตุต่างๆที่อยู่ในกลุ่มที่ IV ของตารางธาตุ ได้แก่ ธาตุคาร์บอน(C) ธาตุซิลิกอน(Si) ธาตุเจอร์เมเนียม(Ge) ธาตุต่างๆในกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำอะตอมของธาตุแต่ละชนิดจะมีจำนวนอิเล็กตรอนไม่เท่ากัน แต่อิเล็กตรอนที่อยู่ในระดับพลังงานชั้นนอกสุดมี 4 อิเล็กตรอน ที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ซิลิกอน

2. สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบ (Compound semiconductor)

สารกึ่งตัวนำประเภทนี้เกิดขึ้นจากสารประกอบของธาตุสองธาตุ มีคุณสมบัติพิเศษทางด้านดูดกลืนแสงและการปลดปล่อยแสง จึงนิยมนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางแสง (Opto Devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง (light Emitting Diode) เลเซอร์ไดโอด(laser Diode) โฟโตไดโอด(Photodiode Diode)

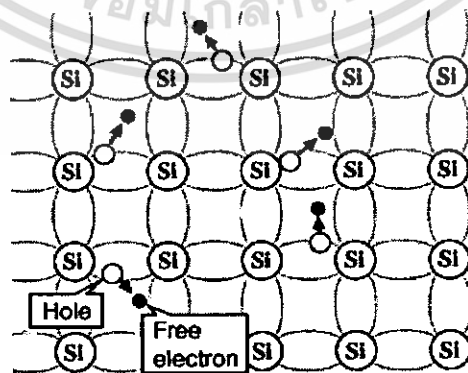
3. สารกึ่งตัวนำประเภทอัลลอย (Alloy Semiconductor)

เป็นอัลลอยที่เกิดจากธาตุตั้งแต่สองชนิดขึ้นไปในระยะเริ่มแรกธาตุเจอร์เมเนียมถูกนำมาใช้สร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ และในต่อมาซิลิกอนก็ถูกนำมาใช้แทนเจอร์เมเนียม ในที่สุดเจอร์เมเนียมก็แทบจะหายไปจากวงการอุตสาหกรรมสารกึ่งตัวนำ

2.2.2 ชนิดของสารกึ่งตัวนำ

ชนิดของสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งได้เป็น 2 ชนิดคือ

1. สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก(Intrinsic semiconductor) บางครั้งถูกเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิด i (i-Type semiconductor) หมายถึงสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ กล่าวคือปราศจากการเจือปนด้วยอะตอม



รูปที่ 2.4 แสดงภาพสองมิติของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรินซิก

2. สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (Extrinsic semiconductor) ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ความหนาแน่นของอิเล็กตรอนและโฮลน้อยมากทำให้ความนำไฟฟ้ามีค่าน้อยกว่าวัสดุตัวนำมาก เพื่อให้สารกึ่งตัวนำใช้งานอย่างกว้างขวาง จึงต้องมีการเติมด้วยอะตอมของธาตุบางธาตุลงไป ในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ เมื่อสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ถูกเจือด้วยอะตอมของธาตุอื่น สารกึ่งตัวนำจะมีสภาพเป็นสารกึ่งตัวนำไม่บริสุทธิ์ ซึ่งเรียกว่า สารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก สามารถนำไปใช้งานได้กว้างขวาง

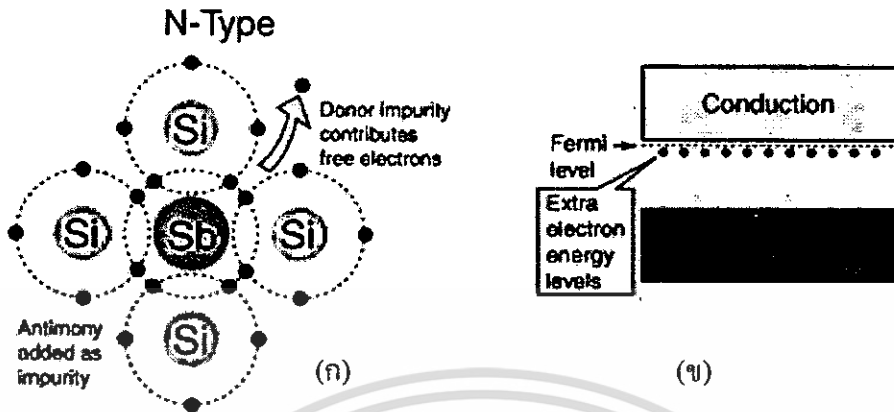
2.2.3 อะตอมสารเจือ (Impurity atoms)

อะตอมสารเจือ คืออะตอมในกลุ่มที่ III และ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ ซึ่งใช้เติมลงไป ในผลึกของสารกึ่งตัวนำด้วยปริมาณเพียงเล็กน้อยเพื่อให้ได้ชนิดของพาหะเช่น อิเล็กตรอน หรือโฮล และปริมาณของพาหะตามที่ต้องการ สารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมอะตอมสารเจือจะมีค่านำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น การเติมอะตอมสารเจือเรียกว่าโดปแทนท์(Dopant) สำหรับอะตอมที่นำมาเป็นสารเจือ ควรต้องมีขนาดอะตอมและคุณสมบัติทางกายภาพที่ใกล้เคียงกับอะตอมสารกึ่งตัวนำนั้นเพื่อไม่ให้เกิดการเสียหายของโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำได้ อะตอมสารเจือถูกจัดแบ่งเป็น 2 ชนิด



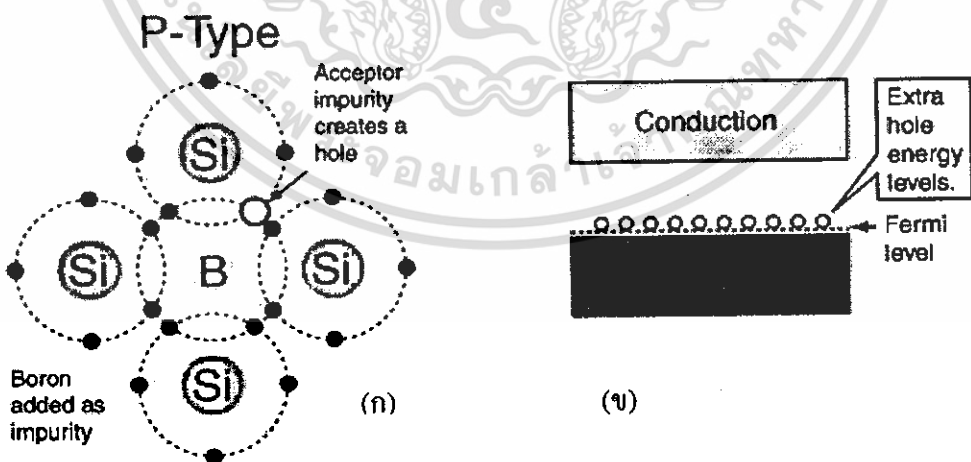
รูปที่ 2.5 แสดงโครงสร้างของอะตอมสารเจือชนิดพี (Boron) และเอ็น (Antimony)

1. อะตอมสารเจือชนิดเอ็น (n-Type Impurity atoms) ได้แก่อะตอมของธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ V ของตารางพีริออดิกของธาตุ เช่น ฟอสฟอรัส(P) สารหนู(As) พลวง (Sb) และบิสมัท(Bi) ที่นิยมมากที่สุดได้แก่ ฟอสฟอรัส (P) เป็นอะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้อิเล็กตรอน หรืออะตอมผู้ให้ (Donor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่ถูกเติมด้วยอะตอมผู้ให้จะมีปริมาณอิเล็กตรอนมากกว่าโฮลมาก อิเล็กตรอนจึงเป็นพาหะส่วนมากเรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-Type Semiconductor) คำว่า เอ็น (n: Negative charge) หมายถึง ประจุลบ



รูปที่ 2.6 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดเอ็น
 (ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่ 0 K

2. อะตอมสารเจือชนิดพี (p-Type Impurity atoms) ได้แก่ อะตอมของธาตุที่อยู่ในกลุ่มที่ III ของตารางพีริออดิกของธาตุเช่น โบรอน(B) อะลูมิเนียม(Al) อินเดียม(In) และแกลเลียม(Ga) เป็นต้น และที่นิยมใช้งานมากได้แก่โบรอน(B) อะตอมสารเจือชนิดนี้คล้ายกับเป็นผู้ให้โฮลหรือผู้รับอิเล็กตรอน ดังนั้นบางครั้งเราจึงเรียกอะตอมสารเจือชนิดนี้ว่าอะตอมผู้รับ(Acceptor atoms) ซึ่งสารกึ่งตัวนำที่เติมด้วยอะตอมผู้รับจะมีปริมาณ โฮลมากกว่าอิเล็กตรอนมาก โฮลจึงเป็นพาหะส่วนมาก และเป็นหลักในการนำไฟฟ้าทำให้สารชนิดนี้ถูกเรียกว่าสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-Type Semiconductor) คำว่า พี (p: Positive charge) หมายถึงประจุบวก

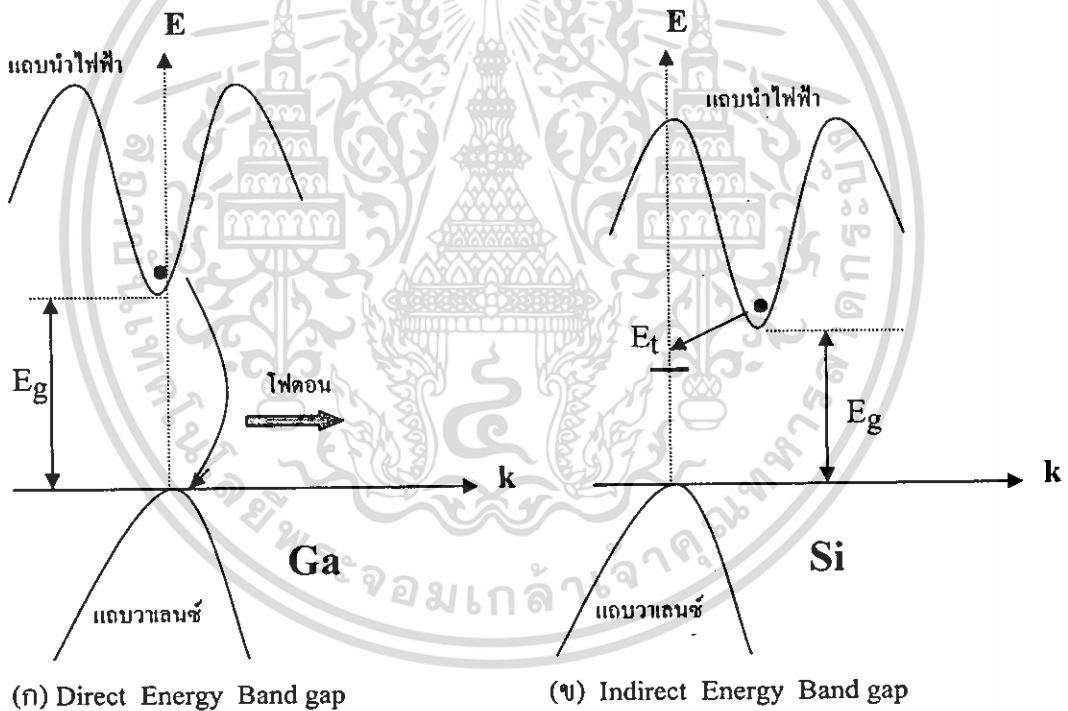


รูปที่ 2.7 (ก) แสดงการเกาะเกี่ยวระหว่างอะตอมซิลิคอนกับอะตอมของสารเจือชนิดพี
 (ข) แสดงระดับผู้รับในแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีที่ 0K

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.4 คุณสมบัติของสารกึ่งตัวนำที่ใช้การสร้างโฟโตไดโอด

โดยความเป็นจริงนั้น ลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะมีความยุ่งยาก และซับซ้อนมากกว่าในรูปที่ 2.1 มากสิ่งสำคัญที่เราสนใจในกราฟ $E - k$ ก็คือ ตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์ หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ เราจะพบว่าสารกึ่งตัวนำบางชนิด ตำแหน่งทั้งสองจะอยู่ตรงกัน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) เราเรียกลักษณะเช่นนี้ว่า “แถบพลังงานช่องตรง” หรือ “แถบช่องตรง” (Direct band gap) และยังมีสารกึ่งตัวนำอีกกลุ่มหนึ่ง ซึ่งตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้ จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.4 (ข) เช่น ซิลิคอน ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า “แถบพลังงานช่องไม่ตรง” หรือ “แถบช่องไม่ตรง” (Indirect band gap)



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะกราฟความสัมพันธ์ $E - k$ ของสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบช่องตรง

(ข) แบบช่องไม่ตรง

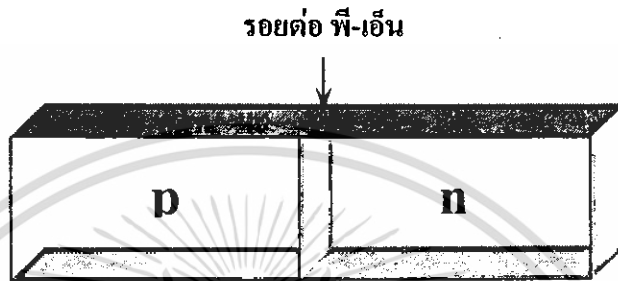
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยปกติ จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่งที่ $k = 0$ แต่จากรูปที่ 2.4 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า จะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือก็คือไม่อยู่ตรงกัน อีกนัยหนึ่งก็คือ จุดสองจุดนี้มีค่า k ที่ต่างกัน หรือก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกันนั่นเอง ดังนั้นคุณสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้ จะแตกต่างกันมาก เช่นคุณสมบัติทางด้านแสง (Optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง (GaAs) พลังงานโฟตอนของแสงซึ่งมีค่าเท่ากับ $h\nu > E_g$ สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง (Direct) และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้านี้ก็สามารถที่จะตกลงมาที่จุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม เนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบโดยตรงเช่นนี้จะเกิดขึ้นได้โดยง่าย ทำให้สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้ สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (Optical devices) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง (Si) อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนระดับพลังงานก่อนซึ่งก็คือ การเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อนจึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้นในทำนองเดียวกัน พลังงานโฟตอนจากแสงก็ไม่สามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่าย ถึงแม้พลังงานจากโฟตอนจะมีค่ามากเพียงพอก็ตามแต่ อิเล็กตรอนก็ยังต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสถานะ ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการดูดกลืนหรือคายพลังงานของแสง ของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้ เกิดขึ้นได้ไม่ล้นนักเนื่องจากมีคุณสมบัติทางแสงที่ด้อยกว่าสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง

อย่างไรก็ดีการเลือกใช้ซิลิคอนในการสร้างโฟโตไดโอดก็ยังมีข้อดีอีกหลายประการในการเลือกใช้สร้างโฟโตไดโอดแทน แกลเลียมอาเซไนด์ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีมาก ราคาถูก และสามารถสร้างชั้นออกไซด์ SiO_2 ที่ผิวได้ง่ายกว่า โดยวิธีการออกซิเดชันและเป็นชั้นออกไซด์ที่เสถียรภาพกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ อีกทั้งยังเป็นสารกึ่งตัวนำที่ใช้ในการสร้างวงจรรวม

2.3 รอยต่อ พี-เอ็น

รอยต่อพี-เอ็นจะประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำต่างชนิดกันสองชั้นคือส่วนเอ็น และส่วนพี บริเวณสัมผัสระหว่างทั้งสองจะถูกเรียกว่า รอยต่อ พี-เอ็น



รูปที่ 2.9 โครงสร้างรอยต่อ พี-เอ็น

2.3.1 รอยต่อพี-เอ็นในภาวะสมดุล

เมื่อรอยต่อพี-เอ็นถูกสร้างขึ้นแล้ว จะเกิดปรากฏการณ์บางอย่างขึ้นที่รอยต่อพี-เอ็น และพอสรุปได้ดังนี้คือ เนื่องจากโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี(P-type) มีความหนาแน่นมากกว่าโฮลทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น(n-type) มีความหนาแน่นมากกว่าอิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดพี ดังนั้นด้วยความหนาแน่นของประจุพาหะที่แตกต่างกันนี้จะทำให้เกิดมีการแพร่ของประจุพาหะจากทางด้านที่ซึ่งมีความหนาแน่นของประจุพาหะมากกว่าไปยังด้านที่มีความหนาแน่นน้อยกว่า กล่าวคือโฮลทางด้านพีในบริเวณใกล้รอยต่อ จะแพร่เข้าไปในด้านเอ็นและอิเล็กตรอนทางด้านเอ็นในบริเวณใกล้รอยต่อจะแพร่เข้าไปทางด้านพีการแพร่นี้จะกระทำผ่านรอยต่อ พี-เอ็น และสิ่งที่ตามมาคือจะมีการรวมตัว(recombination) ระหว่างโฮลและอิเล็กตรอนผลจากการรวมตัวของประจุพาหะทั้งสองนี้ จะทำให้อะตอมของสารเจือบริเวณใกล้ๆ กับรอยต่อ พี - เอ็น กลายเป็นไอออน (ion) และแสดงอำนาจไฟฟ้าออกมาได้ กล่าวคืออะตอมของสารเจือชนิดเอ็นทางด้านเอ็น จะสูญเสียอิเล็กตรอนอะตอมนี้จึงแสดงตัวเป็น ไอออนบวก และอะตอมของสารเจือชนิดพีทางด้านพี จะสูญเสียโฮลไป จึงทำให้อะตอมนี้แสดงตัวเป็น ไอออนลบ เมื่อเป็นเช่นนี้ จะทำให้เกิดสะสมประจุไฟฟ้าขึ้น ณ. บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น ดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยที่อำนาจของสนามไฟฟ้านี้จะขัดขวางการแพร่ข้ามรอยต่อของโฮลและอิเล็กตรอน ดังนั้นการแพร่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะทั้งสองชนิดจะค่อย ๆ ลดลง จนกระทั่งสนามไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นมีอำนาจมากพอที่จะยับยั้งไม่ให้ประจุพาหะทั้งสองรอยต่ออยู่ในภาวะ สมดุล (equilibrium)

