การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท

STUDY ON DESIGN FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF INTERDIGITATED Al/n-Si/Al PHOTODIODE

มานิตา ด้วงแสง

MANITA DUANGSANG

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2543

ISBN 974-15-2453-6

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท

STUDY ON DESIGN FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF INTERDIGITATED Al/n-Si/Al PHOTODIODE

T061623

มานิตา ด้วงแสง

MANITA DUANGSANG

วพ.
ม453ก
2549
เลขหมู่.................................
เลขทะเบียน 61623
วัน,เดือน,ปี 19 ก.ค. 2549

b. 11600391
i.................................

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

บัณฑิตวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2549

ISBN 974-15-2453-6

STUDY ON DESIGN FABRICATION AND CHARACTERISTICS OF INTERDIGITATED Al/n-Si/Al PHOTODIODE

MANITA DUANGSANG

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF GRADUATE STUDIES
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2006

ISBN 974-15-2453-6

COPYRIGHT 2006

SCHOOL OF GRADUATE STUDIES

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท
นักศึกษา	น.ส. มานิตา ด้วงแสง
รหัสนักศึกษา	46061404
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2549
อาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท ซึ่งขนาดเล็กกว่า แต่ให้กระแสแสงที่สูงกว่า และค่าความจุไฟฟ้าต่ำกว่าอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว ซึ่งขนาดของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีขนาดเหมาะสมจะทำให้โฟโตไดโอดมีประสิทธิภาพสูงที่สุด งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท ได้แก่ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความกว้างของอิเล็กโทรด ความยาวของอิเล็กโทรด และจำนวนอิเล็กโทรด โดยได้ออกแบบอิเล็กโทรดเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทเพื่อศึกษาผลตอบสนองต่อแสงในแบบสัญญาณแสงกระแสตรงและกระแสสลับ ผลตอบสนองต่อสัญญาณแสงกระแสตรงจะวัดในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน จากผลการศึกษาพบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในช่วง 20-100 μm ไม่มีผลทำให้กระแสมืดและกระแสแสงของโฟโตไดโอดเปลี่ยนแปลง ส่วนการเพิ่มความกว้างของอิเล็กโทรดในช่วง 20-100 μm ทำให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นแต่กระแสแสงมีค่าคงที่ การเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.5-2 mm ทำให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดสูงขึ้น โดยกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.96 เท่า เมื่อเพิ่มความยาวเป็น 2 เท่า และกระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนการเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรด ตั้งแต่ 2-8 ขั้ว ทำให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดสูงขึ้น โดยกระแสแสงจะเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.82 เท่า เมื่อเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า การศึกษาผลตอบสนองทางความถี่พบว่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความกว้างของอิเล็กโทรด และความยาวของอิเล็กโทรด ไม่มีผลต่อความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอด แต่การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดซึ่งมีผลต่อความจุไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ ทำให้ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดมีค่าลดลง ซึ่งผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางสำหรับการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ต่อไปในอนาคต

Thesis Title	Study on Design Fabrication and Characteristics of Interdigitated Al/n-Si/Al Photodiode
Student	Manita Duangsang
Student ID	46061404
Degree	Master of Engineering
Programme	Microelectronics Engineering
Year	2006
Thesis Advisor	Assist.Prof. Dr. Surasak Niemchareon

ABSTRACT

The purpose of this thesis is to present the design, fabrication and characteristic of interdigitated Al/n-Si/Al photodiode. Although the interdigitated electrode has smaller size than the single silt electrode, it in fact generates the greater photocurrent with lower capacitance compared with the single silt electrode. Therefore, the most efficient photodiode can be created by using the interdigitated electrode which has appropriate size. The study of this thesis focuses on the affect of geometrical parameters inside the interdigitated structure which are electrode spacing, electrode width, electrode length and number of electrode. In the experiment, we designed the artificial interdigitated electrode in order to study photoresponse in dc and ac light signal. The photoresponse in dc signal was measured in term of I-V characteristic. From the experiment we found that a changing of electrode spacing in the 20-100 μm interval did not affect to dark current and photocurrent of photodiode, while an increase of electrode width ranged from 200-100 μm resulted to the higher of dark current but this change did not have any influence on photocurrent. For an extension of electrode length in the range between 0.5-2 mm, dark current became greater and photocurrent was increased, on average, by 1.96 times. By doubly adding up the number of electrode, photocurrent was raised up to 1.82 times. Besides, the changing electrode spacing, electrode width and electrode length to photoresponse in ac light signal find that did not impact to cutoff frequency of photodiode, but when the number of electrode was added up, photodiode cutoff frequency was decrease due to an increase in capacitance in bonding pad area. In conclusion, the result from this experiment can be used as the framework to construct the interdigitated Al/n-Si/Al photodiode in the future.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์นี้นี้สำเร็จได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษา วางแนวทาง ตลอดจนชี้แนะและความช่วยเหลือทุกด้านให้งานวิจัยนี้บรรลุเป้าหมาย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช และ รศ.ดร. วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง กรรมการสอบหัวข้อและโครงร่างวิทยานิพนธ์ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณ คุณอนุชา เรืองพานิช และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือวัดผลการทดลองบางส่วน

ขอขอบคุณ ดร. สัญญา คูณขาว ที่ให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางแก้ไขปัญหา

ขอบคุณเจ้าหน้าที่ของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ที่ให้คำแนะนำในกระบวนการสร้างอุปกรณ์

ขอขอบคุณ คุณธนพัฒน์ ชมสินทรัพย์ คุณเสริญพงศ์ เปลี่ยนศรีที่ช่วยวัดผลการทดลองบางส่วน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับทุนสนับสนุนการทำวิทยานิพนธ์ ประจำปีการศึกษา 2549 จากบัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จึงขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

สำหรับคุณประโยชน์ที่เกิดวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่อาจารย์ที่เคารพทุกท่านและศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....I

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....II

กิตติกรรมประกาศ.....III

สารบัญ.....IV

สารบัญรูป.....VIII

รายการคำย่อ.....XII

รายการสัญลักษณ์.....XIII

รายการคำศัพท์เทคนิค.....XV

บทที่ 1 บทนำ.....1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....1

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา.....2

1.3 สมมติฐานของการศึกษา.....3

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย.....4

1.5 ขอบเขตการวิจัย.....5

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา.....5

บทที่ 2 กระบวนการทางแสงและตัวตรวจจับแสง.....7

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....7

2.1.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและแถบไม่ตรง.....7

2.1.2 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....9

2.1.3 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล.....11

2.2 ชนิดของโฟโตดีเทคเตอร์.....12

2.2.1 โฟโตคอนดักเตอร์.....12

2.2.2 พี-เอ็นโฟโตไดโอด.....13

2.2.3 พินโฟโตไดโอด.....14

2.2.4 อวาลันช์โฟโตไดโอด.....15

2.2.5 ช็อตกีย์โฟโตไดโอด.....16

2.3 คุณสมบัติสำคัญของโฟโตดีเทคเตอร์.....17

2.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม.....17

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3.2 สภาพการตอบสนอง.....18

2.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง.....18

2.3.4 แบนด์วิดท์.....18

2.3.5 ผลตอบสนองต่อเสปกตรัม.....19

บทที่ 3 รอยสัมผัสช็อตกีย์และโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM.....21

3.1 รอยสัมผัสช็อตกีย์.....21

3.1.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์.....21

3.1.2 รอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะได้รับไบอัส.....23

3.1.2.1 รอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะได้รับไบอัสตรง.....23

3.1.2.2 รอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ.....24

3.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์.....25

3.1.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์.....26

3.2 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM.....27

3.2.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล.....27

3.2.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....28

3.2.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ.....32

3.2.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....33

3.2.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....34

บทที่ 4 การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al.....36

4.1 โครงสร้างและการออกแบบ.....36

4.2 กระบวนการสร้าง.....38

บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....43

5.1 การทดลองตอนที่ 1.....43

5.1.1 ผลการทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสช็อตกีย์.....43

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

5.1.2 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในสัญญาณแสงกระแสตรง....46

5.1.2.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสงกระทบ....47

5.1.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน....48

5.1.2.3 ผลของความกว้างอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน52

5.1.2.4 ผลของความยาวอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน..54

5.1.2.5 ผลของจำนวนอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน.....56

5.1.2.6 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน............58

5.1.3 ผลการทดสอบการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดในสัญญาณแสงกระแสสลับ....60

5.1.3.1 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด....61

5.1.3.2 ผลของความกว้างอิเล็กโทรด....62

5.1.3.3 ผลของความยาวอิเล็กโทรด....63

5.1.3.4 ผลของจำนวนอิเล็กโทรด....64

5.2 การทดลองตอนที่ 2....66

5.2.1 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ในสัญญาณแสงกระแสตรง....68

5.2.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ....68

5.2.1.2 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท....69

5.2.2 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท....72

5.2.3 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ในสัญญาณแสงกระแสสลับ....75

สารบัญ (ต่อ)

หน้า

บทที่ 6 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ....................80

เอกสารอ้างอิง....................83

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารในวิทยานิพนธ์นี้....................85