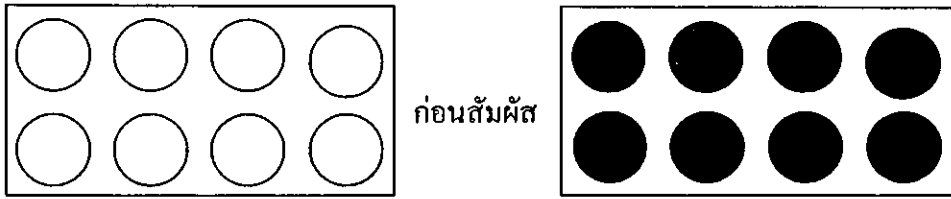
นอกจากนี้แล้ว ปรากฏการณ์ ดังกล่าวจะทำให้บริเวณภายในรอยต่อนั้น ไม่มีประจุพาหะทั้งสองชนิดจะมีแต่อะตอมของสารเจือชนิดพีและชนิดเอ็น ซึ่งขณะนี้อยู่ในสภาพไอออนลบและไอออนที่มีอยู่ในบริเวณดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า บริเวณปลอดพาหะ (depletion region) สนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณนี้มีแรงดันไฟฟ้าภายใน (built – in voltage) เกิดขึ้น ซึ่งแรงดันไฟฟ้านี้เองที่เป็นกำแพงศักย์ ต่อต้านการเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อของประจุพาหะ

ลักษณะการกระจายของความหนาแน่นของประจุ สนามไฟฟ้า และความต่างศักย์ไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อแสดงได้ ดังในรูปที่ 2.10 แรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมบริเวณรอยต่อหรือที่เรียกว่า ศักย์สัมผัส (contact potential) แสดงได้ด้วยสมการ 2.3

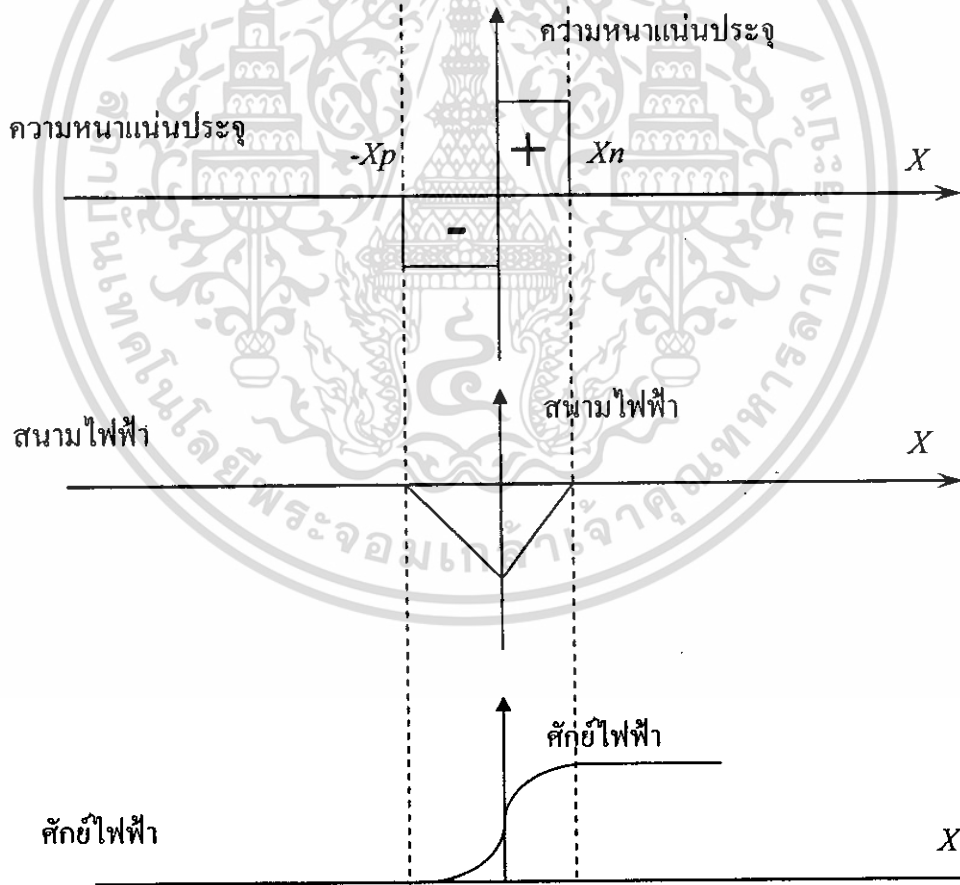
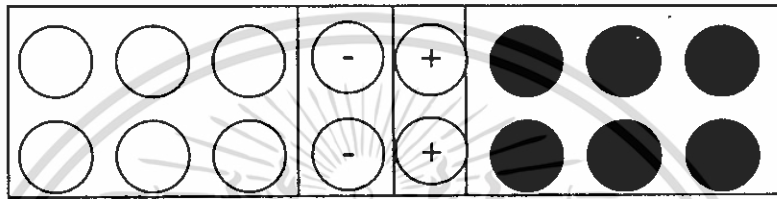
$$V_0 = \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A N_D}{n_i^2} \quad (2.3)$$

- ซึ่ง
- V_0 : ศักย์สัมผัส (โวลต์)
 - k : ค่าคงตัวของโบสตันน์มีค่า = $8.62 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$
 - T : อุณหภูมิองศาสัมบูรณ์ ($^\circ\text{K}$)
 - q : ประจุอิเล็กตรอน = 1.6×10^{-19} คูลอมป์
 - N_A : ความหนาแน่นของอะตอมผู้รับ (cm^{-3})
 - N_D : ความหนาแน่นของอะตอมผู้ให้ (cm^{-3})
 - n_i : ความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ (cm^{-3})

⊖ ไอออนบวก ⊕ ไอออนลบ ● อิเล็กตรอน ○ โปรตอน



ภาวะสมดุล



รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้าภายใน บริเวณรอยต่อและศักย์ไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับของ p-n

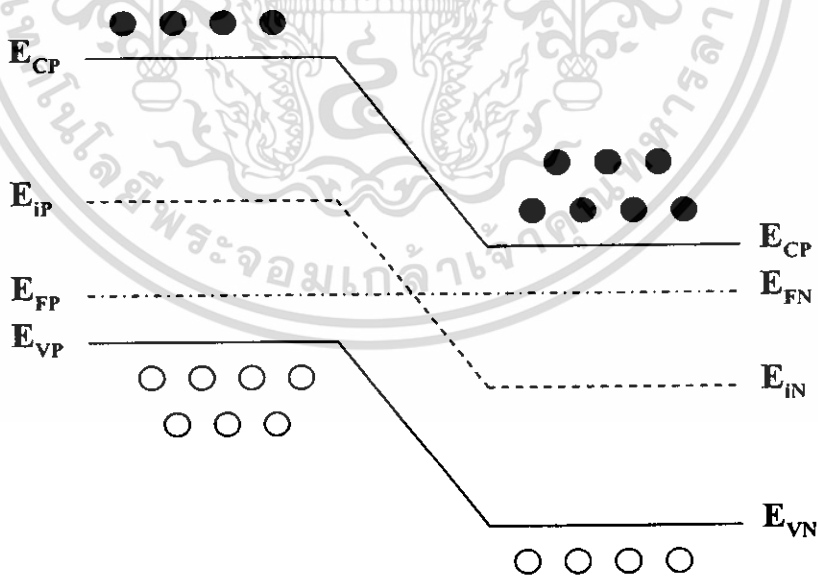
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ในกรณีที่เราพิจารณาลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน จะพบว่าขณะที่รอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น เนื่องจากระดับเฟอร์มิ ซึ่งเป็นระดับพลังงานที่เรานิยามไว้ว่า โอกาสที่จะพบอิเล็กตรอนที่ระดับพลังงานนี้จะมีค่าเป็น 1/2 ของสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีไม่เท่ากัน ดังนั้นเมื่อรอยต่อพีเอ็นเกิดขึ้น ระดับเฟอร์มิในสารทั้งสองจะต้องปรับให้มีระดับเดียวกัน ขณะที่ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองกำลังปรับให้เท่ากัน จะตรงกับภาวะที่โฮล และอิเล็กตรอนแพร่ข้ามรอยต่อ จนกระทั่งเกิดสนามไฟฟ้าภายในต่อต้านการแพร่ของประจุพาหะ และในที่สุดอิเล็กตรอนและโฮลก็ไม่สามารถแพร่ข้ามรอยต่อได้ ซึ่งเป็นภาวะสมดุลของรอยต่อ ในขณะนี้เมื่อพิจารณาแถบพลังงานจะพบว่าระดับเฟอร์มิ (Fermi level) ของสารทั้งสองชนิดจะมีระดับเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.11 และในภาวะสมดุลระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแสดงได้ดังในสมการ 2.4

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon V_0(N_A + N_D)}{q \cdot N_A \cdot N_D}} \text{ cm.} \tag{2.4}$$

โดยที่ ϵ : permittivity ของสารกึ่งตัวนำ
 V_0 : ศักย์สัมผัส

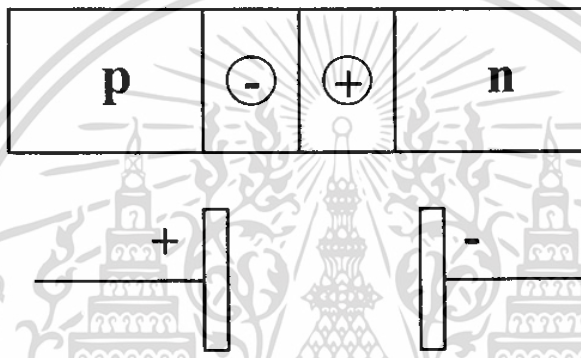


รูปที่ 2. 11 แสดงรอยสัมผัสของสารชนิดพีและชนิดเอ็นด้วยแถบพลังงานในภาวะสมดุล

และนอกจากนี้ยังพบว่า ที่บริเวณรอยต่อมีลักษณะคล้ายกับโครงสร้างของตัวเก็บประจุไฟฟ้า (capacitor) ค่าความหนาแน่นของความจุไฟฟ้า (capacitance) ที่รอยต่อแสดงได้ดังในสมการ 25

$$C_j = \sqrt{\frac{\epsilon \cdot q \cdot N_A \cdot N_D}{2(N_A + N_D)V_o}} \quad F/m^2 \quad (2.5)$$

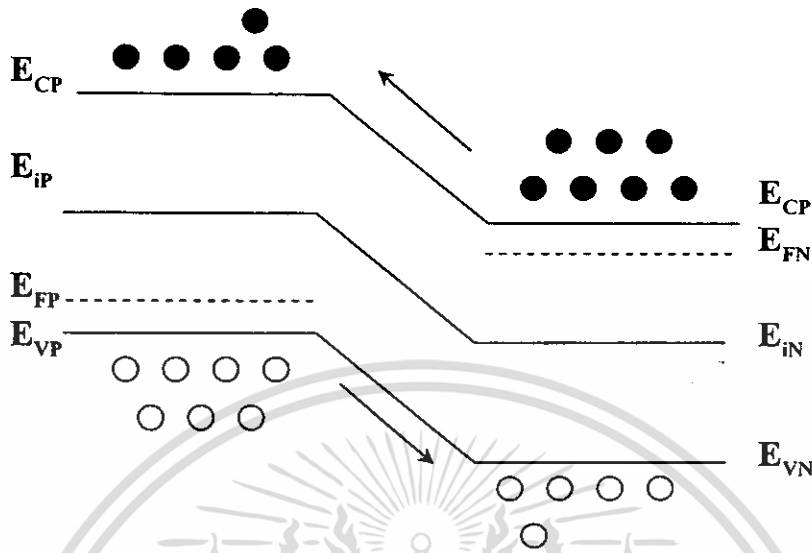
โดยที่ C_j ค่าความจุไฟฟ้าที่รอยต่อ, ฟารัด/ตร.เมตร



รูปที่ 2.12 แสดงค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อ พี-เอ็น

2.3.2 รอยต่อพี-เอ็นในขณะที่ได้รับไบอัสตรง

ในกรณีที่รอยต่อพี-เอ็นได้รับแรงดันไบอัสตรง กล่าวคือทางด้านพีจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับด้านเอ็น แรงดันไบอัสตรงจากภายนอกจะไปปรากฏที่รอยต่อ พี - เอ็น และอยู่ในลักษณะโฮลจากด้านพี และอิเล็กตรอนจากทางด้านเอ็นถูกฉีด (injection) ข้ามรอยต่อพีเอ็นได้ปริมาณของโฮลและอิเล็กตรอนที่ถูกฉีดข้ามรอยต่อนี้ จะเปลี่ยนแปลงกับแรงดันไบอัสในลักษณะของเอกโปเนนเชียล (exponential function) จากการฉีดของโฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อนี้เองจะทำให้เกิดกระแสไหลในวงจร



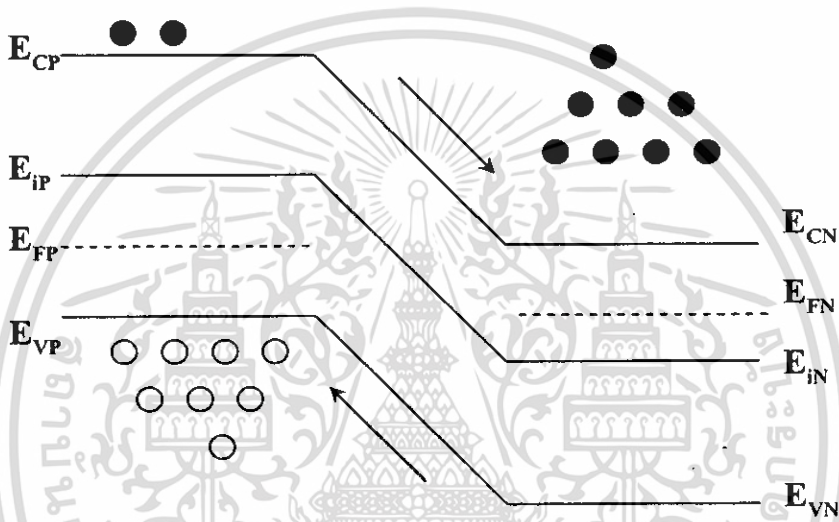
รูปที่ 2.13 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรง แสดงได้ดังในรูปที่ 2.13 ซึ่งจะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ (E_F) ของด้านพีและเอ็นจะไม่เท่ากัน และกำแพงศักย์ที่รอยต่อจะมีขนาดลดลง ดังนั้นจึงทำให้เกิดมีการฉีดของ โฮลและอิเล็กตรอนข้ามรอยต่อ จึงเป็นผลให้มีกระแสไหลในวงจรได้ แถบพลังงานของรอยต่อพี-เอ็น ในขณะที่ได้รับไบอัสตรงนั้น ระดับพลังงานเฟอร์มิของด้านทั้งสองมีระดับต่างกันพาหะอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่จากด้านเอ็นข้ามกำแพงศักย์ ที่รอยต่อแล้วแพร่เข้าไปยังด้านพี ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าเนื่องจากอิเล็กตรอน ไหลจากพีไปทางด้านเอ็น ส่วนพาหะโฮลจะเคลื่อนที่จากพีข้ามกำแพงศักย์ ที่รอยต่อแล้วแพร่ข้ามไปทางด้านเอ็นทำให้มีกระแสไฟฟ้าเนื่องจากโฮลไหลจากด้านพีไปยังด้านเอ็น

2.3.3 รอยต่อพีเอ็นในขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ในกรณีที่รอยต่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับดังแสดงในรูปที่ 2.10 กล่าวคือ ทางด้านพีจะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับทางด้านเอ็น ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้แก่รอยต่อพีเอ็น จะพบว่าแรงดันไบอัสดังกล่าวจะไปช่วยเสริมกับแรงดันภายใน ซึ่งปรากฏที่บริเวณรอยต่อ ดังนั้น จะทำให้กำแพงศักย์ (potential barrier) ที่บริเวณรอยต่อมีขนาดเพิ่มขึ้น อิเล็กตรอนจากด้านเอ็น และ โฮลจากด้านพี จึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อไปได้รอยต่อพี-เอ็นในภาวะนี้จึงมีสภาพคล้ายฉนวนไม่ยอมให้กระแสส่วนมากไหลได้ อย่างไรก็ตามก็จะมีพาหะโฮลทางด้านเอ็น และอิเล็กตรอนทางด้านพี

ซึ่งมีจำนวนน้อยสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ดังนั้นจึงปรากฏมีกระแสจำนวนน้อยไหลข้ามรอยต่อ ในทิศทางที่ตรงกันข้ามกับ กระแสส่วนมากที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ปริมาณของกระแสที่ไหลในขณะที่รอยต่อได้รับไบอัสย้อนกลับนี้จะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง



รูปที่ 2. 14 แสดงลักษณะ โครงสร้างแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะที่ได้รับแรงดัน ไบอัสย้อนกลับ

ลักษณะของแถบพลังงานในขณะนี้แสดงได้ดังในรูปที่ 2.14 ซึ่งจะเห็นได้ชัดว่ากระแสที่ไหลผ่านรอยต่อในขณะนี้จะมีทิศทางตรงข้ามกับกระแสในกรณีไบอัสตรง ปริมาณกระแสจะมีค่าน้อยมาก และมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิคูหนึ่ง ๆ

2.4 โฟโตไดโอด

เมื่อใดที่รอยต่อพี-เอ็น ชนิดซิลิกอนได้รับการไบแอสกลับ จะเกิดกระแสรั่วไหลย้อนกลับผ่านไดโอด ซึ่งกระแสรั่วไหลย้อนกลับและอิมพีแดนซ์ของรอยต่อพี-เอ็นนี้ มีความไวต่อแสงมาก คือจะมีอิมพีแดนซ์สูงเมื่ออยู่ในที่มืด และมีอิมพีแดนซ์ต่ำเมื่ออยู่ในที่สว่าง

ไดโอดโดยทั่วไปนั้น จะมีถูกหุ้มรอยต่อนี้ไว้ด้วยวัสดุทึบแสง เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปรากฏการณ์นี้ขึ้น แต่สำหรับโฟโตไดโอดเป็นไดโอด ซึ่งถูกผลิตขึ้นมาเพื่อให้เกิดปรากฏการณ์นี้โดยเฉพาะ รอยต่อจึงถูกห่อหุ้มด้วยวัสดุที่แสงสามารถผ่านได้ ไดโอดชนิดนี้มี 2 แบบ คือ ชนิดที่ตอบสนองต่อช่วงแสงที่สายตามองเห็น และชนิดที่ตอบสนองต่อแสงย่านอินฟราเรด (IR) ในการนำไปใช้งาน โฟโตไดโอดจะต้องถูกต่อในลักษณะได้รับการไบแอสกลับ สำหรับแรงดันเอาต์พุตเป็นแรงดันที่ตกคร่อมตัวต้านทาน โหลด ที่ต่ออนุกรมกับโฟโตไดโอด ระหว่างโฟโตไดโอดและกราวด์

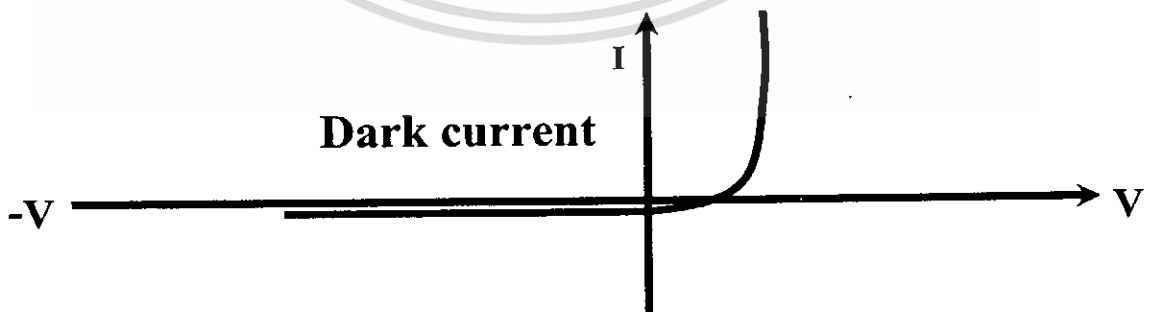
2.4.1 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

1. ในภาวะที่รอยต่อพี-เอ็นไม่ได้รับแสง

เมื่อรอยต่อได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมาก และกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโปเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ดังนั้นจากความสัมพันธ์ของกระแส และแรงดันสามารถนำมาเขียนเป็นกราฟได้ดังในรูปที่ 2.11 โดยแสดงให้เห็นคุณสมบัติในการเรกติไฟร์ของรอยต่อพี - เอ็น ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า

$$\text{กรณีที่รอยต่อไม่ได้รับแสง (dark) } I = I_0(e^{qV/kT} - 1) \quad (2.6)$$

โดยกระแส DARK หรือกระแสมืดจะกล่าวไว้ในรายละเอียดต่อไป



รูปที่ 2.15 แสดงลักษณะความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็น

2. ในภาวะที่รอยต่อพีเอ็นได้รับแสง (illumination)

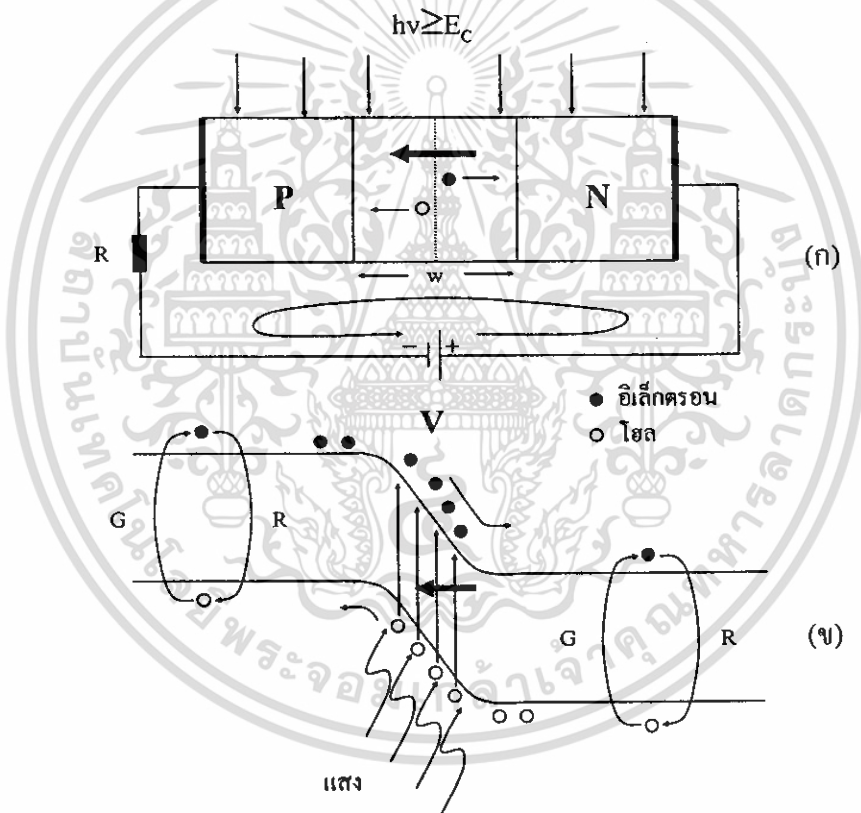
ในภาวะที่รอยต่อพีเอ็นได้รับแสง เราพิจารณาว่าในลำแสง ประกอบไปด้วยกลุ่มของโฟตอน (Photon) ซึ่งมีพลังงานค่าหนึ่งคงแสดงในสมการ

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

E_{photon} : คือ พลังงานของโฟตอน

h : ค่าคงตัวของพลังค์ = 6.624×10^{-34} joule-sec.

V : ค่าความถี่ของคลื่นแสง



รูปที่ 2.16 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอด

(ก) การให้ไบอัสแก่โฟโตไดโอดและ

(ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสงตกกระทบบนรอยต่อพีเอ็น ซึ่งเป็นเนื้อของสารกึ่งตัวนำ โฟตอนจะถ่ายเทพลังงานให้แก่ อิเล็กตรอน ซึ่งอยู่ในแถบวาเลนซ์สามารถออกไปเป็นอิเล็กตรอนอิสระอยู่ในแถบความนำได้ และทิ้ง ให้เกิดโฮลซึ่งเป็นประจุพาหะชนิดบวกไว้ที่แถบวาเลนซ์ ประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน-โฮล อิสระที่ เกิดขึ้นใหม่นี้เป็นผลมาจากการกระตุ้นสารกึ่งตัวนำด้วยแสง อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณรอยต่อ หรือใกล้ ๆ กับรอยต่อ จะถูกอิทธิพลจากสนามไฟฟ้าภายใน ทำให้เคลื่อนที่ข้ามรอยต่อ โดยที่โฮลจะ เคลื่อนที่ไปทางด้านพี และอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทางด้านเอ็น เกิดกระแสไฟฟ้าซึ่งไหลในทิศทาง ตรงกันข้ามกับกระแสในขณะที่ยังไม่ได้รับไบอัสตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.16

กระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นดังกล่าวนี้ถูกเรียกว่า กระแสแสง (Photo current) หรือเขียนย่อ ๆ ว่า I_L ลักษณะแถบพลังงานของรอยต่อพีเอ็นขณะได้รับแสง ดังนั้นอาจเขียนได้ว่า กรณีรอยต่อได้รับแสง (illumination) จะได้กระแสทั้งหมดรวมคือ

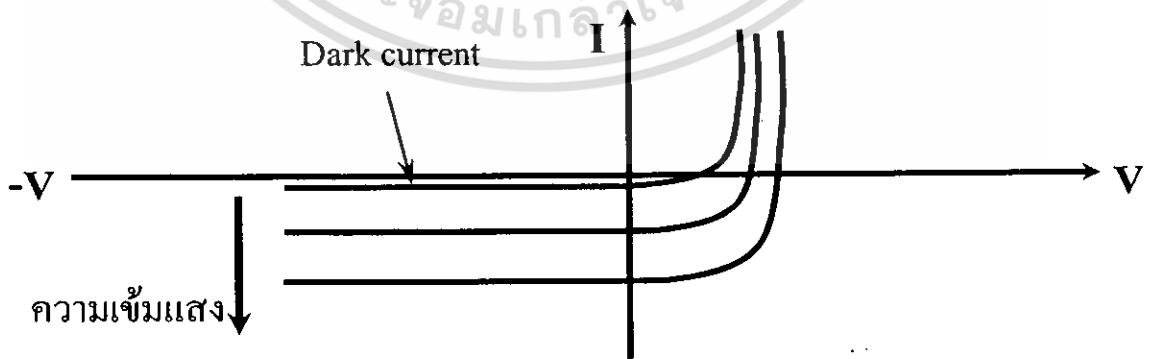
$$I = I_{\text{dark}} + I_L \tag{2.7}$$

หรือ
$$I = I_0 (e^{qVA/KT} - 1) + I_L \tag{2.8}$$

และกระแสเนื่องจากแสงสามารถแสดงได้โดยสมการที่ 2.9

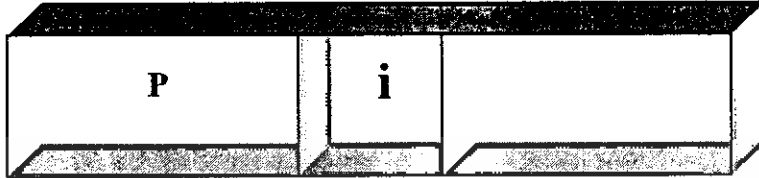
$$I_L = q \cdot A \cdot g_{\text{op}} (L_p + L_n) \tag{2.10}$$

- q : ประจุของอิเล็กตรอน คูლობบ
- A : พื้นที่ของรอยต่อ-เอ็นที่ถูกแสง
- g_{op} : อัตราการเกิดประจุพาหะคู่อิเล็กตรอน - โฮลเนื่องจากแสง (Optical Generation rate)
- L_n, L_p : คือระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮลตามลำดับ



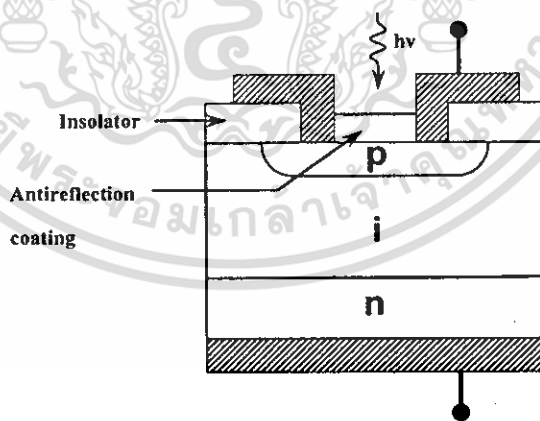
รูปที่ 2.17 ความสัมพันธ์ของกระแสและแรงดันของรอยต่อพี-เอ็นที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้น

2.4.2 จีลีคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n



รูปที่ 2.18 แสดงลักษณะ โครงสร้างพื้นฐานของรอยต่อ p-i-n

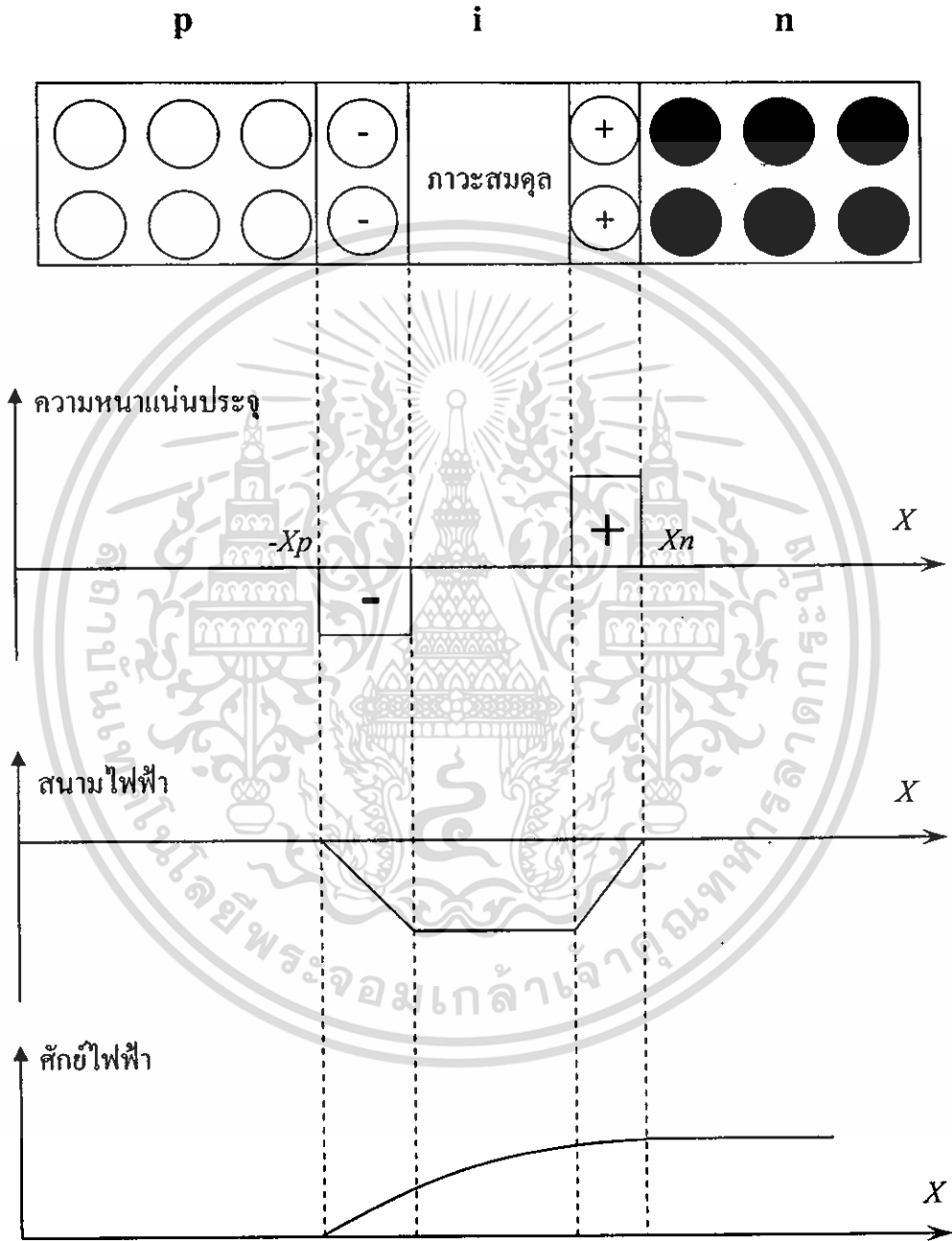
โฟโตไดโอดชนิด p-i-n คือโฟโตไดโอดที่ประกอบไปด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำชนิดพีสารกึ่งตัวนำชนิดอินทรีนซิค และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ซึ่งสามารถแสดงภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดชนิดนี้ได้ดังรูปที่ 2.16 โดยในส่วนของชั้นอินทรีนซิคจะเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสง เนื่องจากมีสนามไฟฟ้าตกคร่อมจึงทำให้อิเล็กตรอน-โฮล เคลื่อนที่ สนามไฟฟ้าได้โฟโตไดโอดชนิด p-i-n เป็นโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่มีความน่าสนใจ เนื่องจากมีกระแสมืดต่ำ แรงดันพังทลายสูง ค่าความจุไฟฟ้าต่ำ และมีความไวต่อแสงและความเร็วในการทำงานสูง