ประวัติผู้เขียน....................97

สารบัญรูป

รูปที่ หน้า

1.1 ลักษณะของอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท.....4

2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....8

2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค.....10

2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค.....10

2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ.....11

2.5 โครงสร้างและแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์.....13

2.6 โครงสร้างและแถบพลังงานของพี-เอ็นโฟโตไดโอด.....14

2.7 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอด.....14

2.8 อวาลันช์โฟโตไดโอด.....15

2.9 ช็อตกีย์โฟโตไดโอด.....16

2.10 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ.....19

2.11 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอด.....20

3.1 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์.....21

3.2 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์.....22

3.3 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง.....23

3.4 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....24

3.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น.....26

3.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอด.....26

3.7 (ก) ภาพตัดขวางของโครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน.....27

3.8 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อแรงดันไบอัสเท่ากับแรงดันริช-ทรูซ์.....28

3.9 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อแรงดันไบอัสเท่ากับแรงดันแฟลต-แบนด์.....29

3.10 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อแรงดันไบอัสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์.....29

3.11 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัส

มีขนาดกว้าง เมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....31

3.12 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....32

3.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....33

3.14 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....34

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

3.15 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM....35

4.1 ลักษณะของอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท....36

4.2 ตัวแปรกำหนดขนาดภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท....37

4.3 โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดเลียนแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง....37

4.4 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al....41

4.5 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์ของโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น....42

5.1 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองกำแพงศักย์ช็อตกีย์....44

5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น....44

5.3 การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตกีย์....45

5.4 การหาค่า J_0 จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์....45

5.5 ภาพถ่ายของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีขั้วอิเล็กโทรดเลียนแบบอินเตอร์ดิจิเตท
(ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า
(ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน....46

5.6 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอด ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ....47

5.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วอิเล็กโทรด....48

5.8 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอด ขณะได้รับแสงตกกระทบ....48

5.9 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (S) ในช่วง 20-100 μm....49

5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ....50

5.11 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีขนาดกว้าง เมื่อให้แรงดันไบอัส แล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล....51

5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด....52

5.13 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างอิเล็กโทรด (W) ในช่วง 20-100 μm....53

5.14 การสะท้อนแสงของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้โลหะทึบแสง....53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความกว้างของอิเล็กโทรด....54

5.16 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรด (L) ในช่วง 0.5-2 mm....55

5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความยาวอิเล็กโทรด....56

5.18 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรด (N) ตั้งแต่ 2-8 ขั้ว....57

5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและจำนวนอิเล็กโทรด....58

5.20 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในช่วง 2,500 – 25,000 ลักซ์....58

5.21 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับแสงตกกระทบ (ก) กรณีความเข้มแสงน้อย (ข)กรณีความเข้มแสงมาก....59

5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสง....60

5.23 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด ในสัญญาณแสงกระแสสลับ....61

5.24 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด...61

5.25 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างอิเล็กโทรด.......... 62

5.26 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรด....63

5.27 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรด....64

5.28 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50 เท่า ของลวดลายต้นแบบ....66

5.29 ภาพถ่ายของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท
(ก) โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
(ข) โฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์....66

5.30 ภาพถ่ายของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
(ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า
(ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน....67

5.31 ภาพถ่ายของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
(ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า
(ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน....67

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่ หน้า

5.32 ลักษณะกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..............68

5.33 ลักษณะกระแสแสง-แรงดัน เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์....................................69

5.34 ลักษณะกระแสแสง-แรงดัน เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..................................70

5.35 ลักษณะกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท เปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..70

5.36 การเกิดบริเวณปลอดพาหะรอบขั้วอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al......71

5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท เปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์....................................72

5.38 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน.................72

5.39 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท เปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..73

5.40 ความจุไฟฟ้าที่เกิดในโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์................................73

5.41 ความจุไฟฟ้าที่เกิดในโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์..............................75

5.42 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด (ก) 100 Ω (ข) 500 Ω (ค) 1 kΩ (ง) 5 kΩ...........76

5.43 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด..77

5.44 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด (ก) 100 Ω (ข) 500 Ω (ค) 1 kΩ (ง) 5 kΩ...........77

5.45 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่ไม่สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด..78

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
ac	alternating current	กระแสสลับ
Al	Aluminium	อลูมิเนียม
AlGaAs	Aluminium Gallium Arsenide	อลูมิเนียมแกลเลียมอาเซไนด์
APD	Avalanche Photodiode	อวาลันซ์โฟโตไดโอด
Au	Gold	ทองคำ
dc	direct current	กระแสตรง
DI	De-ionization water	น้ำบริสุทธิ์
FET	Field Effect Transistor	ทรานซิสเตอร์ที่ทำงานด้วยสนามไฟฟ้า
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูโอริก
HNO_3	Nitric acid	กรดไนตริก
GaAs	Gallium Arsenide	แกลเลียมอะไซไนด์
GaN	Gallium Nitride	แกลเลียมไนไตรด์
Ge	Germanium	เยอรมันเนียม
InGaAs	Indium Gallium Arsenide	อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์
InP	Indium Phosphide	อินเดียมฟอสไฟด์
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
Pt	Platinum	แพลตทินัม
R-center	Recombination center	ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO_2	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
Ti	Titanium	ไทเทเนียม

รายการสัญลักษณ์

C_A คือ ความจุไฟฟ้าด้านแอโนด

C_C คือ ความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด

C_T คือ ความจุไฟฟ้ารวม

E_0 คือ ระดับสุญญากาศ

E_A คือ ระดับผู้รับ

E_C คือ ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า

E_D คือ ระดับผู้ให้

E_F คือ ระดับเฟอร์มิ

E_{FM} คือ ระดับเฟอร์มิของโลหะ

E_{FS} คือ ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ

E_g คือ ช่องว่างพลังงาน

E_{photon} คือ พลังงานของโฟตอน

E_v คือ ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์

f_c คือ ความถี่คัทออฟ

I_c คือ กระแสคอนดักเตอร์

I_d คือ กระแสไดโอด

I_{dark} คือ กระแสมืด

I_{MS} คือ กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ

I_{SM} คือ กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ

I_{photo} คือ กระแสแสง

I_{total} คือ กระแสรวม

L คือ ความยาวของอิเล็กโทรด

N คือ จำนวนอิเล็กโทรด

R คือ ค่าคงที่ของริชาร์ดสัน

S คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

t_f คือ ช่วงเวลาขาลง

t_r คือ ช่วงเวลาขาขึ้น

V_A คือ แรงดันไบอัส

V_{bi} คือ แรงดันภายใน

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

V_{bi1} คือ แรงดันภายในด้านขั้วแคโทด

V_{bi2} คือ แรงดันภายในด้านขั้วแอโนด

V_1 คือ แรงดันไบอัสขั้วแคโทด

V_2 คือ แรงดันไบอัสขั้วแอโนด

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

W คือ ความกว้างของอิเล็กโทรด

W_A คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอโนด

W_C คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด

W_d คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

W_{d1} คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแคโทด

W_{d2} คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะด้านขั้วแอโนด

α คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง

$\Re$ คือ สภาพการตอบสนอง

ε_s คือ เปอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

ε_0 คือ เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ

η คือ ประสิทธิภาพควอนตัม

η_{ext} คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก

η_{int} คือ ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน

λ คือ ความยาวคลื่นแสง

λ_{max} คือ ความยาวคลื่นคัทออฟ หรือความยาวคลื่นมากสุด

ν คือ ความถี่ของแสง

ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอน

ϕ_{bn1} คือ ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วแคโทด

ϕ_{bn2} คือ ความสูงกำแพงศักย์ด้านขั้วแอโนด

ϕ_m คือ ฟังก์ชันงานของโลหะ

ϕ_s คือ ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

χ คือ อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กระบวนการรวมตัวใหม่	recombination process
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง	direct recombination process
กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม	indirect recombination process
กระแสมืด	dark current
กระแสรั่วไหล	leakage current
กระแสแสง	photocurrent
กลไกการเคลื่อนที่แบบการแพร่	diffusion mechanism
กล่องป้องกันแสง	dark shield
การจำกัดเวลาการส่งผ่าน	transit-time-limited
การดูดกลืนแบบแถบและสารเจือ	band and impurity absorption
การดูดกลืนแบบอินทรินซิคจากแถบถึงแถบ	intrinsic band to band absorption
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	depletion width
ความต้านทานโหลดภายนอก	load resistance
ความยาวคลื่นคัทออฟ	long wavelength cutoff
ความไว	sensitivity
ความสูงของกำแพงศักย์	barrier height
ค่าคงที่ของเวลา	time contant
คุณสมบัติเรคติไฟร์	rectifier
คู่อิเล็ตรอน-โฮล	electron-hole pairs
เครื่องระเหยโลหะด้วยความร้อนในสุญญากาศ	vacuum evaporator
เครื่องรับทางแสง	optical receiver
จุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง	half power point
ช่วงใกล้อินฟราเรด	near infrared
ช่อนรับแสงเดี่ยว	single slit
ช่องว่างแถบพลังงาน	energy band gap
ช็อตกีแบริเออร์	Schottky barrier
ดีมอดูเลท	demodulate
ทฤษฎีเทอร์มิโอนิคอิมิสชัน	thermionic emission theory