รูปที่ 2.19 แสดงภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

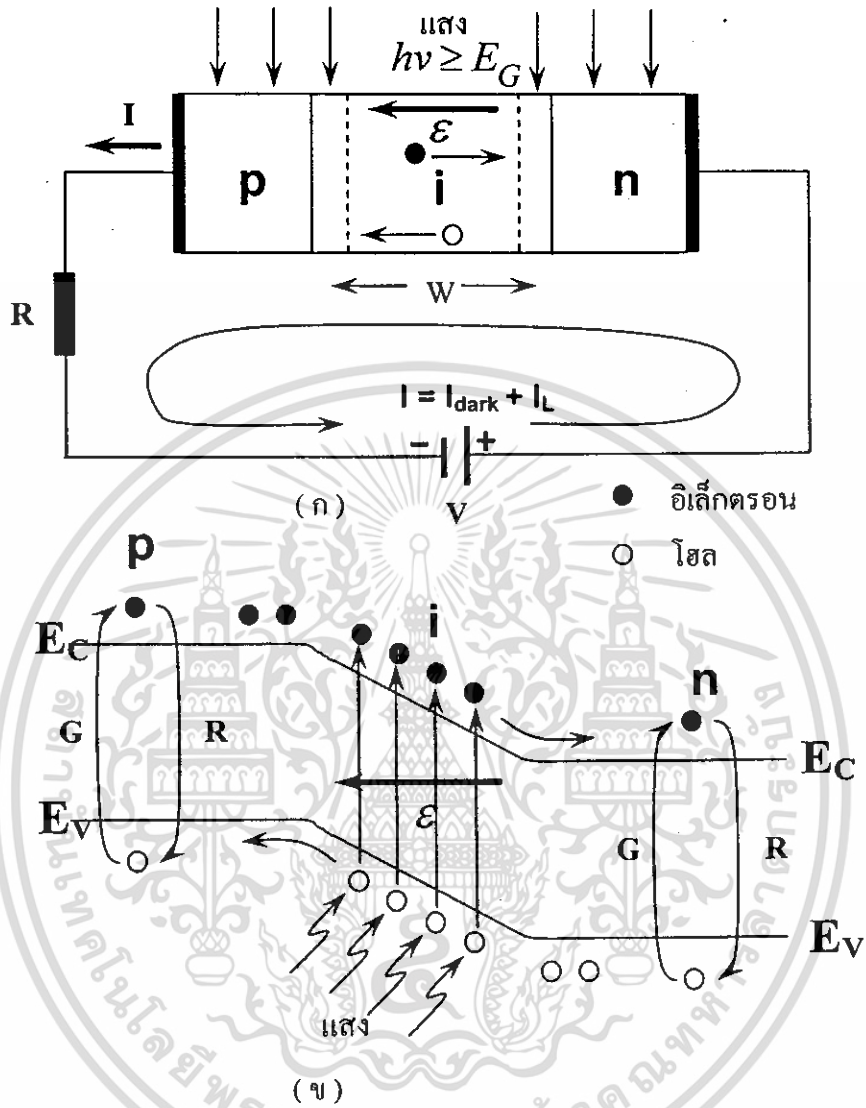
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

⊖ ไอออนบวก ⊕ ไอออนลบ ● อิเล็กตรอน ○ โปรตอน



รูปที่ 2.20 แสดงลักษณะการกระจายของความหนาแน่นประจุในบริเวณปลอดพาหะ สนามไฟฟ้า ภายในบริเวณรอยต่อและศักย์ไฟฟ้าในบริเวณรอยต่อตามลำดับของ p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.21 การเกิดไฟฟ้าแสงในโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

(ก) การให้ไบอัสแก่ไดโอดและ

(ข) ลักษณะแถบพลังงานของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อได้รับแรงดันไบอัสแบบย้อนกลับของโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะและบริเวณการแพร่ (Diffusion Region) โดยปกติการแพร่อะตอมสารเจือของสารชนิดพีจะมากกว่าของสารชนิดเอ็น โฟตอนที่เข้ามาจะถูกดูดกลืนทั้งในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณการแพร่ ซึ่งจะเรียกบริเวณนี้ว่าบริเวณการดูดกลืน ความกว้างของบริเวณการดูดกลืนนี้จะขึ้นอยู่กับค่าพลังงานของโฟตอนที่เข้ามาและคุณสมบัติของสารที่ใช้สร้างไดโอด ดังนั้นคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดขึ้นทั้งในบริเวณปลอดพาหะ และบริเวณการดูดกลืนในบริเวณปลอดพาหะนั้น คู่พาหะจะถูกแยกออกจากกันและครีพท์(Drift)โดยอิทธิพลของสนามไฟฟ้าในบริเวณนั้น ส่วนในบริเวณการแพร่ เมื่อเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ขึ้นจะทำให้โฮลเคลื่อนที่เข้าหาบริเวณปลอดพาหะ ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปที่ขั้วของไดโอดเคลื่อนที่ในบริเวณนี้จะเป็นแบบการแพร่(Diffusion) ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรือนั่นก็คือ ความหนาแน่นของประจุ การแพร่นี้ผลเบื้องต้นพบว่าโฟตอนส่วนใหญ่จะถูกดูดกลืนในบริเวณปลอดพาหะเป็นบริเวณกว้าง โดยเทคนิคการเติมอะตอมสารเจือในสารชนิดเอ็นให้มีค่าน้อย ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีความจำเป็นเนื่องจากการดูดกลืนส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในบริเวณนี้ ดังนั้น โฟโตไดโอดแบบ p-i-n จะถูกออกแบบให้บริเวณที่เป็นสารชนิด i นั้นมีค่าเข้มข้นของการเติมอะตอมสารเจือต่ำมากๆ เพื่อให้เกิดบริเวณปลอดพาหะกว้าง ดังนั้นสารชนิดเอ็นในส่วนนี้จะประพฤติตัวเหมือนกับสารกึ่งตัวนำบริสุทธิ์ ส่วนที่ขั้วต่อของสารชนิดเอ็นนั้นจะให้มีความเข้มข้นสูงมาก เพื่อทำให้เกิดรอยต่อแบบโอมมิกส์ (Ohmic Contact) ดังนั้น โฟโตไดโอดประเภทนี้จะเกิดการดูดกลืนเฉพาะในบริเวณปลอดพาหะเท่านั้น

2.4.3 กระแสมืด

เมื่อเราทำการจ่ายแรงดันย้อนกลับให้กับ โฟโตไดโอด ซึ่งขณะนี้ยังไม่มีแสงหรือรังสีใดๆ จะทำให้เกิดกระแสรั่วหรือกระแสมืด โดยกระแสมืดจะประกอบไปด้วย

1. กระแสเนื่องจากจากพาหะส่วนน้อย (I_{DR})

เมื่อจ่ายแรงดันย้อนกลับให้กับ โฟโตไดโอดค่าแรงศักย์ที่รอยต่อเพิ่มขึ้นอิเล็กตรอนด้าน N และโฮลด้าน P ไม่สามารถข้ามรอยต่อมาได้ซึ่งเป็นพาหะส่วนใหญ่ แต่พาหะส่วนน้อยคืออิเล็กตรอนด้าน P และโฮลด้าน N ที่ใกล้กับขั้วปลอดพาหะสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยต่อได้ ทำให้เกิดเป็นกระแสมืด

2. กระแสเนื่องจากอุณหภูมิจนในรอยต่อบริเวณปลอดพาหะ (I_0)

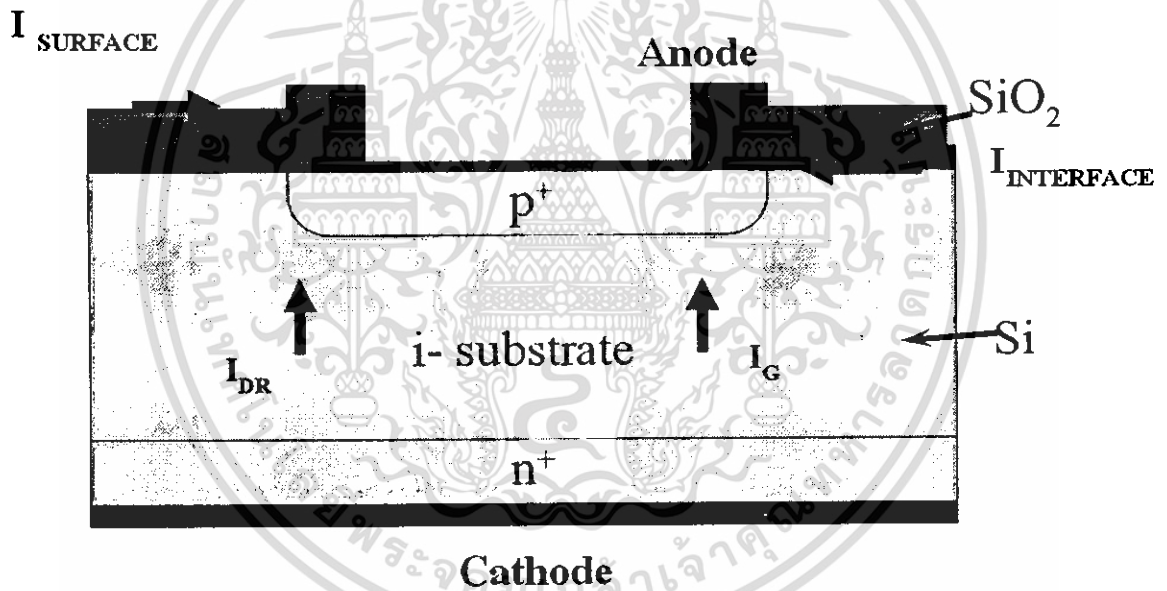
เนื่องจากชั้นสาร i ที่มีแขนของโครงสร้างไม่สมบูรณ์ ความไม่บริสุทธิ์ของชั้นสาร 100% ซึ่งจะทำให้เกิดแถบพลังงานซึ่งกลายเป็นศูนย์กลางรวมตัวใหม่หากมีสนามพัดผ่านก็จะเกิดกระแสมืดไหลได้

3. กระแสเนื่องจากรอยต่อของชั้นสาร ($I_{\text{INTERFACE}}$)

เป็นชั้นรอยสัมผัสระหว่าง Si กับ SiO_2 ที่มีแกนของโครงสร้างไม่สมบูรณ์ ความไม่บริสุทธิ์หรือจุดบกพร่องบนผิวสัมผัส ซึ่งโดยปรกติการมีรอยต่อของชั้นสาร Si กับ SiO_2 (สถานะ interface state) จะทำให้เกิดแถบพลังงานหากมีสนามพัดผ่านก็จะเกิดกระแสมืดไหลได้

4. กระแสบนพื้นผิว (I_{SURFACE})

หากมีการจ่ายแรงดันมากๆระหว่าง Anode กับ Cathode และมีความบางของตัวอุปกรณ์ก็อาจทำให้เกิดกระแสมืด รวมทั้งความชื้นบนผิว น้ำมัน สิ่งแปลกปลอมต่างๆที่อยู่บนผิวก็มีส่วนช่วยให้เกิดกระแสมืดได้ง่ายขึ้น

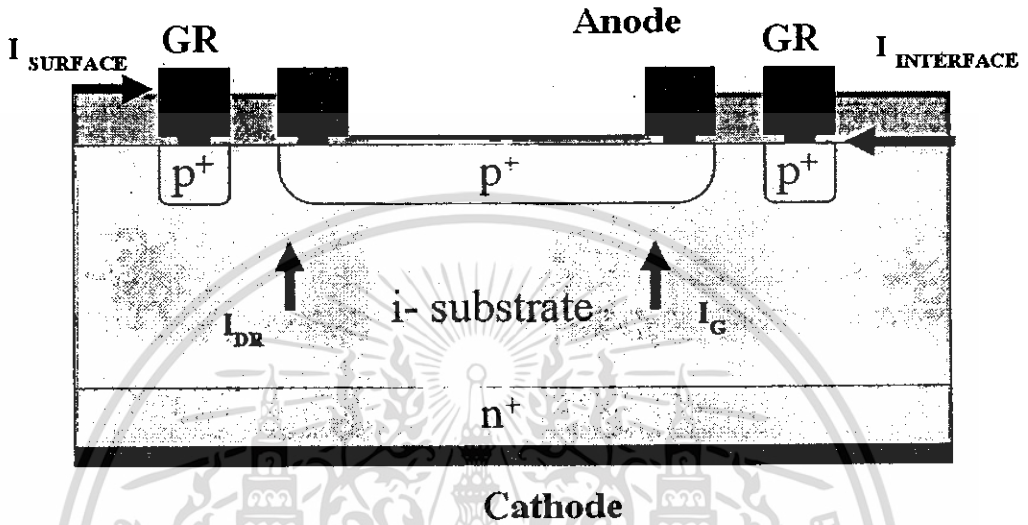


รูปที่ 2.22 โครงสร้างซีลิกอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

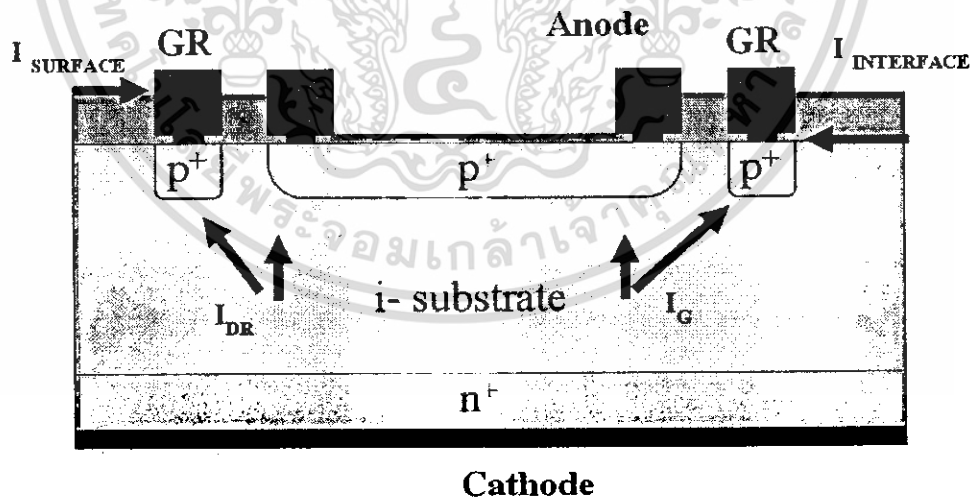
2.4.4 ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง จะช่วยลดกระแสมืดซึ่งเป็นช่องหยุดการเดินของกระแส จากรูปที่ 2.23 จะช่วยสกัดกั้นการเดินของกระแส $I_{INTERFACE}$ กับ $I_{SURFACE}$

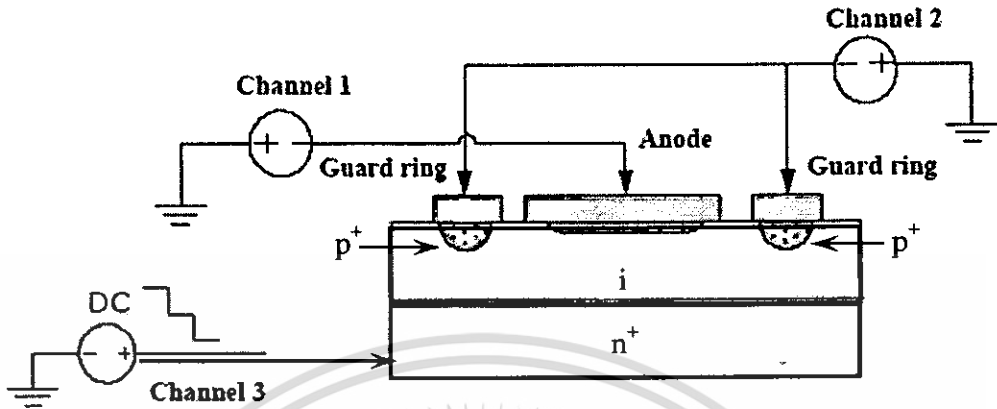


รูปที่ 2.23 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง

หากมีการจ่ายแรงดันย้อนกลับให้ที่การ์ดริงจะทำให้ช่วยลดกระแส I_{DR} และ I_G



รูปที่ 2.24 โครงสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง



รูปที่ 2.25 แสดงการวัดกระแสแสงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง

ซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง จะมีโครงสร้างเหมือนกับซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n แต่จะมี ชั้นวงแหวน (guard ring) ชนิด p+ ดังรูปที่ 2.1 4

เมื่อไบอัส p+ การ์ดริง ดังในรูปที่ 2.25 ก็จะช่วยลดความหนาแน่นของสนามไฟฟ้าบริเวณรอยต่อและผิวหน้า ปกติประจุบวกก็จะสะสมที่ผิวของซิลิคอนและซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อประจุบวกมาสะสมได้ในระดับสูง ทำให้สนามไฟฟ้าได้ซิลิคอนออกไซด์ ก็จะสามารทำให้เกิดแรงดันพังทลายใกล้เคียงขอบของบริเวณรอยต่อ การไบอัสกลับของ p+ การ์ดริงก็จะทำให้สนามไฟฟ้าขยายกว้างขึ้น ทำให้ไม่มีความเข้มของประจุ ดังนั้นจึงทำให้เบรคดาของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n สูงขึ้น และที่สำคัญยังช่วยลดกระแสรั่ว โดยที่การ์ดริงจะเป็นตัวดูดกระแสรั่ว

บทที่ 3

กระบวนการออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีการ์ตริง

ในการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ตริงเพื่อการศึกษาคุณสมบัติต่างๆ การออกแบบโครงสร้างของอุปกรณ์เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนหนึ่ง ในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการออกแบบโครงสร้างและกระบวนการสร้าง โดยการออกแบบจะกล่าวถึงการออกแบบกระเจกต้นแบบเพื่อใช้ในการสร้าง และรายละเอียดเกี่ยวกับกระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ตริง

3.1 การสร้างกระเจกต้นแบบ

ในการออกแบบจะเป็นการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n โดยเปลี่ยนแปลงตัวแปรต่างๆ ซึ่งอาศัยเงื่อนไขของพารามิเตอร์จากสมการทั่วไปของไดโอดดังสมการ 3.1 มาสร้างพารามิเตอร์ในการออกแบบ

$$\begin{aligned} I_0 &= Aqn_i^2 \left(\frac{D_h}{L_h N_D} + \frac{D_e}{L_e N_A} \right) \\ I &= I_0 (e^{qV_A/KT} - 1) \end{aligned} \quad (3.1)$$

I : คือกระแสที่ไหลผ่านรอยต่อพีเอ็น

I_0 : คือกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ

V_A : คือแรงดันไบอัสที่ให้

A : คือพื้นที่ของรอยต่อพีเอ็น

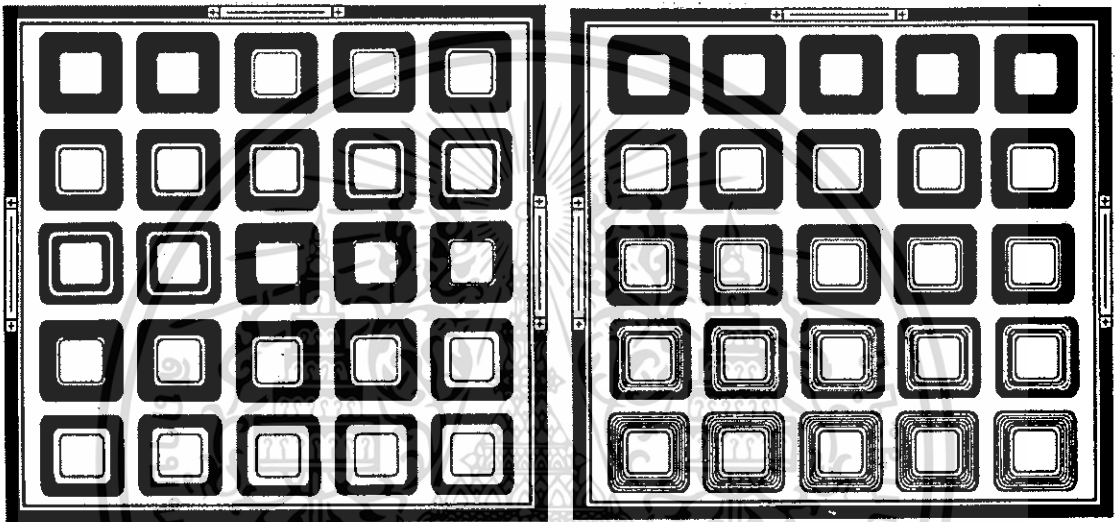
D_e, D_h : คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮลตามลำดับ

L_e, L_h : คือ ระยะเวลาแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮลตามลำดับ

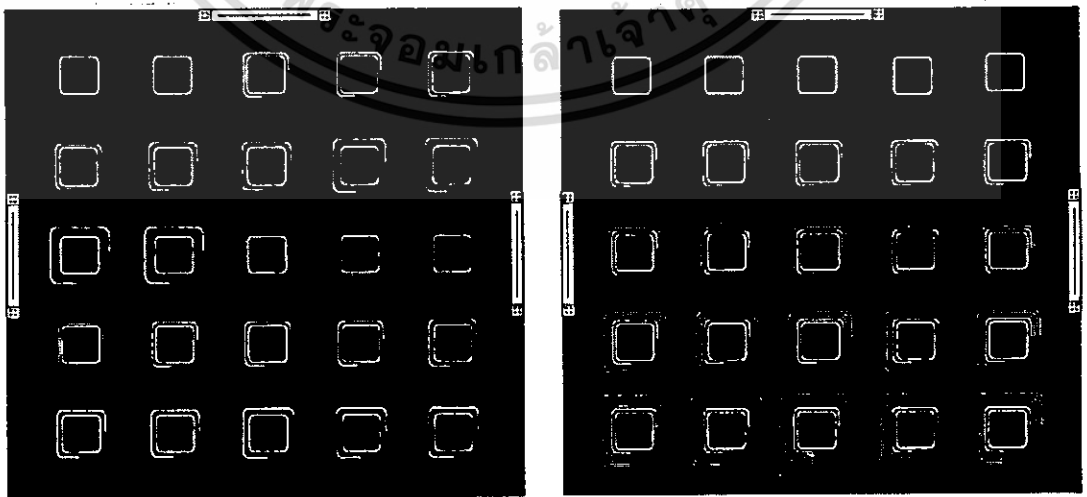
จากสมการดังกล่าวพบว่ากระแส I นั้นจะแปรผันกับ I_0 , V_A และ T ซึ่งจะเห็นว่า V_A และ T ไม่ใช่ผลของการปรับเปลี่ยนโครงสร้างจึงต้องพิจารณา I_0 และ I_0 จะมีพารามิเตอร์ที่สำคัญต่อโครงสร้างคือ A , L_p และ L_n ซึ่งหมายถึง พื้นที่ของรอยต่อ ระยะเวลาแพร่ของอิเล็กตรอนและ โฮลตามลำดับ ดังนั้นจึงนำพารามิเตอร์เหล่านี้มาใช้ในการพิจารณาในการออกแบบ

ออกแบบโครงสร้างของไดโอดและทำการถ่ายลงฟิล์มแล้วนำมาติดบนกระจกโฟโตมาส์ก กระจกกันแบบทั้งหมดมี 3 มาส์กคือ

- มาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ
- มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ
- มาส์กที่ 3 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม

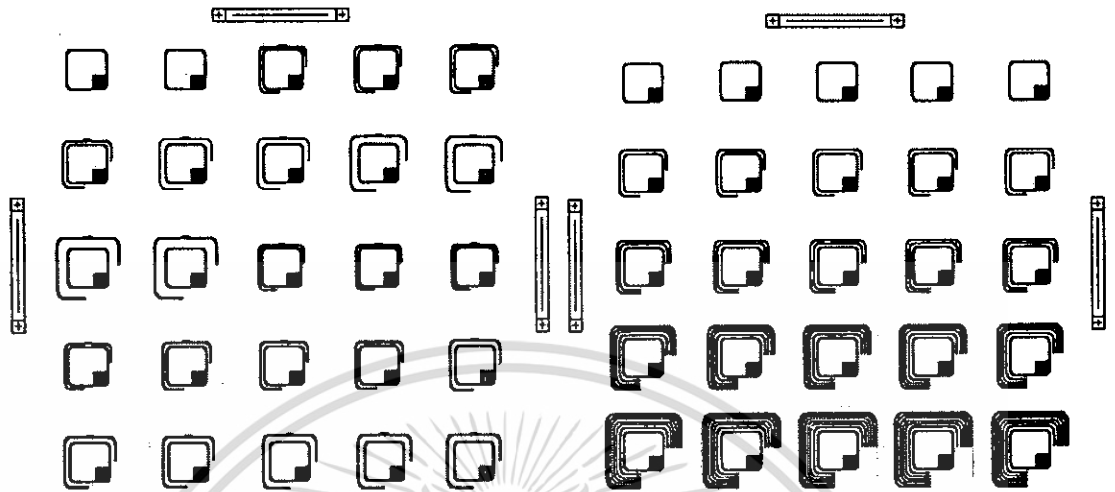


รูปที่ 3.1 ลักษณะมาส์กที่ 1 เปิดช่องออกไซด์สำหรับแพร่สารเจือ



รูปที่ 3.2 ลักษณะ มาส์กที่ 2 เปิดช่องออกไซด์สำหรับทำขั้วโลหะ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของบริษัทฯ เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ลักษณะมาส์กที่ 3 สร้างลวดลายอะลูมิเนียม

โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์ดริงหมวดต่างๆ

หมวดที่ 1 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตร มีความกว้างของอาร์ดริง 100 ไมโครเมตร

- A1 ไม่มีอาร์ดริง
- B1 ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์ดริงเท่ากับ 30 ไมโครเมตร
- C1 ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์ดริงเท่ากับ 50 ไมโครเมตร
- D1 ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์ดริงเท่ากับ 100 ไมโครเมตร
- E1 ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์ดริงเท่ากับ 200 ไมโครเมตร
- F1 ระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์ดริงเท่ากับ 300 ไมโครเมตร

หมวดที่ 2 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์ดริงเท่ากับ 100 ไมโครเมตร

- A2 ไม่มีอาร์ดริง
- B2 มีความกว้างของอาร์ดริง 30 ไมโครเมตร
- C2 มีความกว้างของอาร์ดริง 50 ไมโครเมตร
- D2 มีความกว้างของอาร์ดริง 100 ไมโครเมตร
- E2 มีความกว้างของอาร์ดริง 200 ไมโครเมตร
- F2 มีความกว้างของอาร์ดริง 300 ไมโครเมตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมวดที่ 3 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับการ์ดริง เท่ากับ 100 ไมโครเมตร ที่การ์ดริงในวงที่ 1 และวงถัดไปมีค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร

- A3 ไม่มีการ์ดริง
- B3 มีการ์ดริง 1 วง
- C3 มีการ์ดริง 2 วง
- D3 มีการ์ดริง 4 วง

3.2 กระบวนการสร้างซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริง

ปัจจุบันโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ได้รับการพัฒนามาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยี ที่ต้องการความรวดเร็วในการทำงานสูง ประสิทธิภาพในการใช้งานที่ดีและมีราคาถูกลง เราจึงนำซิลิคอนมาเป็นวัตถุดิบในการสร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n โฟโตไดโอดเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ที่ใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์รับแสง เมื่อถูกแสงจะทำให้เกิดกระแสไหลหรือเปลี่ยนแปลงขนาดของกระแสที่ไหล ซึ่งจะใช้เป็นตัวตรวจจับการเปลี่ยนแปลงของแสงหรือโฟโตเซนเซอร์ (Photo Sensor)

3.2.1 แผ่นผลึกที่ใช้สร้างโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

การสร้างโฟโตไดโอด และอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำประเภทต่างๆ ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของแผ่นผลึกโดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ดังนี้ จะต้องเป็นแผ่นผลึกรูปเดี่ยว ชนิดของสารเจือในแผ่นผลึก ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ ความหนาของแผ่นผลึก และระนาบของแผ่นผลึก

1 ระนาบของผลึก (Orientation)

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

2 ขั้นตอนการเตรียมฐานรอง

โดยเริ่มต้นการเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิด i ระบาย (111) ความหนาของแผ่น ซิลิคอน ประมาณ 500 ไมครอน และมีสภาพด้านทาน 2,000 โอห์ม-เซนติเมตร การตัดแบ่งแผ่นซิลิคอน จะใช้ใบเลื่อยชนิดพิเศษที่เรียกว่า Diamond-edged saw การลดความคมของแผ่นซิลิคอน โดยการใช้ผงขัดของ ซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) ซึ่งซิลิคอนคาร์ไบด์ (SiC) มีหลายเบอร์หลายขนาดดังนี้

600 เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 ไมครอน

1000 เส้นผ่านศูนย์กลาง 16 ไมครอน

2000 เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.9 ไมครอน

4000 เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 ไมครอน

สุดท้ายใช้ผงอลูมินา (Al_2O_3) ขัดเพื่อให้เป็นเงาคล้ายการระจก โดยผงอลูมินามีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 ไมครอน และ 0.05 ไมครอน

3.2.2 การทำความสะอาดผิวซิลิคอน

การทำความสะอาดมี 2 ขั้นตอนด้วยกัน คือ

- กรทำความสะอาดครั้งแรก เพื่อดังสิ่งแปลกปลอมที่ติดค้างอยู่บนแผ่นซิลิคอน
- การทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นมาตรฐาน เพื่อทำความสะอาดผิวหน้าแผ่นซิลิคอน และกำจัดไขมัน และสิ่งแปลกปลอม

3.2.3 การออกซิเดชัน

ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นสารที่มีคุณสมบัติเป็นฉนวนลักษณะโปร่งแสง ใช้เป็น Field Oxide , ใช้เป็น MASK ในกระบวนการ Lithography , ใช้เป็น MASK ในกระบวนการแพร่สารเจือโดยควบคุมการแพร่ของสารเจือให้เข้าไปในบริเวณที่ต้องการเท่านั้น ใช้เป็นสารเคลือบผิวหน้าเพื่อปกป้องผิวหน้าของ Si และ Thermal Oxidation คือ การก่อตัวของ SiO_2 บนพื้นผิว Si โดยที่ Si อยู่ในบรรยากาศของ O_2 หรือ H_2O ที่อุณหภูมิสูง ซึ่งระบบของการออกซิเดชันด้วยความร้อนมีอุปกรณ์ในระบบส่วนใหญ่โดยหลักคือ

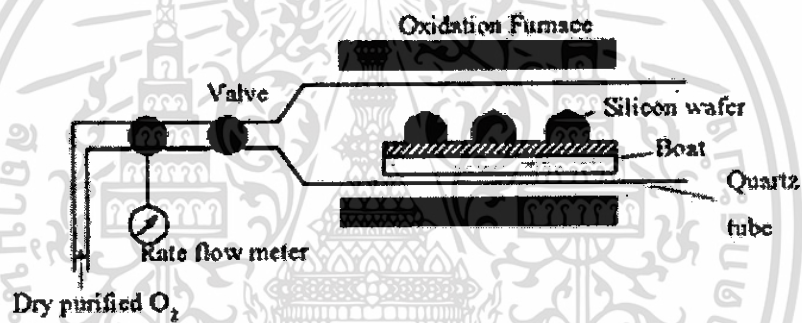
1. Oxidation Furnace
2. Boat
3. Quartz Tube ซึ่งส่วนปลายจะต่อกับระบบก๊าซ
4. ตัววัดอุณหภูมิ Pt / Pt-Rh
5. ระบบควบคุมอุณหภูมิ ความดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

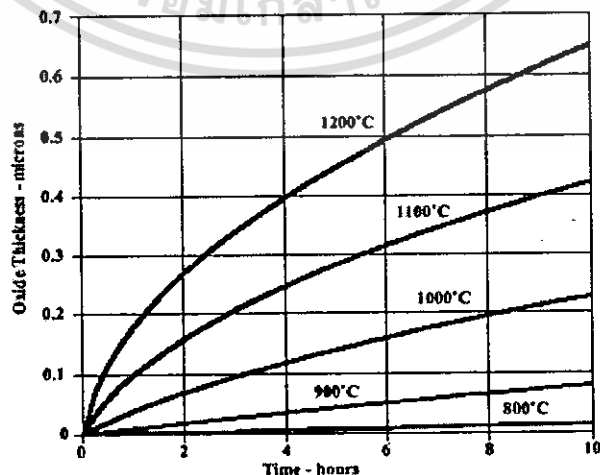
เตาสำหรับ Oxidation สามารถควบคุมอุณหภูมิได้อย่างแน่นอน (ผิดพลาด $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$) เตาดังกล่าวนี้จะแบ่งออกเป็น 3 หรือ 4 ตอน แต่ละตอนสามารถควบคุมอุณหภูมิได้โดยไม่เกี่ยวข้องกันและการสร้างชั้น (SiO_2) ทำได้ 2 ลักษณะ คือ

1. กระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง (Dry Oxidation Process)

เป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นระหว่างอะตอมของผลึกซิลิคอนและอะตอมของก๊าซออกซิเจนบริสุทธิ์ ที่อุณหภูมิสูงประมาณ 1100°C ทำให้อะตอมของซิลิคอนรวมตัวกับออกซิเจนเกิดเป็นสารประกอบชนิดใหม่คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งมีสมการเคมีดังนี้



รูปที่ 3.4 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบแห้ง



รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ (Dry)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

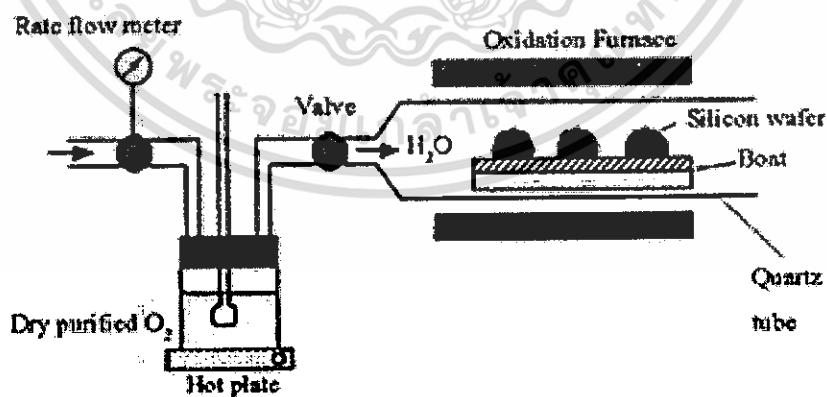
จากกราฟดังกล่าวนี้ ทำให้เราสามารถควบคุมความหนาของชั้น SiO_2 ได้โดยการควบคุมอุณหภูมิภายในเตา และเวลาที่ใช้ในการออกซิเดชัน นอกจากนี้แล้วปริมาณของก๊าซออกซิเจนจะต้องมีมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยากับซิลิคอน ลักษณะพื้นผิวของออกไซด์ที่ได้ค่อนข้างเรียบกว่าแบบ Wet Oxidation แต่ปฏิกิริยาการเกิดซ้ำ และอัตราการเกิดต่ำกว่า

2. กระบวนการออกซิเดชันแบบไอน้ำอิ่มตัว (Wet Oxidation Process)

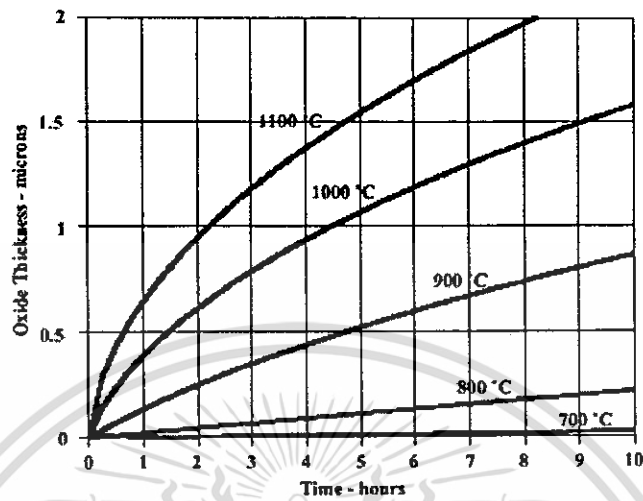
เป็นปฏิกิริยาระหว่างอะตอมของซิลิคอนกับอะตอมของออกซิเจนในไอน้ำ ซึ่งมีปฏิกิริยาทางเคมีแสดงได้โดยสมการ