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
นอร์มอลไรซ์	normalized
บริเวณนิวทรัล	neutral region
บริเวณปลอดพาหะ	depletion region
แบนด์วิดท์	bandwidth
ประสิทธิภาพควอนตัม	quantum efficiency
ประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก	external quantum efficiency
ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน	internal quantum efficiency
ผลึกเชิงเดี่ยว	single crystalline
จุดเชื่อมต่อ	bonding pad
พลานาร์	planar
พาหะส่วนน้อย	minority carriers
พาหะส่วนมาก	majority carriers
ฟังก์ชันงาน	work function
โฟตอน	photon
โฟนอน	phonon
โฟโตลิโธกราฟฟี	photolithography
โฟโตคอนดักเตอร์	photoconductor
โฟโตไดโอด	photodiode
โฟโตดีเทคเตอร์	photodetector
วงจรรวมตัวรับทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์	optoelectronic receiver integrated circuits
รอยต่อแบบเฮทเทอโร	hetero junction
รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ	metal-semiconductor contact
รอยสัมผัสแบบช็อตกีย์	schottky contact
รอยสัมผัสแบบโอห์มิค	ohmic contact
ระยะการแพร่	diffusion length
เรคติไฟร์	rectifier
แรงดันภายใน	built in voltage
เวลาการแพร่	diffusion time

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
เวลาส่งผ่าน	transit time
ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่	recombination center
สถานะผิว	surface state
สภาพการตอบสนอง	responsivity
สภาพการสะท้อนแสงของสารกึ่งตัวนำ	reflectivity of semiconductor
สมบัติด้านแสง	optical property
สัญญาณคลื่นรูปไซน์	sinusoidally waveform
สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง	light absorption coefficient
แสงในช่วงที่ตามองเห็น	visible light
ค่าสัมประสิทธิ์ที่สัมพันธ์ร่วมกัน	correlation coefficient
สารกึ่งตัวนำ	semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง	direct band gap semiconductor
สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง	indirect band gap semiconductor
สารกึ่งตัวนำอินทรินซิก	intrinsic semiconductor
แหล่งจ่ายแสง	light source
อวาลันช์	avalanche
อัตราการขยาย	gain
อินเตอร์ดิจิเตท	interdigitated
อิเล็กโทรด	electrode
อิเล็กตรอน	electron
อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้	electron affinity
อุปกรณ์ด้านแสง	optical devices
โฮล	hole

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ทุกวันนี้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันเป็นอย่างมาก อุปกรณ์เครื่องใช้รอบๆ ตัวเราล้วนแต่มีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเป็นส่วนประกอบแทบทั้งสิ้น จากการทำงานที่รวดเร็ว แม่นยำ มีเสถียรภาพ ใช้กำลังน้อยและราคาถูก จึงทำให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศในอดีตและได้รับการพัฒนามาจนถึงปัจจุบัน ในยุคของข้อมูลและข่าวสารเช่นในปัจจุบันนี้ได้ทำให้งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงเข้ามามีบทบาทสำคัญมากยิ่งขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การส่งผ่านข้อมูลผ่านเส้นใยแก้วนำแสง การส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สาย หรือการเก็บข้อมูลในรูปแบบคอมแพคดิสก์ (compact disc : CD) ซึ่งใช้แสงในการอ่านและบันทึกข้อมูล ซึ่งข้อมูลจะถูกส่งมาในรูปของสัญญาณแสง โดยในส่วนภาครับจะทำหน้าที่เปลี่ยนจากสัญญาณแสงเป็นสัญญาณไฟฟ้าและทำการขยายขนาดของสัญญาณ เพื่อส่งไปยังส่วนประมวลผลและแสดงผลต่อไป

โฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) มีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าก่อนที่สัญญาณจะถูกส่งผ่านไปยังวงจรขยายสัญญาณ โฟโตดีเทคเตอร์มีโครงสร้างหลายลักษณะซึ่งแบ่งกว้างๆ ได้เป็น โฟโตคอนดักเตอร์ (photoconductor) และโฟโตไดโอด (photodiode) ซึ่งอาจแบ่งได้ตามลักษณะโครงสร้าง ได้แก่ พี-เอ็นโฟโตไดโอด พินโฟโตไดโอด อวาลันช์โฟโต-ไดโอด และช็อตกีย์โฟโตไดโอด

โฟโตไดโอดโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal : MSM) เป็นโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งที่จัดอยู่ในกลุ่มของช็อตกีย์โฟโตไดโอด และกำลังได้รับความสนใจมากขึ้นในปัจจุบัน เนื่องจากมีโครงสร้างที่ง่าย ความจุไฟฟ้าต่ำ กระแสมืดต่ำ สภาพการตอบสนองที่ดี ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย เนื่องจากมีโครงสร้างแบบพลานาร์และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟต (Field Effect Transistor : FET) โครงสร้าง MSM ใช้วิธีการสร้างชั้นโลหะขึ้นบนชิ้นสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดรอยต่อแบบเฮทเทอโรจังชัน (hetero-junction) ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ 2 รอยสัมผัสต่อแบบหันหลังชนกัน [1-2] โลหะที่นิยมใช้ได้แก่ ไทเทเนียม (Ti) แพลตทินัม (Pt) หรือ ทองคำ (Au) ส่วนสารกึ่ง-ตัวนำนิยมใช้สารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบในกลุ่ม III-V เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) แกลเลียมไนไตรด์ (GaN) หรือ อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดช่อง-แถบตรง (Direct bandgap) และใช้งานด้านความถี่สูงได้ดี อย่างไรก็ตามในการสร้างวงจรรวมยังคง

นิยมใช้เทคโนโลยีซิลิคอน (Si) เป็นหลักและยังคงมีการพัฒนาเทคโนโลยีอย่างต่อเนื่อง ในปัจจุบันได้มีการนำโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างจากซิลิคอนไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน ยกตัวอย่างเช่น การสื่อสารด้วยแสงซึ่งรวมทั้งการสื่อสารผ่านเส้นใยแก้วนำแสงในระยะใกล้และการสื่อสารแบบไร้สาย เซ็นเซอร์แสง และระบบจัดเก็บข้อมูลโดยใช้แสงในการอ่านและบันทึกข้อมูลเป็นต้น ซึ่งโฟโตไดโอดที่สร้างจากซิลิคอนสามารถตอบสนองความต้องการเหล่านี้ได้ดี [3] ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น และได้เลือกใช้โลหะอลูมิเนียม (Al) โดยสร้างให้เป็นโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ซึ่งสร้างได้ง่ายและมีราคาถูก เพื่อให้สอดคล้องและเหมาะสมกับเทคโนโลยีซิลิคอนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

ผลงานวิจัยโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมา เป็นการศึกษาวิจัยโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีอิเล็กโทรด (electrode) แบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit) เท่านั้น [4-6] ซึ่งอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวมีข้อด้อย คือ กระแสแสงที่จำกัดและไม่เหมาะสมต่อการสร้างเป็นวงจรรวม เนื่องจากมีขนาดใหญ่ และสิ้นเปลืองเนื้อที่บนชิ้นสารกึ่งตัวนำมาก จากข้อด้อยดังกล่าวจึงได้มีแนวความคิดที่จะเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดให้สูงขึ้น โดยการปรับปรุงจากอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวเป็นอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท (interdigitated) ซึ่งจะทำให้ได้กระแสแสงที่สูงขึ้นและลดพื้นที่บนชิ้นสารกึ่งตัวนำลงด้วย

1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

1. เพื่อศึกษาโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นและโลหะอลูมิเนียม ซึ่งทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ ทั้งซิลิคอนและอลูมิเนียมเป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก และสร้างด้วยเทคโนโลยีซิลิคอนที่มีความแพร่หลาย
2. เพื่อศึกษากระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีกระบวนการสร้างง่าย สอดคล้องกับกระบวนการสร้างมอสทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถสร้างพร้อมกับการสร้างวงจรรวมได้
3. เพื่อศึกษาการออกแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทซึ่งมีข้อได้เปรียบ คือ ให้กระแสแสงที่สูงกว่าและใช้พื้นที่น้อยกว่าอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว
4. เพื่อศึกษาปัจจัยภายนอกที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ได้แก่ แรงดันไบอัส และความเข้มแสง
5. เพื่อศึกษาตัวแปรภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ได้แก่ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความกว้างของอิเล็กโทรด ความยาวของอิเล็กโทรด และ จำนวนอิเล็กโทรด รวมถึงปัจจัยภายนอก คือ การเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส และการเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด

6. เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของผลตอบสนองทางความถี่จากการเปลี่ยนแปลงตัวแปรภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทที่กล่าวไว้ข้างต้น
7. เพื่อศึกษาโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน, ลักษณะสมบัติค่าความจุไฟฟ้า-แรงดัน และ การตอบสนองทางความถี่