การออกซิเดชันแบบไอน้ำอิ่มตัวนี้ จะกล่าวเฉพาะเทคนิคที่ใช้ระบบไอน้ำคือ ระบบไอน้ำ (Steam System) เป็นวิธีการปล่อยก๊าซออกซิเจนที่บริสุทธิ์เข้าไปในขวดแก้ว (bubbler) ซึ่งบรรจุน้ำบริสุทธิ์ไว้ น้ำในขวดแก้วจะถูกทำให้ร้อนแต่มีค่าต่ำกว่าจุดเดือดราว $90-95^\circ\text{C}$ ท่อก๊าซออกซิเจนจะถูกจุ่มลงในน้ำบริสุทธิ์ซึ่งร้อน ทำให้เกิดฟองอากาศผุดขึ้น ซึ่งฟองอากาศที่ผุดขึ้นมานี้ก็คือก๊าซออกซิเจนซึ่งอิ่มตัว (มีไอน้ำด้วย) และจะถูกทำให้ไหลผ่านเข้าไปในช่องควอทซ์ ระหว่างทางออกของก๊าซในขวดแก้วและท่อควอทซ์ของเตาออกซิเดชันที่ไม่ควรอยู่ใกล้กัน เพราะอาจเกิดการกลั่นตัวของไอน้ำเป็นหยดน้ำได้ ซึ่งควรหลีกเลี่ยงไม่ให้เกิดกรณีเช่นนี้ได้



รูปที่ 3.6 แผนภาพกระบวนการออกซิเดชันแบบไอน้ำอิ่มตัว



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาและเวลาการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิต่างๆ (Wet)

การเกิดปฏิกิริยาเช่นนี้เร็วกว่าแบบ Dry Oxidation ทั้งนี้เนื่องจากโมเลกุลของน้ำเล็กกว่าโมเลกุลของออกซิเจน จึงทำให้อะตอมของซิลิคอนเกิดปฏิกิริยากับไอน้ำได้เร็วกว่า แต่ข้อเสียของปฏิกิริยาแบบ Wet Oxidation คือคุณสมบัติในการเป็นฉนวนที่ไม่ดี จึงมีประสิทธิภาพในการต้านทานการแพร่ตัวของอะตอมสารเจือปนน้อยกว่า สภาพผิวผลึกที่ได้ไม่สมบูรณ์คือ เกิดการบิดเบือนของผลึก (Crystal dislocation) เกิดมีรูพรุนขึ้น ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากตัวไฮโดรเจนที่เหลือจากโมเลกุลของไอน้ำ

3.2.4 การเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ผิวหน้า (Photolithography)

ภายหลังจากผ่านขบวนการออกซิเดชันจะเกิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เคลือบผิวซิลิคอนทั้งหมดเพื่อป้องกันไม่ให้อะตอมสารใดเข้าไปถึงซิลิคอนได้ ดังนั้นจึงต้องทำการเปิดช่องออกไซด์นี้ออก เพื่อแพร่สารเจือปนขบวนการนี้ว่า Photolithography หรือ Photo-etching

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

1. สารไวแสงแบบลบ (Negative Photo Resist) จะใช้ Way coat สารไวต่อแสงชนิดนี้เมื่อถูกแสงจะเกาะติดกับผิวของแผ่นผลึกแน่น ไม่ยอมละลายในน้ำยาล้าง (Developer)
2. สารไวแสงแบบบวก (Positive Photo Resist) จะใช้ AZ และมีคุณสมบัติตรงข้ามกับแบบที่ 1 กล่าวคือ เมื่อถูกแสงจะมีคุณสมบัติละลายความเหนียว และหลุดออกจากผิวแผ่นผลึกได้โดยง่ายเมื่อล้างด้วยน้ำยา Developer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.5 การฉายแสง (Exposure)

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

Negative resist ไวต่อสเปกตรัม 405 nm

Positive resist ไวต่อสเปกตรัม 365 nm

3.3.6 การแพร่สารเจือ (Diffusion)

การเติมสารเจือลงในแผ่นผลึกซิลิกอน สามารถกระทำได้โดยการแพร่ (Diffusion) ปกติการแพร่หมายถึงการเคลื่อนที่ของอนุภาคจากบริเวณที่มีความเข้มข้นสูงไปสู่บริเวณที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งเป็นการแพร่ภายในของแข็ง (Solid state diffusion) จะเกิดขึ้นในสภาวะอุณหภูมิสูงๆ (900 - 1200° C) จะถูกกำหนดได้ด้วยค่าสัมประสิทธิ์ของการแพร่ (Diffusivity ;D) ตามสมการที่ 3.2

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

โดยที่ q คือขนาดของประจุของอิเล็กตรอน

k คือค่าคงตัวของโบลต์ซมันน์

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์

μ คือค่าความคล่องตัวของอนุภาค

1. กลไกของการแพร่ (Diffusion mechanism)

1.1 การแพร่เข้าไปแทนที่ (Substitutional diffusion)

การแพร่แบบนี้เป็นการแทนที่อะตอมของซิลิกอนและเมื่อการแพร่ยังดำเนินต่อไปนั้น อะตอมสารเจือจะเคลื่อนที่เข้าไปแทนที่อะตอมของซิลิกอนซึ่งอยู่ใกล้และว่างอยู่ดั่งรูป การแพร่ดังกล่าวนี้จะเกิดในกรณีของการแพร่อะตอมสารเจือ เช่น โบรอน ฟอสฟอรัส และสารหนู

1.2 การแพร่เข้าไปอยู่ระหว่างอะตอม (Interstitial diffusion)

การแพร่แบบนี้มักเกิดขึ้นในกรณีที่เป็นการแพร่ของไอออนโลหะของธาตุที่หนัก เช่น ทองคำ นิเกิล เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากขนาดอะตอมของสารเจือมีขนาดใหญ่กว่าอะตอมของสารกึ่งตัวนำ อะตอมสารเจือนี้สามารถที่จะเคลื่อนที่ต่อไปได้เมื่อได้รับพลังงานมากกว่าค่าแพนดักซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2 เทคนิคการแพร่สารเจือ

สำหรับเทคนิคการแพร่สารเจือกระทำสองขั้นตอน ทั้งนี้ก็เพื่ออำนวยความสะดวกและแก้ไขให้การกระจายของสารเจือเป็นไปตามต้องการอย่างมีประสิทธิภาพโดยที่

ขั้นที่ 1 เรียกว่า กระบวนการ deposition กระทำโดยการแพร่สารเจือในเงื่อนไขที่ว่ามีค่าจำกัด (คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน เนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1) การแพร่ขั้นนี้ทำให้ช่วงเวลาสั้น ๆ และอุณหภูมิไม่สูงนัก (ราว 1000°C)

ขั้นที่ 2 เรียกว่า กระบวนการ drive in ในขั้นนี้จำนวนอะตอมสารเจือที่ผิวจะถูกควบคุมให้มีค่าจำกัด (คือปริมาณที่แพร่เข้าไปในซิลิคอน เนื่องจากการแพร่ในขั้นที่ 1) การแพร่ขั้นนี้ทำให้ อุณหภูมิสูงกว่าขั้นแรก คือ (1200°C) และสามารถควบคุมการกระจาย และความลึกในการแพร่ของสาร โดยควบคุมเวลาในการแพร่ นอกจากนี้ขณะที่ทำการแพร่ก็จะทำการออกซิเดชันไปพร้อม ๆ กัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดชั้นของออกไซด์เคลือบที่ผิวนอกสุดของแผ่นผลึก ซึ่งเป็นการช่วยป้องกันไม่ให้อะตอมสารเจือแพร่ออกมาจากแผ่นผลึก (out diffusion)

3.2.7 กระบวนการเมทัลไลเซชัน

เมื่อสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ จนได้ชิ้นส่วนต่างๆครบแล้ว แต่ส่วนต่างๆเหล่านี้ยังแยกกันอยู่ทางไฟฟ้า จึงจำเป็นต้องต่อส่วนต่างๆเหล่านี้เข้าด้วยกันตามโครงสร้างที่ออกแบบไว้ จึงจะได้ อุปกรณ์ที่สมบูรณ์ โดยการสร้างรอยต่อสัมผัสโอห์มมิก (Ohmic Contact) เงื่อนไขการเลือกใช้สารโลหะในกระบวนการเมทัลไลเซชัน

- รอยต่อสัมผัสกับผิวซิลิคอนมีค่าความต้านทานไฟฟ้าต่ำ
- มีค่าความนำไฟฟ้าสูง
- ทำให้ติดแน่นกับผิวของซิลิคอน ไดออกไซด์
- ภาพแบบแผนจะต้องทำให้มีความคมชัด
- สามารถต่อเข้ากับลวดลายความนำภายนอกได้ดี

3.2.8 กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering)

เพื่อสร้างรอยสัมผัสโอห์มมิกระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอน และทำให้เกิดส่วนอัลลอยระหว่างอะลูมิเนียม และซิลิคอนขึ้นในขณะเดียวกันโดยการนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในเตาแพร่สารในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1000 ซีซี / นาที เป็นเวลา 12 นาที ที่อุณหภูมิ 500°C

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

1. การเตรียมแผ่นซิลิกอน และการตรวจสอบคุณสมบัติ

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

2. ทำความสะอาดผิว

- Ultrasonic ในน้ำ DI (น้ำบริสุทธิ์) 2 นาที (เพื่อกำจัดฝุ่นละออง)
- ล้างในน้ำ DI เป่าแห้งด้วยก๊าซ (N_2)
- ต้มใน HNO_3 $\cong 10$ นาที (เพื่อกำจัดโลหะหนัก เช่น เศษ Si)
- ล้างในน้ำ DI
- ต้มน้ำ DI (I) 5 นาที
- ต้มน้ำ DI (II) 5 นาที
- ล้าง ในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย N_2

3. ทำความสะอาดผิวด้าน

- ต้มใน Trichol 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
- ต้มน้ำ DI (I)
- ต้มน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2

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

- Dry ด้วย O_2 1200 cc / min 1 ชั่วโมง
- Wet ด้วย O_2 1000 cc / min 2.5 ชั่วโมง
- Dry ด้วย O_2 1200 cc / min 1 ชั่วโมง

6. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

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

7. การสกัดชั้นออกไซด์ (Oxide etching) , (ด้านหลัง)

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

8. ลอกฟิล์ม (ด้านหลัง)

- ดมใน H₂SO₄ (I) 5 นาที
- ดมใน H₂SO₄ (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI
- ดมในน้ำ DI (I) 5 นาที
- ดมในน้ำ DI (II) 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วย N₂

9. ทำความสะอาดผิวหน้า (ด้านหลัง)

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

10. Slice etching (ด้านหลัง)

- จุ่มใน HF 5 % 11 วินาที
- 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)
- เป่าแห้งด้วย N₂

13. ทำความสะอาดผิว (ด้านหลัง)

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

14. Drive – in (ด้านหลัง)

- Drive – in (Phosphorus) 1000°C
- Dry O₂ 1200 cc / min.

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

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ 120°C 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยกร (spin) 5000 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 N₂
- นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ 120°C 10 นาที (post bake)
- เคลือบฟิล์มด้านหลัง
- นำแผ่นไปอบที่อุณหภูมิ 90°C 30 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

19. Slice etching

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

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

- Pre – dep 1000°C ด้วย N_2 1000 cc/min , 30 นาที

21. ลอกชั้น Pre – deposition , Boron

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

22. ทำความสะอาดผิว (ด้านหน้า)

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

23. Drive - in

- Drive - in (Boron) $1100^\circ C$
- ด้วย O_2 (Dry) 1200 cc / min.

24. Photo Mask # 2 (contact window)

- อบแผ่นที่อุณหภูมิ $120^\circ C$ 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin) 5000 rpm.
- อบแผ่นที่อุณหภูมิ $90^\circ C$ 30 นาที (prebake)
- Alignment Expose
- Developer ฟลิ้มโดย
- AZ Developer (I) 30 นาที
- AZ Developer (II) 30 นาที
- ล้างในน้ำ DI (I)
- ล้างในน้ำ DI (II)
- เป่าแห้งด้วย N_2
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $85^\circ C$ 30 นาที

25. Oxide etching

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

26. ลอกฟิล์ม

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

27. ทำความสะอาดผิวหน้า

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

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

29. Photo Mask # 3 (contact mask)

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ) ด้วยการ (spin) 5000 rpm.
- อบฟิล์มที่อุณหภูมิ $85^{\circ}C$ 20 นาที (perbake)
- 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 $85^{\circ}C$ 30 นาที

30. Al etching

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

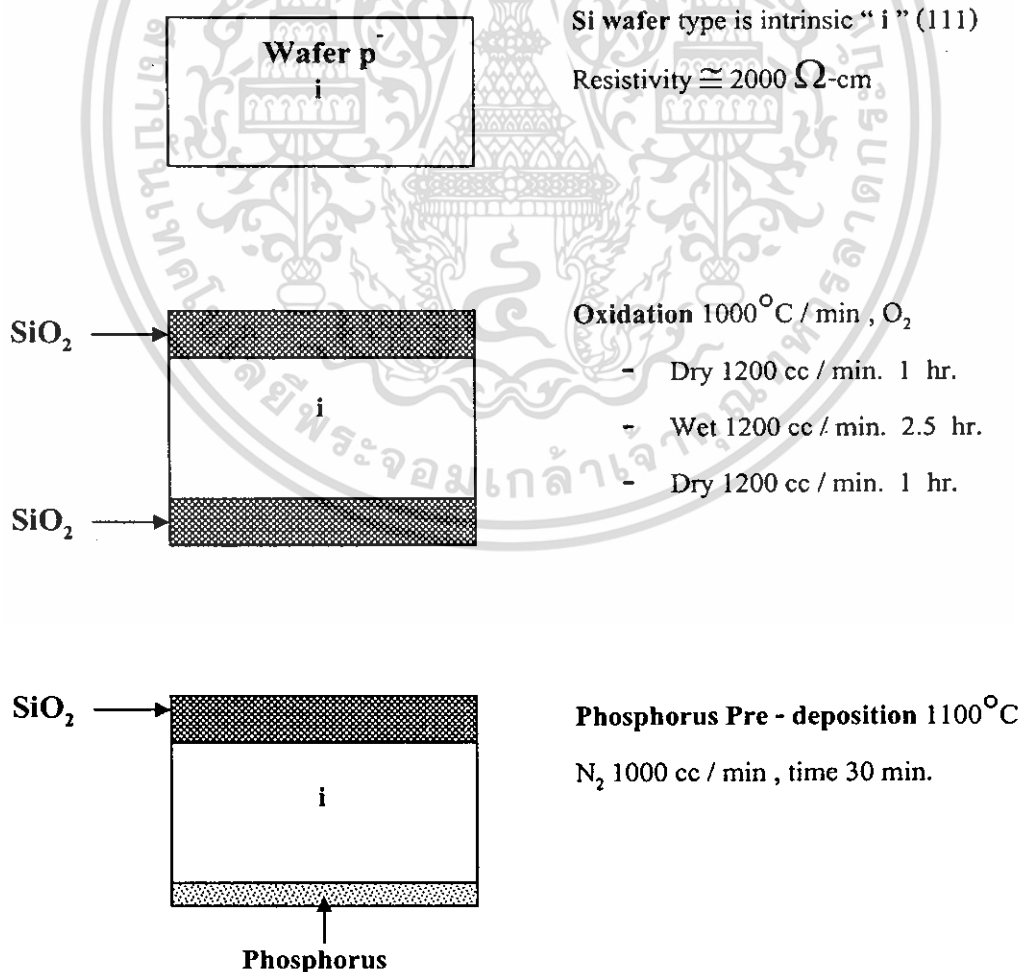
31. ลอกฟิล์ม

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

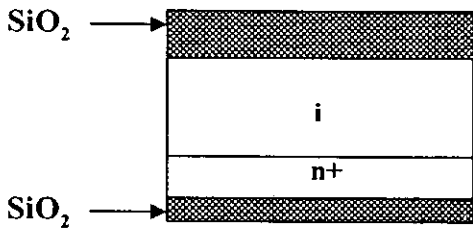
32. Sintering $500^\circ C$

- Dry N_2 1000 cc / min 12 นาที

โดยลำดับขั้นตอนการสร้างซิลิคอนไฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์คริง แสดงดังนี้

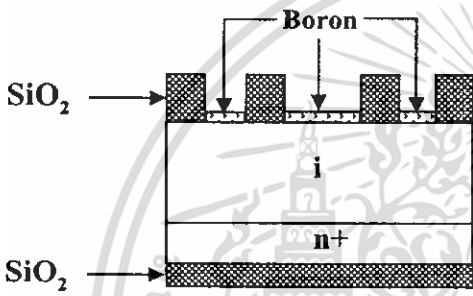


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Drive – in 1100°C , O₂

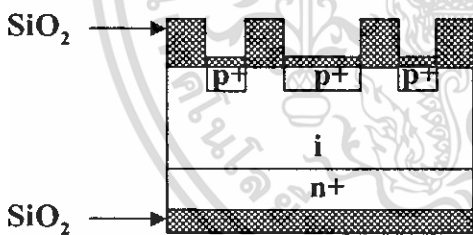
Dry 1200 cc / min , time 3-7 hr.



Mask # 1 Boron diffusion

Boron predeposition 1100 °C

N₂ 1000 cc / min , time 30 min.



Drive – in 1100°C , O₂

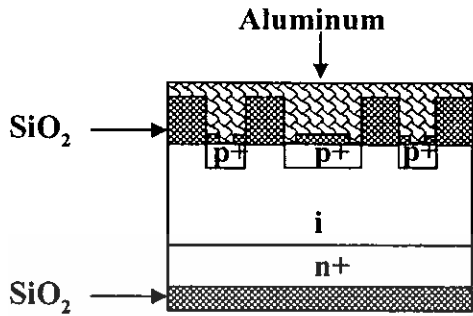
Dry 1200 cc / min , time 30-70 min.