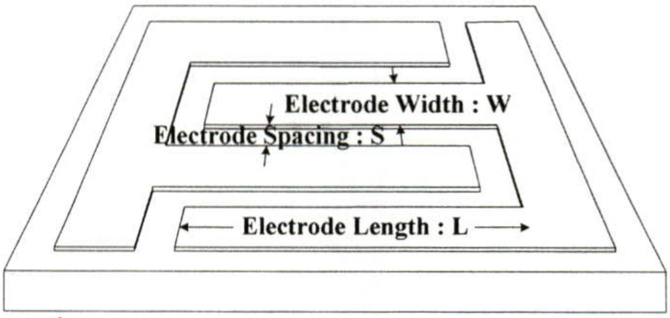
1.3 สมมติฐานของการศึกษา

โครงสร้าง MSM ที่เกิดจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นและโลหะอลูมิเนียม สามารถทำให้เกิดเป็นโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ได้ โดยการใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะทำให้โฟโตไดโอดสามารถตอบสนองต่อแสงในช่วงที่ตามองเห็น (visible light) มีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 nm การนำเอารูปแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทมาประยุกต์ใช้เป็นขั้วอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al น่าจะทำให้ประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดสูงขึ้น โดยการใช้อิเล็กโทรดแบบอินเตอร์-ดิจิเตทจะทำให้ได้กระแสแสงสูงกว่าอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวโดยใช้พื้นที่บนชิ้นซิลิคอนน้อยกว่า โฟโตไดโอดที่ใช้โครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทจะมีขนาดเล็กกว่าแบบช่องรับแสงเดี่ยว ทำให้ความจุไฟฟ้าแฝงที่เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดมีค่าน้อยกว่า จึงสามารถทำงานที่ความเร็วสูงกว่าได้ การสร้างขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่เหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของโฟโต-ไดโอดสูงขึ้นด้วย พารามิเตอร์ที่เป็นกำหนดขนาดของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทมีด้วยกัน 4 ตัวแปรคือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (electrode spacing : S), ความกว้างของอิเล็กโทรด (electrode width : W), ความยาวของอิเล็กโทรด (electrode length : L) และจำนวนของอิเล็กโทรด (number of electrode : N) ซึ่งในงานวิจัยของนักวิจัยท่านอื่นได้มีการศึกษาพารามิเตอร์เหล่านี้ในโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบให้ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรแคบ [1,7] เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่โฟโตไดโอดจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) ครอบคลุมบริเวณของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (S) ทั้งหมด เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด กระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้น

แต่ในกรณีของโฟโตไดโอดที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกว้าง เมื่อให้แรงดันไบอัสแต่โฟโตไดโอดจะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นส่วนหนึ่ง และอีกส่วนหนึ่งยังคงมีบริเวณนิวทรัล (neutral region) จึงทำให้ผลการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกว้างในโฟโตไดโอดที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดกว้าง ไม่เหมือนกับที่เกิดในโฟโตไดโอดที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบ ส่วนการการเปลี่ยนแปลงความกว้างของอิเล็กโทรด, ความยาวของอิเล็กโทรด และจำนวนอิเล็กโทรด น่าจะให้ผลเหมือนกับในโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ทั่วๆ ไป

1.4 ทฤษฎีหรือแนวความคิดที่ใช้ในการวิจัย

โครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทเป็นโครงสร้างที่นิยมใช้กับโฟโตไดโอดอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีข้อดีคือ เป็นโครงสร้างที่ลดพื้นที่ของโฟโตไดโอดลง ทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์ต่ำ และมีประสิทธิภาพสูงขึ้นกว่าโครงสร้างแบบช่องรับแสงเดี่ยว โครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 1.1 ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นลักษณะของซี่คล้ายส้อม (fork shape) หรือ นิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้าน



รูปที่ 1.1 ลักษณะของอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท

พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดจะอยู่ระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้าน ของโฟโตไดโอด ซึ่งพารามิเตอร์ที่เป็นตัวกำหนดขนาดของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทมีด้วยกัน 4 ตัวแปรคือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (electrode spacing : S) ความกว้างของอิเล็กโทรด (electrode width : W) ความยาวของอิเล็กโทรด (electrode length : L) และจำนวนของอิเล็กโทรด (number of electrode : N) การออกแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทที่มีขนาดเหมาะสมจะทำให้โฟโตไดโอดมีประสิทธิภาพในการทำงานสูงสุด [8-9]

ในโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบมากๆ หรือมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยกว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่ขยายออกจากด้านแคโทด พบว่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพควอมตัม [8] และความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอด โฟโตไดโอดที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมากกว่าจะมีประสิทธิภาพควอมตัมสูงกว่า เนื่องจากมีพื้นที่รับแสงมากกว่า แต่ความเร็วในการทำงานจะต่ำกว่าโฟโตไดโอดที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยกว่า เนื่องจากประจุพาหะจะใช้เวลาในการเคลื่อนที่ผ่านบริเวณปลอดพาหะมากกว่า

การเปลี่ยนแปลงความกว้างของอิเล็กโทรดจะมีผลต่อค่าประสิทธิภาพควอมตัม และความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอดเช่นกัน โดยค่าประสิทธิภาพควอนตัมจะลดลงจากผลของการสะท้อนแสงของขั้วอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดเมื่อความกว้างของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น [8] และ

การเพิ่มความกว้างของอิเล็กโทรดมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตกีย์เพิ่มขึ้นเป็นผลให้ความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอดลดลง [10]

1.5 ขอบเขตการวิจัย

ขอบเขตของงานวิจัยนี้อยู่ที่การออกแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทให้เหมาะสมสำหรับเป็นขั้วอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al โดยใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al จะใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ 100 สภาพต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร การเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียมบนผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนจะใช้วิธีการระเหยด้วยความร้อนในสุญญากาศ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะศึกษาโดยใช้อิเล็กโทรดที่ออกแบบขึ้นเพื่อเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท เพื่อศึกษาผลกระทบของพารามิเตอร์ในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทที่ส่งผลถึงการตอบสนองของโฟโตไดโอด โดยในการออกแบบอิเล็กโทรดเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (S) เปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 และ 100 μm ความกว้างของอิเล็กโทรด (W) เปลี่ยนแปลงค่าตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 และ 100 μm ความยาวของอิเล็กโทรด (L) เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 mm จำนวนของอิเล็กโทรด (N) เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2, 4, 6 และ 8 ขั้ว การวัดผลตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ในแบบสัญญาณแสงกระแสตรงจะวัดในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ส่วนผลตอบตอบสนองทางความถี่จะวัดเป็นค่านอร์มอลไรซ์ของสัญญาณเอาท์พุท (output) เมื่อเปลี่ยนแปลงความถี่ของสัญญาณอินพุท (input) จากนั้นจึงนำผลการทดลองที่ได้มาวิเคราะเพื่อหาพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการออกแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทเพื่อสร้างเป็นโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทต่อไป

1.6 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM
2. ศึกษาลักษณะโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท และพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องในโครงสร้าง
3. ออกแบบอิเล็กโทรดเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท เพื่อใช้ในการทดลอง
4. ศึกษากระบวนการสร้าง และสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al โดยใช้อิเล็กโทรดเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท
5. ศึกษาผลตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ในลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และผลตอบสนองทางความถี่

6. วิเคราะห์ผลการทดลองและสรุปพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท
7. ออกแบบอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทตามพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลอง
8. สร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท และศึกษาผลตอบสนองของโฟโตไดโอด เปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เนื้อหาในวิทยานิพนธ์นี้แบ่งเป็น 6 บท โดยมีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ เป็นการกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของโฟโตดีเทคเตอร์ หัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ที่ได้ทำการศึกษาโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท สมมติฐาน และแนวความคิดที่ใช้ในงานวิจัย ขอบเขตของงานวิจัย ส่วนสุดท้ายคือขั้นตอนของการศึกษางานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 กระบวนการทางแสงและโฟโตดีเทคเตอร์ เป็นทฤษฎีเกี่ยวกับกระบวนการทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เช่น การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ การเกิดและการรวมตัวของพาหะและโฟโตดีเทคเตอร์ชนิดต่างๆ รวมถึงคุณสมบัติที่สำคัญของโฟโตดีเทคเตอร์

บทที่ 3 รอยสัมผัสช็อตกีย์และโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM กล่าวถึงทฤษฎีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสช็อตกีย์ ในภาวะสมดุลความร้อนและเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ซึ่งเป็นพื้นฐานของโครงสร้าง MSM รวมถึงโครงสร้างและการทำงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

บทที่ 4 การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al เป็นการกล่าวถึงการออกแบบ และกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท

บทที่ 5 การทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง จะกล่าวถึงผลทดลองเกี่ยวกับลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น กำแพงศักย์ช็อตกีย์ ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเมื่อเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ต่างๆ ในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท และผลการทดลองลักษณะสมบัติทางแสงในกรณีที่อุปกรณ์ได้รับแสงแบบกระแสตรง และแบบกระแสสลับ รวมถึงการวิเคราะห์ผลการทดลองที่เกิดขึ้น

บทที่ 6 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลที่ได้จากการทดลอง โดยมีข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป

บทที่ 2
กระบวนการทางแสงและโฟโตดีเทคเตอร์

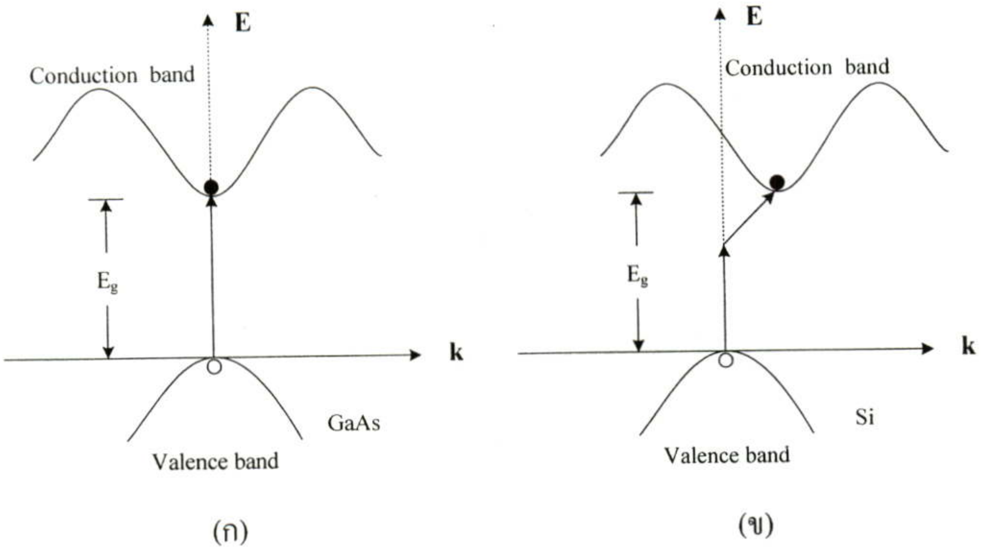
ทฤษฎีเรื่องกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นพื้นฐานสำคัญที่ใช้ในการอธิบายถึงกลไกการเกิดกระแสแสงและหลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์ซึ่งเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ดังนั้นในบทนี้จึงได้กล่าวถึงทฤษฎีกระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ รวมทั้งหลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้างต่างๆ ที่ใช้งานโดยทั่วไป และคุณสมบัติสำคัญที่ใช้ในการพิจารณาโฟโตดีเทคเตอร์

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ เป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายใน ประกอบไปด้วยการดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งจะแตกต่างกันในสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง

2.1.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง [11]

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่อธิบายถึงสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) และสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) คือกราฟ E-k diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของค่าพลังงานที่สำคัญ 2 ตำแหน่งคือตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า กับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยพบว่าในสารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs), อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs), อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์จะอยู่ตรงกัน ดังรูปที่ 2.1 (ก) เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ช่องแถบตรง (direct band gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง ส่วนกรณีที่สารกึ่งตัวนำบางชนิด เช่น ซิลิคอน (Si), เยอรมันเนียม (Ge) หรือสารกึ่งตัวนำประเภทธาตุอื่นๆ ซึ่งตำแหน่งค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า ช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) โดยที่สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้จะถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง $k = 0$



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ
(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง

แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือ จุดทั้งสองนี้มีค่า k หรือค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ดังนั้นลักษณะสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่นลักษณะสมบัติทางด้านแสง (optical properties) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงโฟตอนจากแสงที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาเท่ากับช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (E_g) และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบนี้เกิดได้ง่ายทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดีจึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอด และโฟโตดีเทคเตอร์เป็นต้น ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกกลับลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อนแล้วจึงลดลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด ในทำนองเดียวกันพลังงานโฟตอนจากแสงไม่สามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรงถึงแม้ว่าพลังงานจากโฟตอนจะมีค่าเพียงพอ แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมจึงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงระดับพลังงานของอิเล็กตรอนระหว่างแถบวาเลนซ์และแถบนำไฟฟ้า จึงทำให้สารกึ่ง-ตัวนำช่องแถบไม่ตรงมีการดูดกลืนหรือการคายพลังงานแสงไม่ดีนัก สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงนี้

จึงไม่นิยมนำมาทำเป็นไดโอดเปล่งแสง หรือเลเซอร์ไดโอด แต่สำหรับโฟโตดีเทคเตอร์ยังคงมีการใช้งานอยู่ โดยเฉพาะซิลิคอน

2.1.2 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล [12-13]

นอกจากพลังงานความร้อนจากภายนอกจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระได้แล้ว พลังงานจากโฟตอนจากแสงก็สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้เช่นกัน ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่า โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงโดย

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1240}{\lambda} \quad \text{eV} \qquad \ldots(2.1)$$

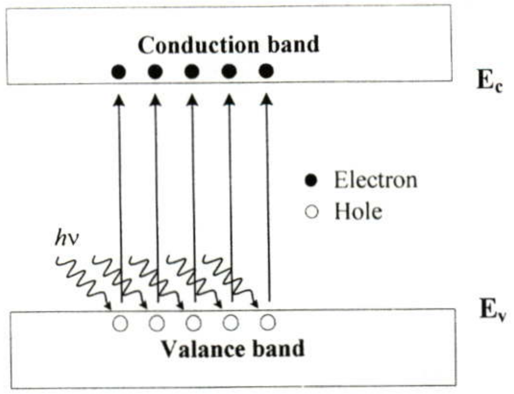
โดยที่ ν คือ ความถี่ (Hz)

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (nm)

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์ มีค่าเท่ากับ $4.136\text{x}10^{-15}$ eV-sec

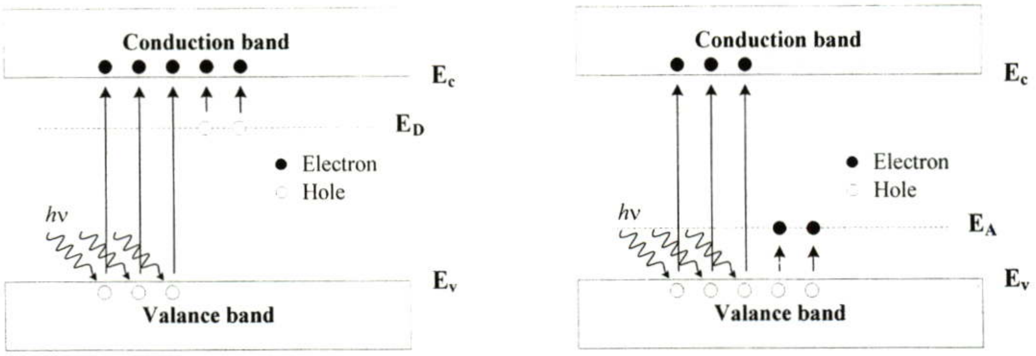
c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ $3\text{x}10^{8}$ m/sec

กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (generation)ในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค (intrinsic semiconductor) จะเกิดขึ้นเมื่อมีโฟตอนที่มีพลังงานมากกว่าช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$ ตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานจากโฟตอนและกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดโฮลเขึ้นที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งการเกิดอิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น ในกรณีซิลิคอนมีช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นโฟตอนที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้จะต้องมีพลังงานมากกว่า 1.12 eV หรือโฟตอนต้องมีความยาวคลื่นน้อยกว่า 1110 nm ซึ่งความยาวคลื่นมากสุดที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนี้เรียกว่าความยาวคลื่นคัทออฟ (long wavelength cutoff : λ_{max})



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิค

สำหรับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ซึ่งคือสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเติมอะตอมสารเจือชนิดเอ็นเข้าไป จะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level : E_D) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้ให้นี้จะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแถบนำไฟฟ้า (E_C) ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) ซึ่งคือสารกึ่งตัวนำที่ได้รับการเติมอะตอมสารเจือชนิดพีเข้าไป จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level : E_A) ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงาน โดยระดับพลังงานผู้ให้นี้จะอยู่ใกล้กับระดับขอบล่างของแถบวาเลนซ์ (E_V) ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก)



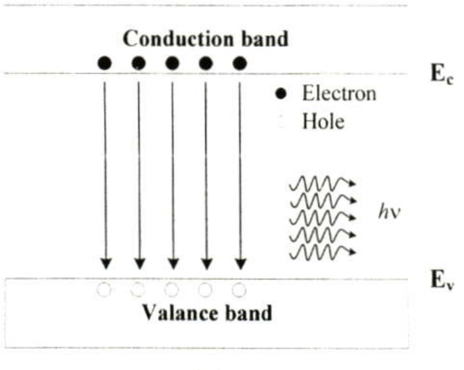
(ก) (ข)

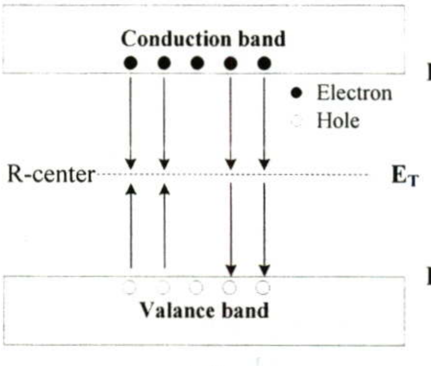
รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กซ์ทรินซิค
(ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี

2.1.3 การรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล [11]

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด กล่าวคือเป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะคือโฮลและอิเล็กตรอนหายไป พลังงานของอิเล็กตรอนที่ลดลงหรือหายไป คือ พลังงานที่สูญเสียไปเนื่องจากการชนกับแลททีส (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่ารวมกันว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปคล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย





รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ
(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง กระบวนการรวมตัวเริ่มจากอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงใน

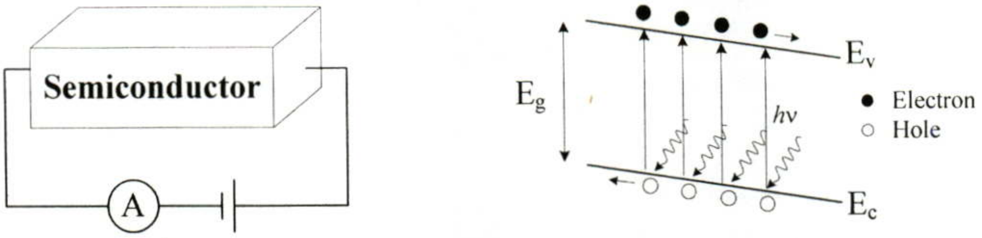
รูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลททิสได้ และการสั่นของแลททิส จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