Mask # 2 Contact window

Oxidation – etching

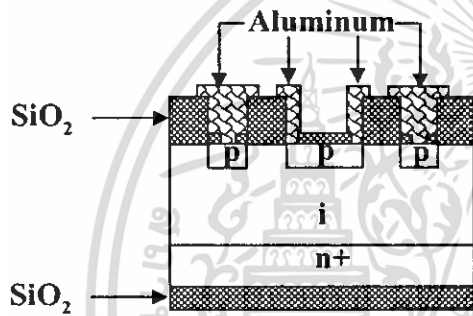
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Metallization

Aluminum Evaporation

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



Mask # 3 Contact mask

Al - etching 40°C , 10-20 sec.

Sintering 500°C , N_2 1000 cc / min. ,
time 12 min.

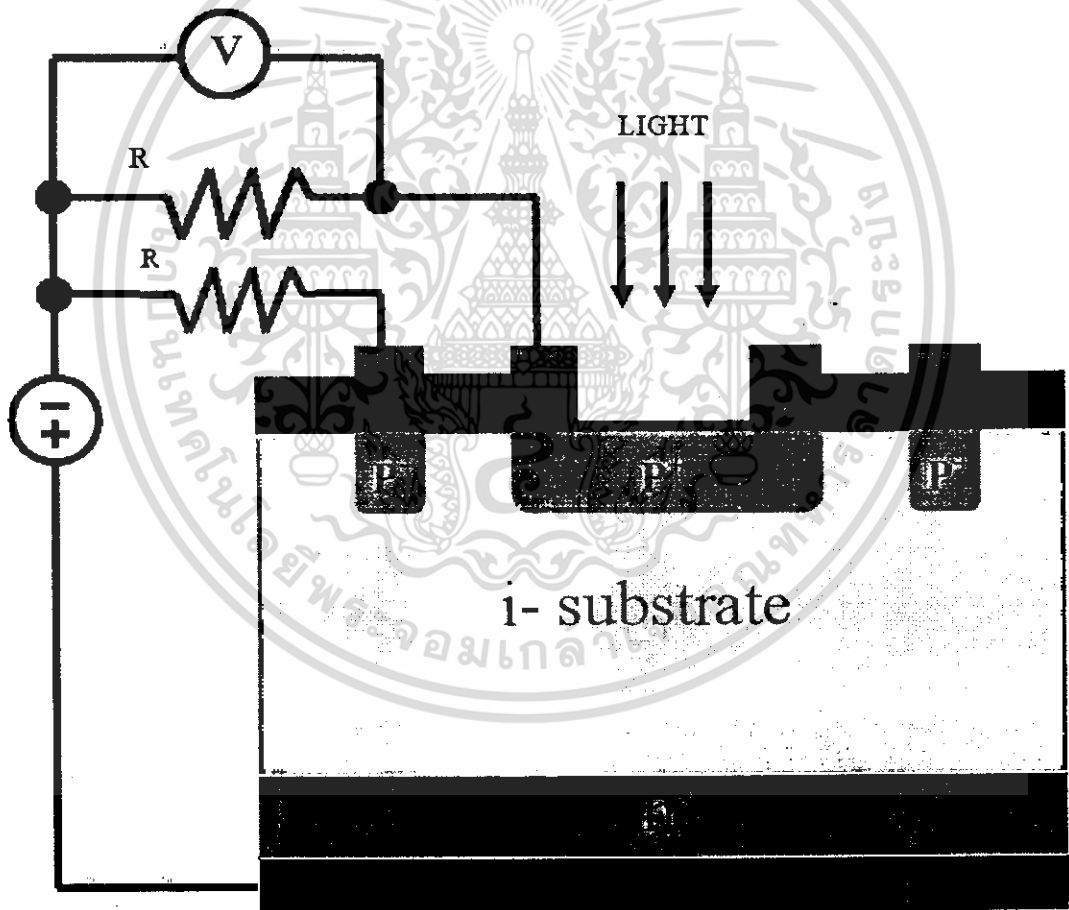
รูปที่ 3.8 กระบวนการสร้างขั้วคอนโพโดไดโอดแบบ p-i-n ที่มีคาร์ดริง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การทดลองหาค่าคุณสมบัติพื้นฐานของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีกั้วตรง

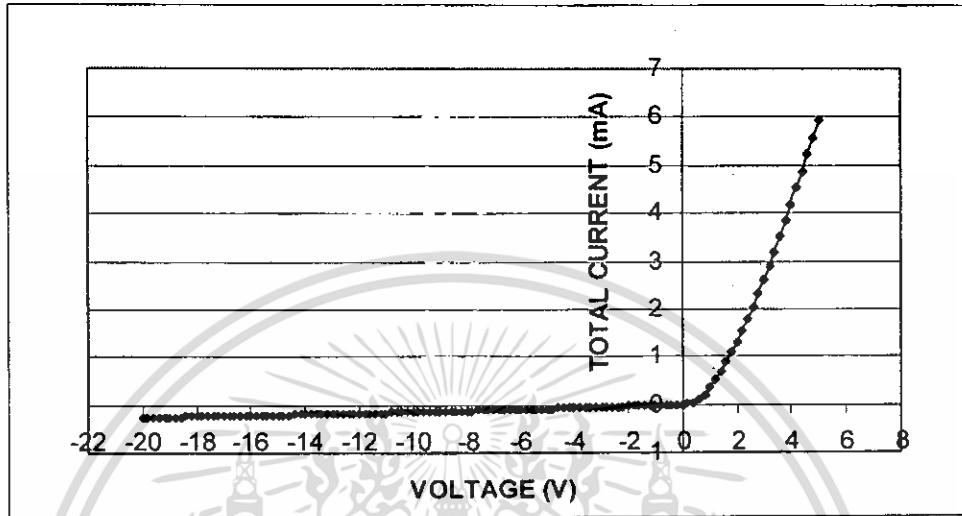
เพื่อศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n จึงนำโฟโตไดโอดที่สร้างไปทำการวัดผลหาค่าคุณสมบัติความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของโฟโตไดโอดโดยมีวงจรที่ใช้ในการวัดดัง รูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 วิธีการวัดหาค่าคุณสมบัติกระแสของ p-i-n โฟโตไดโอดที่มีกั้วตรง

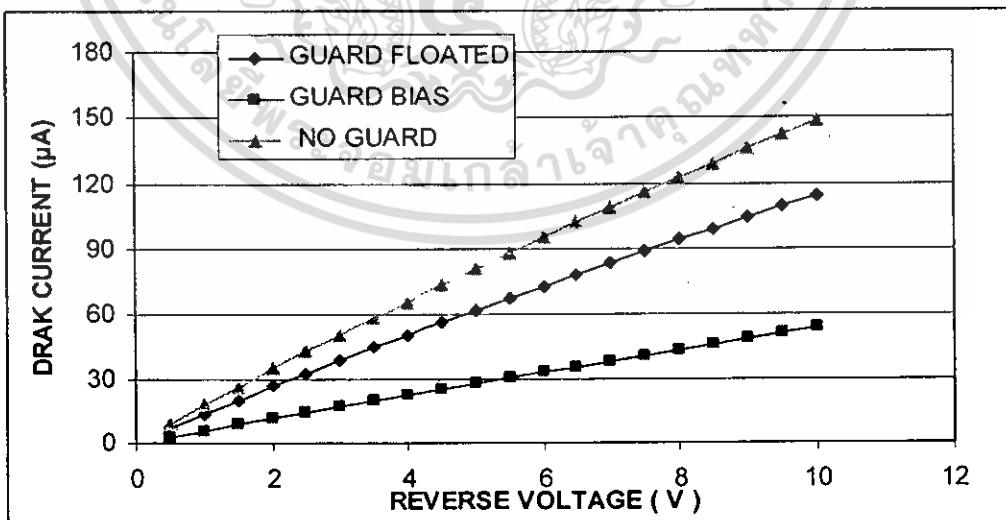
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีการ์ดริง
 กราฟที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่มีการ์ดริง



จากกราฟจะเห็นได้ว่าได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกโพเนนเชียลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ

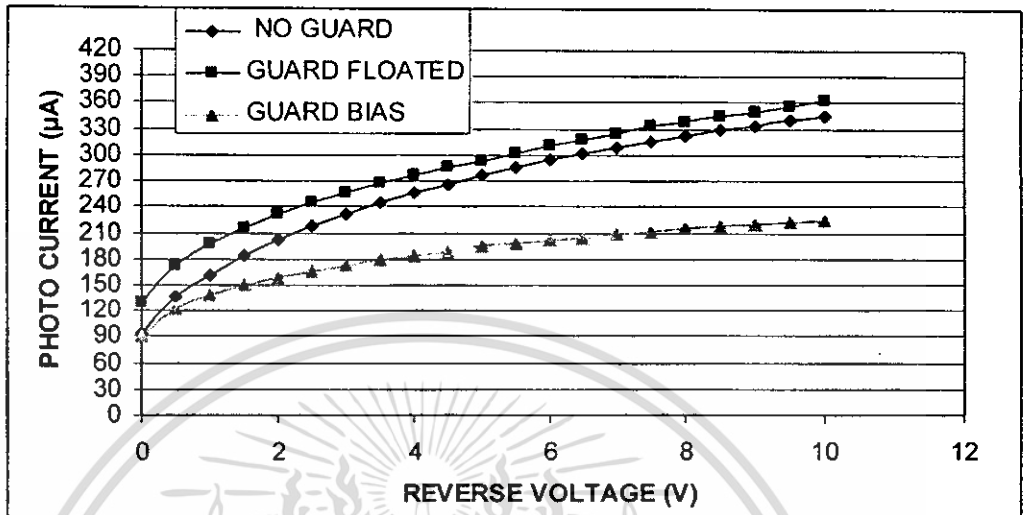
4.1.2 ศึกษาผลของการ์ริงของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n
 กราฟที่ 2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสย้อนกลับกับกระแสมืด



จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อเราไบอัสการ์ริง จะทำให้กระแสมืดต่ำ ส่วนที่ไม่มีการ์ริงและมี
 การ์ริงแต่ไม่ได้ไบอัส ก็จะมีกระแสมืดสูงใกล้เคียงกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

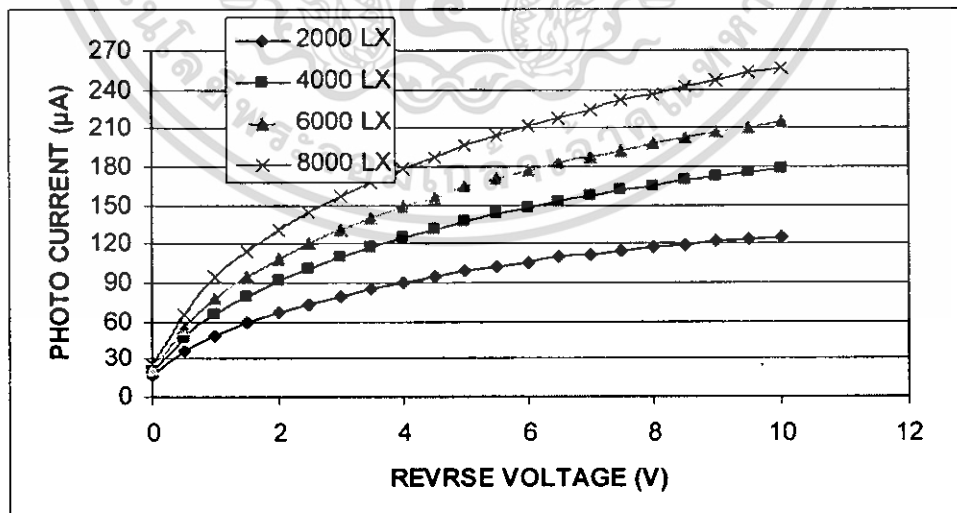
กราฟที่3 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสย้อนกลับกับกระแสแสง



จากกราฟจะเห็นว่ากรริ่งที่ทำการไบอัสจะมีกระแสแสงต่ำกว่ากรริ่งที่ปล่อยลอยไว้ และซิลิกอนโฟโตไดโอดที่ไม่มีกรริ่ง

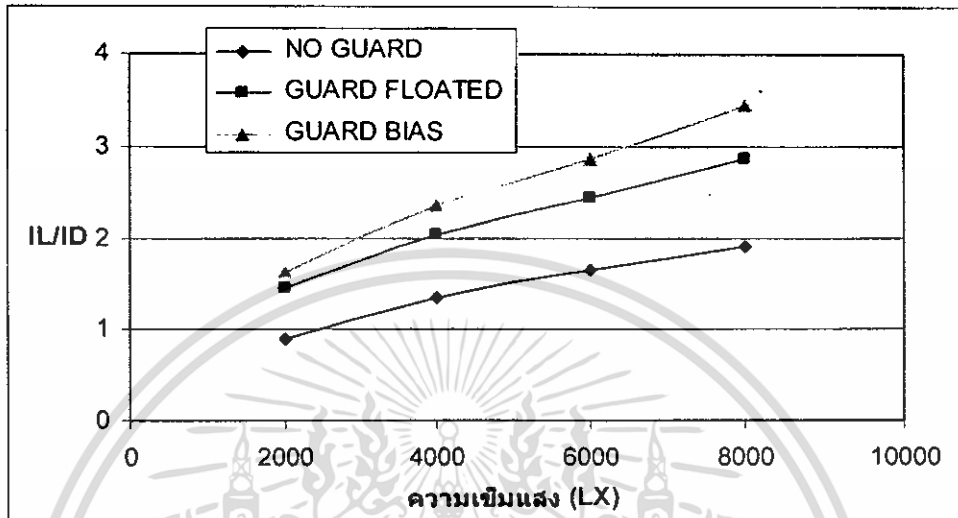
4.1.3 ศึกษาผลการตอบสนองทางแสงของของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่ความเข้มแสงต่างๆ

กราฟที่4 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันกับกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n ที่ทำการไบอัสกรริ่งที่ความเข้มต่างๆ (LX)



จากกราฟเมื่อมีความเข้มแสงเพิ่มขึ้นก็จะทำให้มีกระแสแสงสูงขึ้น

กราฟที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืด กับความเข้มแสงต่างๆ (LX) ของโฟโตไดโอดชนิด p-i-n

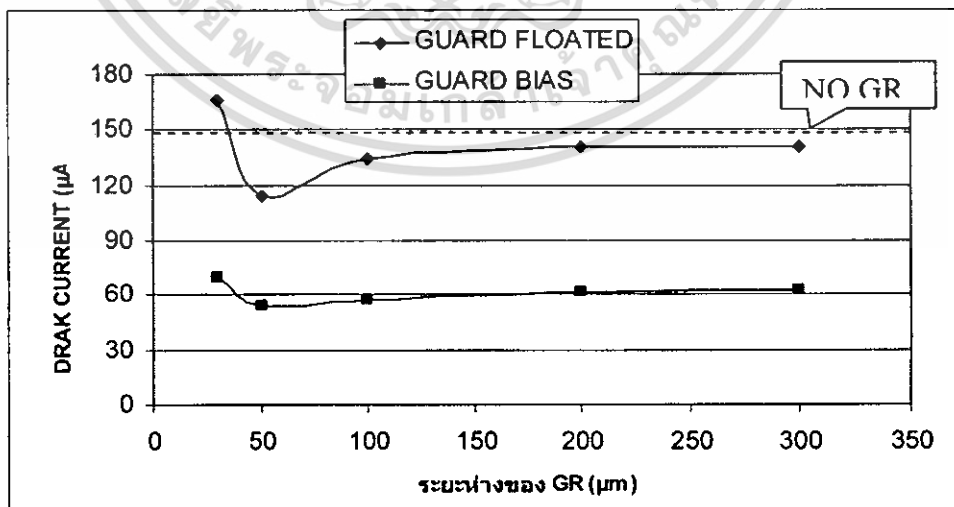


จากกราฟเมื่อไบอัสการ์ดริงจะมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดสูงกว่าการ์ดริงที่ปล่อยลอยไว้ และไม่มีการ์ดริง

4.2 การทดลองหาค่าคุณสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีการ์ดริงที่เงื่อนไขต่างๆ

4.2.1 หมวดที่ 1 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตร มีความกว้างของการ์ดริง 100 ไมโครเมตร โดยมีแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 โวลต์

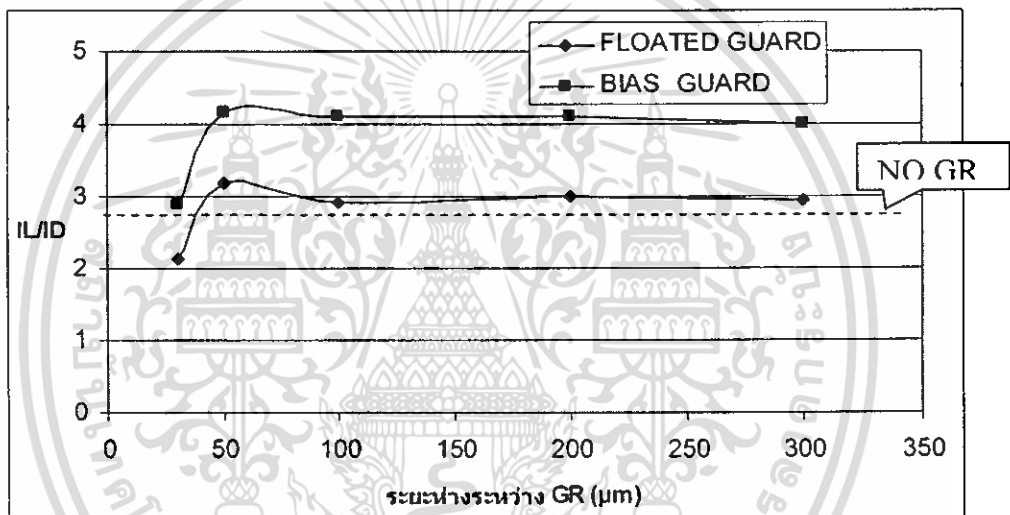
กราฟที่ 6 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับการ์ดริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