2.2 ชนิดของโฟโตดีเทคเตอร์

โฟโตดีเทคเตอร์เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ปัจจุบันโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ โฟโตคอนดักเตอร์และโฟโตไดโอด โดยในกลุ่มของโฟโตไดโอดยังสามารถแบ่งย่อยได้อีกหลายชนิดตามลักษณะโครงสร้าง เช่น พี-เอ็นโฟโต-ไดโอด พินโฟโตไดโอด อวาลันช์โฟโตไดโอด และ ช็อตกีย์โฟโต-ไดโอด ในหัวข้อนี้จะได้อธิบายถึงโฟโตดีเทคเตอร์ชนิดต่างๆ พอสังเขป เพื่อให้เข้าใจโครงสร้างและหลักการทำงานของโฟโตดีเทคเตอร์เหล่านี้

2.2.1 โฟโตคอนดักเตอร์

โฟโตคอนดักเตอร์เป็นโฟโตดีเทคเตอร์ที่มีโครงสร้างง่ายที่สุด สร้างขึ้นจากสารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียวโดยไม่ต้องมีการแพร่อะตอมสารเจือเพื่อให้เกิดเป็นรอยต่อ มีการสร้างขั้วไฟฟ้าขึ้น 2 ขั้ว ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิค (ohmic contact) ขึ้นที่ส่วนปลายของสารกึ่งตัวนำ เพื่อจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 เมื่อมีแสงมาตกกระทบลงบนโฟโตคอนดักเตอร์จะทำให้อิเล็กตรอนที่ได้รับพลังงานเกิดการเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้าและทิ้งให้เกิดโฮลที่แถบวาเลนซ์ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของอิเล็กตรอนในแถบความนำสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของโฮลในแถบวาเลนซ์ เมื่อให้แรงดันไบอัสจากภายนอกแก่ขั้วทั้งสองจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าตกคร่อมภายในชิ้นสารกึ่งตัวนำ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่กลับทิศกับสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วบวกส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วลบทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในวงจรโดยกระแสไฟฟ้าจะขึ้นอยู่กับความเข้มแสงตกกระทบและความสามารถในการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ



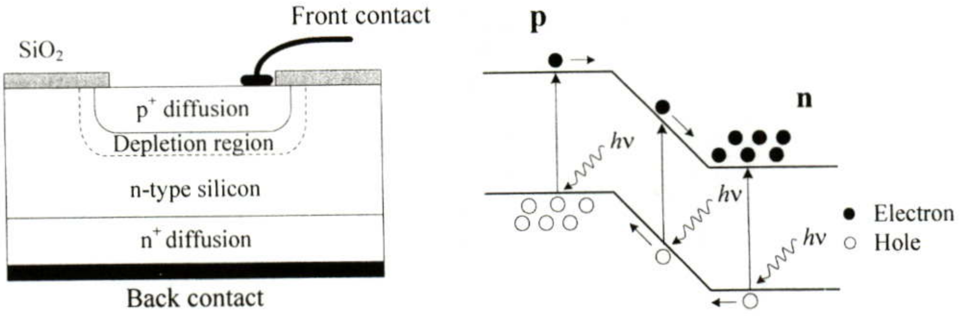
รูปที่ 2.5 โครงสร้างและแถบพลังงานของโฟโตคอนดักเตอร์

คุณสมบัติเด่นของโฟโตคอนดักเตอร์คือมีโครงสร้างง่าย และมีราคาถูก แต่ข้อด้อยที่สำคัญของโฟโตคอนดักเตอร์ คือ ความเร็วในการตอบสนองช้า ซึ่งใช้เวลาอยู่ในระดับมิลลิวินาที [14] โฟโตคอนดักเตอร์ที่มีขนาดใหญ่จะมีสภาพการตอบสนองที่ดีแต่จะใช้เวลาในการตอบสนองที่นานขึ้นด้วย

2.2.2 พี-เอ็นโฟโตไดโอด

พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) หรือ โฟโตไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น มีโครงสร้างพื้นฐานเหมือนกับไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็นทั่วๆ ไปแต่ได้ถูกออกแบบให้แสงสามารถตกกระทบลงบนรอยต่อ p-n ได้ โครงสร้างทั่วไปของโฟโตไดโอดและแถบพลังงานของ p-n โฟโตไดโอด แสดงในรูปที่ 2.6 ในขณะใช้งานจะป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับให้กับรอยต่อ p-n ทำให้สนามไฟฟ้าภายในมีค่าสูงขึ้นและบริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้น เมื่อมีแสงมาตกกระทบ p-n โฟโตไดโอด และถ้าพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และทิ้งให้เกิดโฮลอยู่ที่แถบวาเลนซ์ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น p บริเวณปลอดพาหะ และชั้น n ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าในชั้น p จะแพร่ไปสู่ชั้น n และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายใน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น n ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอนทำให้เกิดเป็นกระแสไฟฟ้าไหลออกสู่วงจรภายนอก จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแปรโดยตรงกับความเข้มแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน

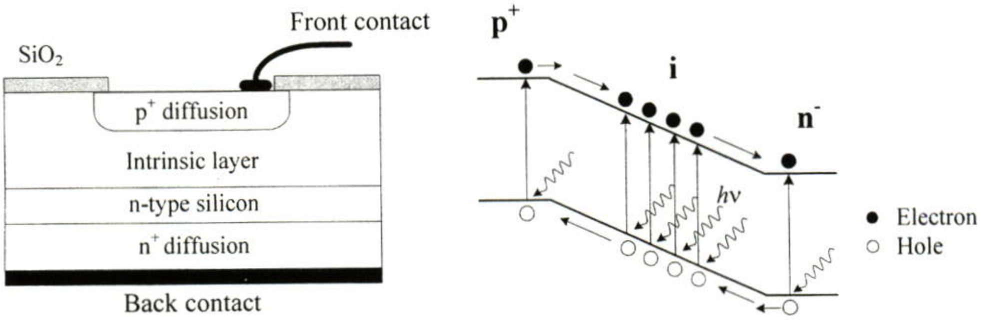
คุณสมบัติเด่นของ p-n โฟโตไดโอด พบว่าจะทำงานได้เร็วกว่าโฟโตคอนดักเตอร์ และมีสัญญาณรบกวนที่ต่ำกว่า แต่มีข้อด้อยคือ อย่างไรก็ดีในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท ซึ่งต้องทำงานด้วยความเร็วสูงมากๆ p-n โฟโตไดโอดไม่สามารถตอบสนองได้



รูปที่ 2.6 โครงสร้างและแถบพลังงานของต่อ พี-เอ็นโฟโตไดโอด

2.2.3 พินโฟโตไดโอด

พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) หรือ โฟโตไดโอดที่มีรอยต่อชนิด p-i-n มีการพัฒนาขึ้นจาก p-n โฟโตไดโอด โดยภายในโครงสร้างมีการสร้างชั้น i ขึ้น ตรงกลางระหว่างชั้น p และชั้น n ชั้น i นี้หมายถึงชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์ (intrinsic) ซึ่งมีความบริสุทธิ์สูงหรือมีเจือด้วยสารเจือปริมาณน้อยมาก โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอดแสดงรูปที่2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างและแถบพลังงานของพินโฟโตไดโอด

ชั้นของสารกึ่งตัวนำที่อยู่ด้านบนจะถูกสร้างขึ้นให้มีขนาดที่บางมากๆ เพื่อให้โฟตอนในแสงทะลุผ่านไปถึงชั้น i และที่ชั้น i นี้มีความกว้างมากพอที่จะดูดกลืนโฟตอนทั้งหมดได้ เนื่องจากชั้น i มีสภาพต้านทานสูงกว่าด้าน p^+ และด้าน n^+ เป็นผลให้เมื่อพินโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสจะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขยายเข้าไปในส่วนของชั้น i และเนื่องจากแรงดันที่ตกคร่อมที่ส่วน i จะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นตลอดชั้น i

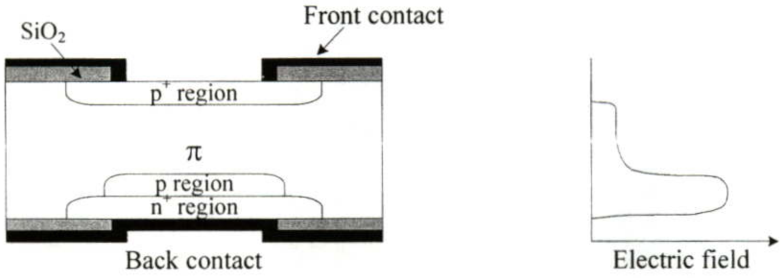
พินโฟโตไดโอดมีความเร็วในการทำงานสูงกว่า p-n โฟโตไดโอด เนื่องจากการที่มีชั้น i จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ทำให้มีผลตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก ซึ่งเหมาะกับการนำไปใช้กับระบบที่ต้องการทำงานอย่างรวดเร็ว เช่น ระบบสื่อสารด้วยคลื่นแสงผ่านใยแก้วนำแสงเป็นต้น นอกจากการตอบสนองเวลาได้รวดเร็วแล้วพินโฟโตไดโอดยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่า p-n โฟโตไดโอด เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสง (i) ที่กว้างกว่าบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากรอยต่อ p-n แต่ข้อด้อยของพินโฟโตไดโอด คือถ้าสร้างให้มีพื้นที่ใหญ่จะทำให้มี

ประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง และกระบวนการสร้างของพินโฟโตไดโอดมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องสร้างชั้น i ให้มีความบริสุทธิ์ และต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย

2.2.4 อวาลันช์โฟโตไดโอด

อวาลันซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode : APD) มีโครงสร้างคล้ายพินโฟโตไดโอด ดังแสดงในรูปที่ 2.8 แต่จะถูกออกแบบเป็นพิเศษให้โฟโตไดโอดทำงานใกล้ๆ กับจุดพังทลาย (breakdown point) ด้วยแรงดันไบอัสย้อนกลับประมาณ 300-500 โวลต์ [14] ทำให้เกิดปรากฏการณ์อวาลันซ์ขึ้น

ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามาชั้น p^+ แสงจะถูกดูดกลืนในชั้นบริเวณปลอดพาหะ และเมื่อให้แรงดันไบอัสแบบย้อนกลับแก่อุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น n^+ และโฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น p^+ ในการสร้างโฟโตไดโอด ชั้น π (สารกึ่งตัวนำชนิด p ที่ถูกโดปอย่างเจือจาง) จะมีความต้านทานสูงกว่าชั้น p และชั้น p^+ ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมที่ชั้น p มากที่สุด เป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดให้เข้ามาสู่ชั้น p จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้และวิ่งไปชนกับโครงร่างผลึกและทำให้ผลึกแตกตัวเกิดเป็นไอออน ซึ่งจะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นสู่แถบนำไฟฟ้า และเกิดโฮลขึ้นใหม่ในแถบวาเลนซ์ และจะเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำๆ ตลอดเวลาที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้เกิดพาหะอิสระเป็นจำนวนมากมาย จึงทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น

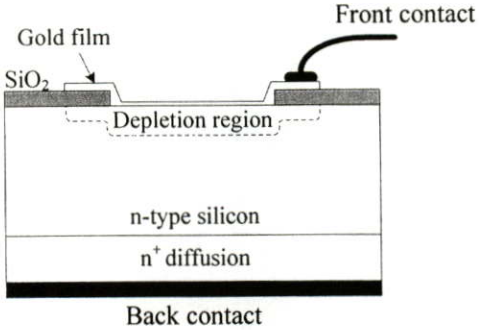


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของอวาลันช์โฟโตไดโอด

ข้อได้เปรียบของอวาลันช์โฟโตไดโอดคือ เป็นโฟโตไดโอดที่มีการตอบสนองสูง (high sensitive photodiode) และมีอัตราขยายสัญญาณ (gain) ซึ่งมากกว่าพินโฟโตไดโอด 50-300 เท่า [14] แต่มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องใช้แรงดันไบอัสย้อนกลับที่สูงมาก และสัญญาณเอาพุทมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุทและสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูงเนื่องจากมีอัตราขยายในโฟโตไดโอด

2.2.5 ช็อตกีย์โฟโตไดโอด

ช็อตกีย์โฟโตไดโอด สร้างขึ้นจากรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ โดยชั้น p จะถูกแทนด้วยฟิล์มโลหะที่บางมาก เช่น ทองคำ หนาประมาณ 15 nm โครงสร้างของช็อตกีย์โฟโต-ไดโอด แสดงในรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 โครงสร้างของช็อตกีย์โฟโตไดโอด

ชั้นฟิล์มโลหะบางๆ นี้ จะทำให้แสงสามารถผ่านทะลุชั้นโลหะลงไปได้ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะเกิดบริเวณปลอดพาหะจะเกิดขึ้นที่ใต้ชั้นฟิล์มโลหะ โฟตอนที่ทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะบางๆ จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำซึ่งอยู่ในบริเวณปลอดพาหะ ถ้าเปรียบเทียบกับ พิน-โฟโตไดโอดแล้ว ช็อตกีย์โฟโตไดโอดจะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า ทำให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้จากโครงสร้างช็อตกีย์โฟโตไดโอดยังมีค่าของความต้านทานและความจุไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่สูงกว่า สามรถประยุกต์ใช้งานเป็นโฟโตไดโอดที่มีพื้นที่รับแสงขนาดใหญ่ได้ดี

อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้ อีกทั้งยังไม่สามารถทำงานที่อุณหภูมิสูงได้ นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว (surface state) ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอนและระดับจับโฮล หรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

2.3 คุณสมบัติสำคัญของโฟโตดีเทคเตอร์

โฟโตดีเทคเตอร์แต่ละชนิดมีขีดจำกัดที่แตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างและวัสดุที่ใช้จึงทำให้โฟโตดีเทคเตอร์แต่ละชนิดเหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้งานที่แตกต่างกัน ในการเลือกใช้จึงต้องพิจารณาจากคุณสมบัติของโฟโตดีเทคเตอร์ ได้แก่ ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency) สภาพการตอบสนอง (responsivity) ความเร็วในการตอบสนอง (bandwidth) และ ช่วงความยาวคลื่นที่ตอบสนอง (spectral response)

2.3.1 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (Quantum efficiency : η) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่วงจรภายนอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (Internal quantum efficiency : η_{int}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในชิ้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (External quantum efficiency : η_{ext}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อนและค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ (α) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งหาได้จากสมการที่ 2.2

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{inc}} \qquad \ldots(2.2)$$

โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

I_p คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทคเตอร์

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

ν คือ ความถี่ของคลื่น

ค่าของ η มีค่าระหว่าง $0 \leq \eta \leq 1$ ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายในโดยทั่วไปมีค่ามากกว่า 90% แต่ถ้าไม่มีการเคลือบชั้นป้องกันการสะท้อนบนผิวของโฟโตไดโอด แสงที่ตกกระทบชิ้นสาร-กึ่งตัวนำจะสะท้อนออกไปประมาณ 30% เนื่องจากดัชนีหักเหของสารกึ่งตัวนำและอากาศมีค่าไม่เท่ากัน ดังนั้นจึงทำให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัวภายนอกถูกจำกัดอยู่ที่ประมาณ 70% [1]

61623

2.3.2 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (responsivity ; $\Re$) หมายถึง กระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ 2.3

$$\Re = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \qquad ...(2.3)$$

โดยที่ P_{inc} คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

q คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

I_p คือ กระแสแสงของโฟโตดีเทคเตอร์

h คือ ค่าคงที่ของแพลงค์

ν คือ ความถี่ของคลื่น

λ คือ ความยาวคลื่น

η คือ ค่าประสิทธิภาพควอนตัม

จากสมการที่ (2.3) พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน

2.3.3 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้ง แต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น (t_r) และช่วงเวลาขาลง (t_f)

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามาก หรือน้อยขึ้นกับแฟคเตอร์ของ

(1) เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ

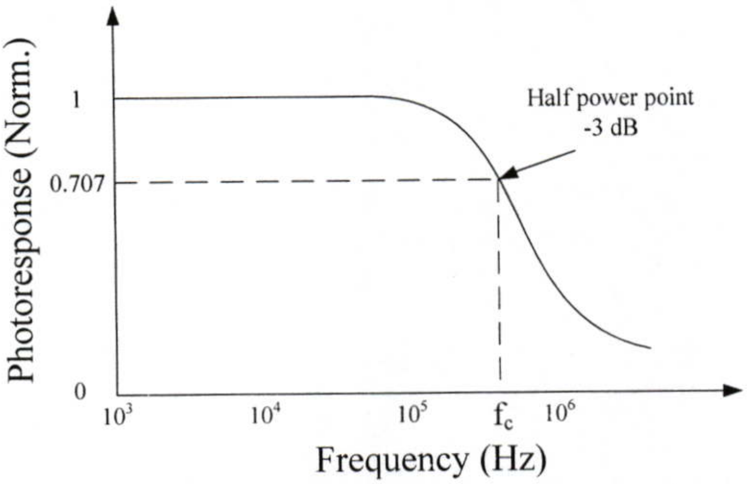
(2) เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ

(3) ค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดกับค่าโหลด ความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้โฟโตไดโอดตอบสนองความถี่ที่ความเร็วสูงๆ จะต้องพิจารณาถึงแฟคเตอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็กๆ เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น

2.3.4 แบนด์วิดท์

แบนด์วิดท์ (bandwidth) คือ อัตราความเร็วในการทำงานเมื่อถูกกระตุ้นด้วยแสงที่สัญญาณความถี่ค่าต่างๆ โดยอัตราการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงเมื่อสัญญาณทางแสงมีความถี่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อความถี่ของสัญญาณเปลี่ยนแปลงจะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะสมบัติบางประการของโฟโตดีเทคเตอร์ ซึ่งการลดลงของการตอบสนองทางแสงขณะที่สัญญาณแสงมีความถี่สูงขึ้น แสดงดังรูปที่ 2.10 ในทางปฏิบัติการตอบสนองทางแสงจะมีค่าลดลงที่ความถี่ค่าหนึ่ง มีค่าประมาณ 0.707 เท่าของการตอบสนองทางแสงทั้งหมด ความถี่ค่านี้ถูกเรียกว่า ความถี่คัทออฟ (cutoff frequency : f_C) ที่ความถี่นี้กำลังงานจะมีค่าลดลงเหลือครึ่งหนึ่ง จุดนี้จึงถูกกำหนดว่าเป็นจุดกำลังลดลงครึ่งหนึ่ง (half power point) หรือมีค่า -3 dB ดังนั้นความถี่คัทออฟจึงมีความหมายถึงค่าความถี่สูงสุดที่โฟโตดีเทคเตอร์สามารถทำงานได้ ซึ่งความถี่ที่สูงกว่านี้จะทำให้กำลังงานของโฟโตดีเทคเตอร์มีค่าต่ำกว่าครึ่งหนึ่งของกรณีความถี่ต่ำ