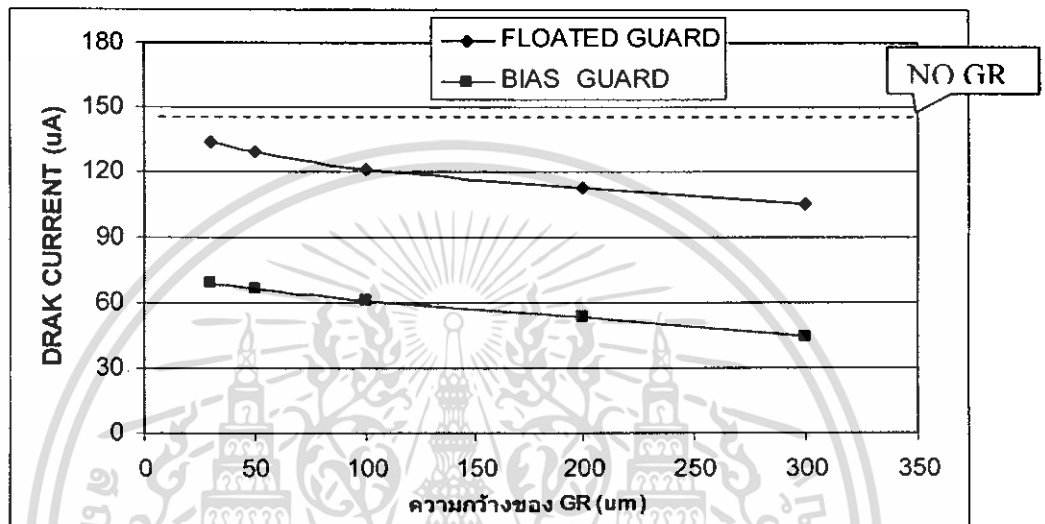
จากกราฟจะเห็นได้ว่าระยะห่างที่ 30 ไมโครเมตรจะมีกระแสมืดมากกว่าที่ระยะห่างอื่นๆ และที่ระยะห่าง 50 ไมโครเมตรก็จะมีกระแสมืดต่ำที่สุด ส่วนที่ระยะห่างอื่นๆก็จะมีค่าของกระแสมืดใกล้เคียงกัน และจากกราฟซิลิกอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ไบอัสการ์ดจริงจะมีกระแสมืดน้อยกว่าซิลิกอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ไม่ได้ไบอัสการ์ดจริง

กราฟที่ 7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมืดกับระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับการ์ดจริง



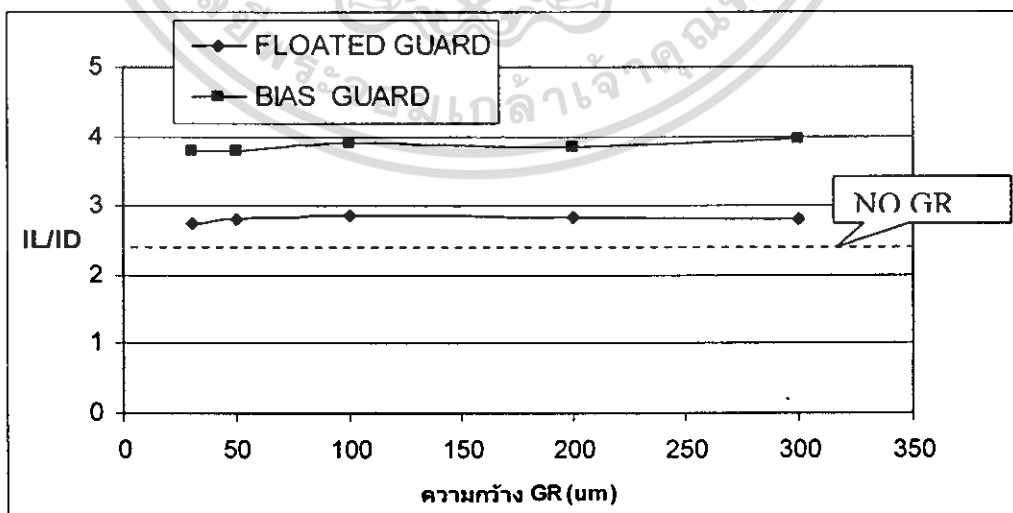
จากกราฟจะเห็นได้ว่าอัตราส่วนกระแสแสงกับกระแสมืดของซิลิกอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ไบอัสการ์ดจริงจะมีอัตราส่วนสูงกว่าซิลิกอนโฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่ไม่ได้ไบอัสการ์ดจริง

4.2.2 หมวดที่ 2 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับ การ์ดริง เท่ากับ 100 ไมโครเมตร โดยมีแรงดันไบอัสขั้วยกกลับเท่ากับ 10 โวลต์ กราฟที่ 8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสเมื่อดักกับระยะความกว้างของการ์ดริง



จากกราฟจะเห็นได้ว่าเมื่อความกว้างของการ์ดริงมีความกว้างมากขึ้นจะมีแนวโน้มของ กระแสเมื่อดักลดลง

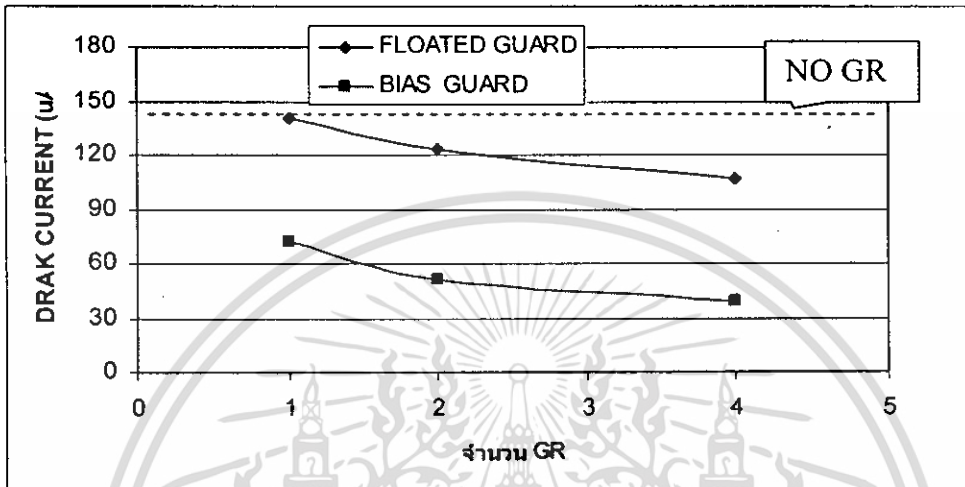
กราฟที่ 9 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสเมื่อดักกับระยะความกว้างของ การ์ดริง



จากกราฟจะเห็นได้ว่าการ์ดริงที่ไบอัสจะมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสเมื่อดักสูงกว่าการ์ด ริงที่ไม่ได้ทำการไบอัส

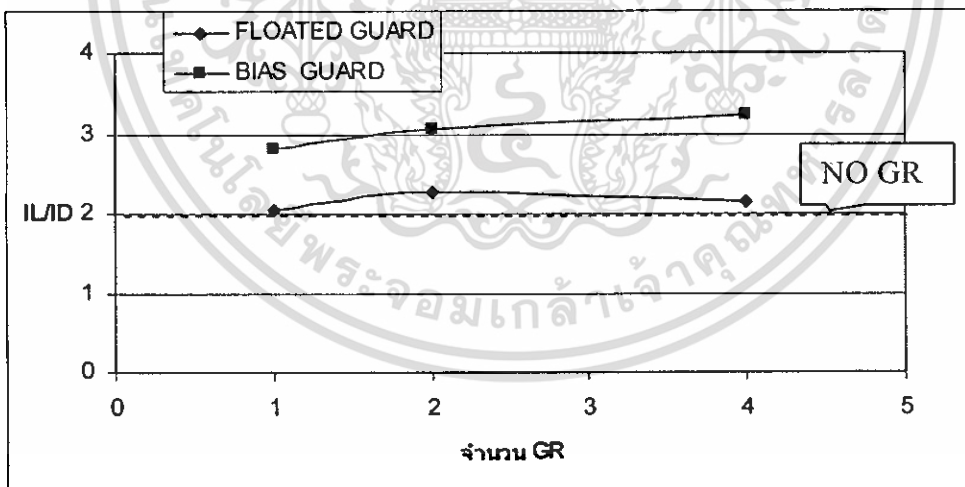
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 หมวดที่ 3 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตรมีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับการ์ดริง เท่ากับ 100 ไมโครเมตร ที่การ์ดริงในวงที่ 1 และวงถัดไปมีค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร
กราฟที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมีดกับจำนวนการ์ดริง



จากกราฟจะเห็นได้ว่าการ์ดริงที่ไบอัสจะมีกระแสมีดต่ำกว่าการ์ดริงที่ไม่ได้ไบอัส โดยมีแนวโน้มของกระแสมีดลดลงเมื่อมีจำนวนการ์ดริงเพิ่มขึ้น

กราฟที่ 11 แสดงความสัมพันธ์อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมีดกับจำนวนการ์ดริง



จากกราฟ เมื่อไบอัสการ์ดริงจะมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมีดสูงกว่าการ์ดริงที่ปล่อยลอยไว้

บทที่ 5

สรุปและวิจารณ์ผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์คริง โดยส่วนแรกนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติพื้นฐานของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์คริงจะเห็นได้ว่าได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้เกิดมีกระแสไหลผ่านรอยต่อเป็นจำนวนมากและกระแสนี้จะเปลี่ยนแปลงอย่างเอกไปแนนเชิลกับแรงดัน และในขณะที่ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสจำนวนน้อยไหลย้อนกลับผ่านรอยต่อ ต่อมาเป็นการศึกษาผลของการอาร์คริงกับกระแสมืด จากการวัดผลพบว่าเมื่อทำการไบอัสอาร์คริงก็จะมีกระแสมืดน้อยกว่าอาร์คริงที่ปล่อยลอยโดยจะมีอัตราส่วนลดลงครึ่งหนึ่ง และสุดท้ายเป็นการวัดคุณสมบัติของแสง โดยจากการวัดครั้งนี้พบว่าเมื่อมีความเข้มแสงมากขึ้นก็จะมีกระแสแสงเพิ่มขึ้น

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาคุณสมบัติของซิลิคอน โฟโตไดโอดแบบ p-i-n ที่มีอาร์คริงที่เงื่อนไขต่างๆ

หมวดที่ 1 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตรมีความกว้างของอาร์คริง 100 ไมโครเมตร โดยมีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์คริงเท่ากับ 30, 50, 100, 200, 300 ไมโครเมตร โดยมีแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 โวลต์ กรณีไม่ได้ไบอัสอาร์คริงที่ระยะห่างที่ 30 ไมโครเมตรจะมีกระแสมืดสูงมีค่าประมาณ 180 μA ซึ่งมีค่าสูงมากเมื่อเทียบกับระยะห่างอื่นๆเป็นเพราะอาร์คริงอยู่ใกล้กับพื้นที่รับแสงมากเกินไปจึงทำให้เกิดกระแสมืดมาก ส่วนที่ระยะห่าง 50 ไมโครเมตร จะมีกระแสมืดต่ำที่สุด โดยมีค่าประมาณ 110 μA และที่ระยะห่างอื่นๆ จะมีผลต่อกระแสมืด โดยมีค่าประมาณ 130 μA และเมื่อไบอัสอาร์คริงจะมีกระแสมืดลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง โดยที่ระยะห่างระยะห่างที่ 30 ไมโครเมตรจะมีกระแสมืดสูงสุดมีค่าประมาณ 80 μA ส่วนที่ระยะห่าง 50 ไมโครเมตร จะมีกระแสมืดต่ำที่สุด โดยมีค่าประมาณ 45 μA และที่ระยะห่างอื่นๆ จะมีผลต่อกระแสมืด โดยมีค่าประมาณ 60 μA

หมวดที่ 2 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับอาร์คริงเท่ากับ 100 ไมโครเมตร โดยมีความกว้างของอาร์คริง เท่ากับ 30, 50, 100, 200, 300 ไมโครเมตร มีแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 โวลต์ กรณีไม่ได้ไบอัสอาร์คริง ที่ความกว้างของอาร์คริงเท่ากับ 30 ไมโครเมตร มีค่ากระแสมืดสูงสุดเท่ากับ 140 μA และที่ระยะห่างอื่นจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความกว้างของอาร์คริงเพิ่มขึ้น โดยที่ความกว้างของอาร์คริง 300 ไมโครเมตร มีกระแสมืดต่ำสุดเท่ากับ 100 μA และเมื่อทำการไบอัสอาร์คริงจะมีกระแสมืดลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง โดยที่ความกว้างของอาร์คริงเท่ากับ 30 ไมโครเมตร มีค่ากระแสมืดสูงสุดเท่ากับ 70 μA และที่ระยะห่างอื่นจะ

มีแนวโน้มลดลงเมื่อมีความกว้างของการ์ดริงเพิ่มขึ้น ที่ความกว้างของการ์ดริง 300 ไมโครเมตรจะมีกระแสมีดต่ำสุดเท่ากับ 50 μA

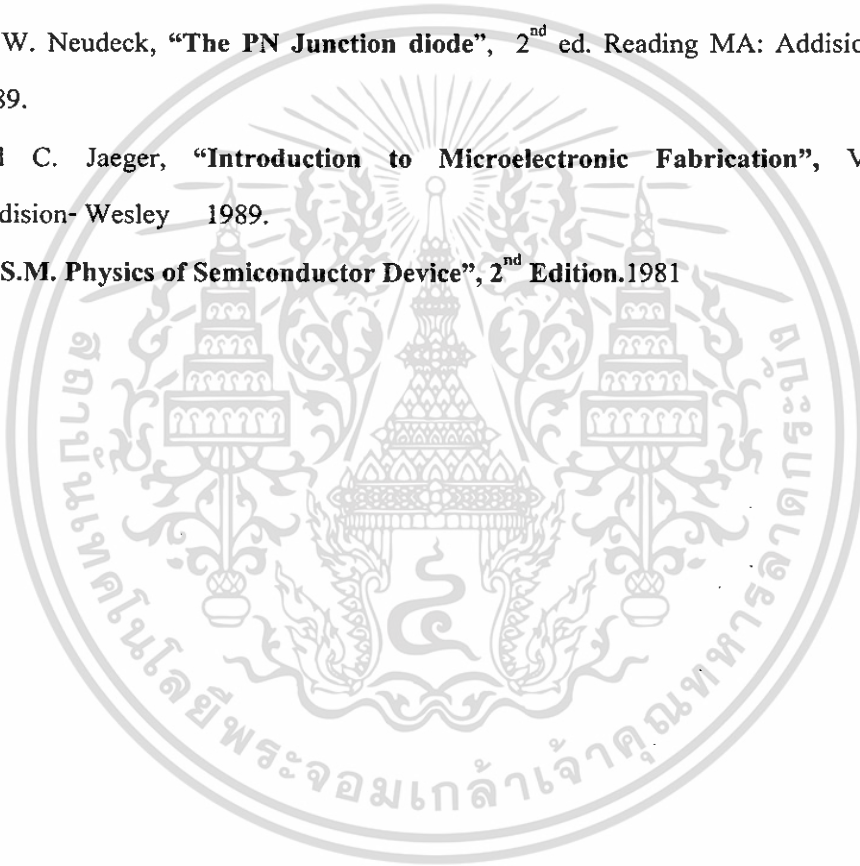
หมวดที่ 3 มีพื้นที่รับแสง 2.25 ตารางมิลลิเมตร มีระยะห่างระหว่างพื้นที่รับแสงกับการ์ดริง เท่ากับ 100 ไมโครเมตร ที่การ์ดริงในวงที่ 1 และวงถัดไปมีค่าเท่ากับ 50 ไมโครเมตร โดยมีจำนวนการ์ดริงจำนวน 1, 2, 4 วง มีแรงดันไบอัสย้อนกลับเท่ากับ 10 โวลต์ กรณีไม่ได้ไบอัสการ์ดริง ที่มีการ์ดริง 1 วง มีค่ากระแสมีดสูงสุดเท่ากับ 140 μA และเมื่อมีจำนวนการ์ดริงเพิ่มขึ้น กระแสมีดจะมีแนวโน้มลดลง โดยที่จำนวนการ์ดริงเท่ากับ 4 วง จะมีกระแสมีดต่ำสุดเท่ากับ 110 μA และเมื่อทำการไบอัสการ์ดริงจะมีกระแสมีดลดลงประมาณครึ่งหนึ่ง ที่มีการ์ดริง 1 วง มีค่ากระแสมีดสูงสุดเท่ากับ 70 μA และเมื่อมีจำนวนการ์ดริงเพิ่มขึ้นกระแสมีดจะมีแนวโน้มลดลง โดยที่จำนวนการ์ดริงเท่ากับ 4 วง จะมีกระแสมีดต่ำสุดเท่ากับ 50 μA

ทุกเงื่อนไข การ์ดริงที่ทำการไบอัสจะมีอัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสมีดสูงกว่าการ์ดริงที่ปล่อยลอยไว้



เอกสารอ้างอิง

1. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2542
2. รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ”, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง 2545
3. Desmarais Louis, “Applied Electro- optics”, Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall PTR.1998.
4. Gerold W. Neudeck, “The PN Junction diode”, 2nd ed. Reading MA: Addison- Wesley 1989.
5. Richard C. Jaeger, “Introduction to Microelectronic Fabrication”, Volume V Addison- Wesley 1989.
6. Sze, “S.M. Physics of Semiconductor Device”, 2nd Edition.1981



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้