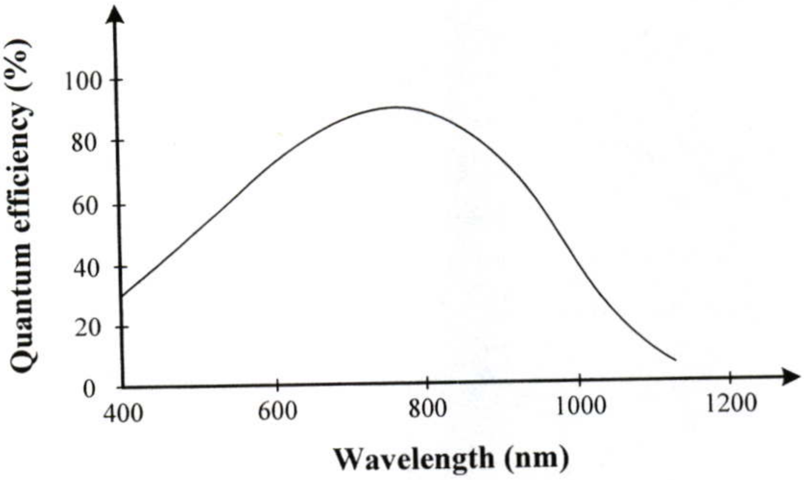


รูปที่ 2.10 การเปลี่ยนแปลงของการตอบสนองทางแสงกับความถี่ของสัญญาณ

2.3.5 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัม

ผลตอบสนองของสเปกตรัมของแสง หมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลงค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการดูดกลืนโฟตอนเฉพาะบริเวณผิวของสารกึ่งตัวนำซึ่งจะเกิดปรากฏการณ์รวมตัวที่ผิวทำให้ผลตอบสนองของโฟโตดีเทคเตอร์ลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง ผลตอบสนองต่อ

สเปกตรัมของแสงในสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิดมีค่าแตกต่างกัน สำหรับโฟโตดีเทคเตอร์ที่สร้างจากซิลิคอนจะมีผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอด

จากรูปที่ 2.11 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่น โดยมีผลตอบสนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared) และการตอบสนองจะลดลงเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคลื่นสูงสุดที่สารกึ่งตัวนำซิลิคอนจะสามารถตอบสนองได้คือ 1110 nm

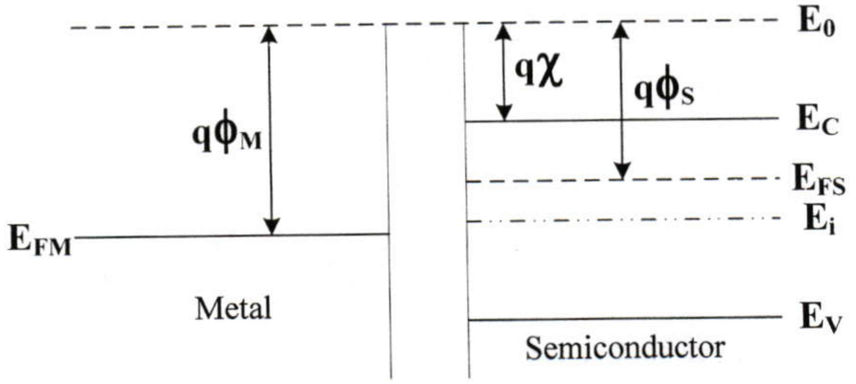
บทที่ 3
รอยสัมผัสช็อตกีย์และโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ แบ่งได้เป็น 2 ชนิด ตามคุณสมบัติการนำไฟฟ้า คือ รอยสัมผัสแบบโอห์มิค (ohmic contact) และรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ (schottky contact) ซึ่งรอยสัมผัสแบบโอห์มิคเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ส่วนรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์เป็นรอยสัมผัสที่แสดงคุณสมบัติเรคติไฟร์ (rectifier) คล้ายกับไดโอด โดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์เท่านั้น

3.1 รอยสัมผัสช็อตกีย์

3.1.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์ [12]

แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงในรูปที่ 3.1 ระดับสุญญากาศ (vacuum level : E_0) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของเข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือ พลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ



รูปที่ 3.1 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์

ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มิ (fermi level : E_{FM}) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_c) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย ϕ_M มีค่าดังสมการที่ 3.1 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เช่น อลูมิเนียม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.3 eV

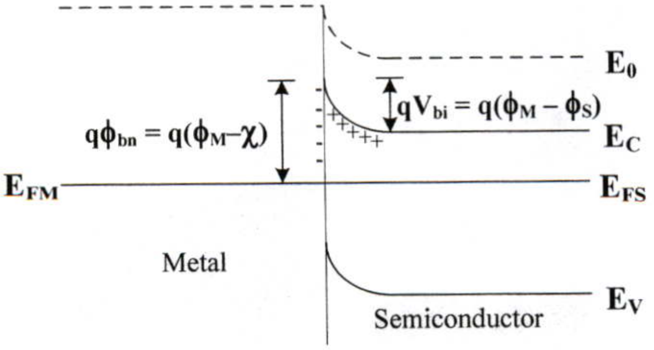
$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \qquad ...(3.1)$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน (E_i) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (E_c) ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย ϕ_S มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มิ ดังสมการที่ 3.2

$$q\phi_s = E_0 - E_{FS} \qquad ...(3.2)$$

ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้ (electron affinity : χ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี้เท่ากับ 4.01 eV

การเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์ระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M > q\phi_S$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่ง-ตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D^+) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier : V_{bi}) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 3.3

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \qquad ...(3.3)$$

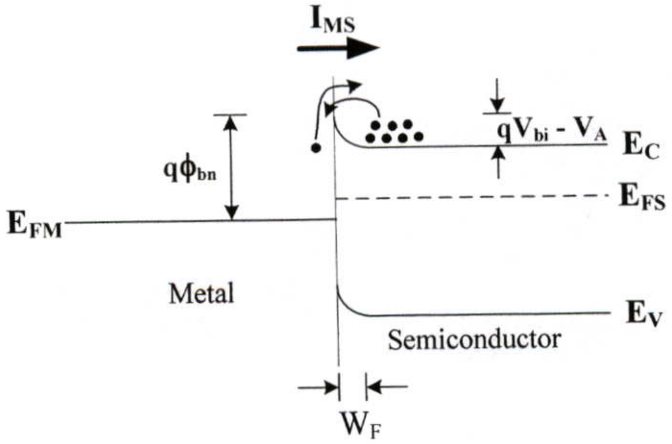
ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ช็อตกีย์ (schottky barrier : ϕ_{bn}) มีค่าดังสมการที่ 3.4 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตกีย์ต่างๆกัน

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \qquad ...(3.4)$$

3.1.2 รอยสัมผัสช็อตกีย์ขณะได้รับไบอัส [12]

3.1.2.1 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสตรง

เมื่อให้แรงดันไบอัส (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นบวก เมื่อเทียบกับด้านสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูป 3.3 ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายใน ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น (V_{bi}-V_A) และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อตกีย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ โดยไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงช็อตกีย์มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรงมีค่าดังสมการที่ (3.5)



รูปที่ 3.3 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสตรง

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right)\left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)-1\right] \qquad ...(3.5)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si) [12]

ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์

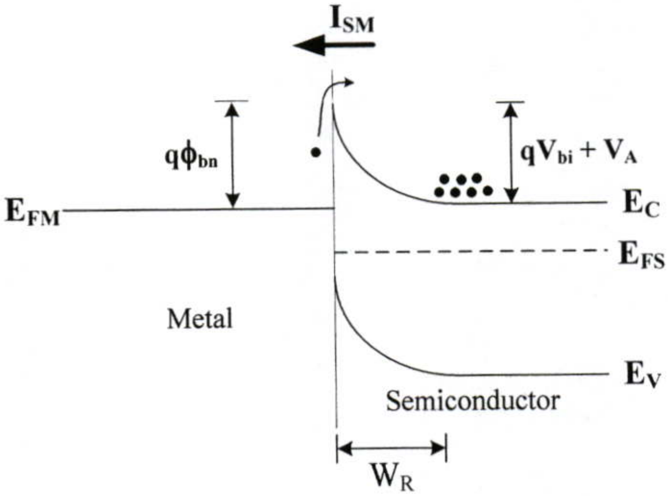
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

k คือ ค่าคงที่โบลต์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

3.1.2.2 รอยสัมผัสขณะได้รับไบอัสย้อนกลับ

เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสนี้ โดยให้ด้านโลหะมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น ($V_{bi}+V_A$) และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อน ที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อตกีย์เข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล



รูปที่ 3.4 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับมีค่าดังสมการที่ (3.6)

$$I_{\mathrm{R}} = ART^{2} \exp\left(\frac{-q\phi_{\mathrm{bn}}}{kT} \right) \qquad \ldots(3.6)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si) [12]

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์

k คือ ค่าคงที่โบสต์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width : W_d) จะมีการเปลี่ยนแปลงไปเมื่อให้แรงดันไบอัสค่าต่างๆ ดังสมการที่ (3.7) โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม

$$W_d = \sqrt{\frac{2\varepsilon_{\mathrm{S}}\left(V_{\mathrm{bi}} + V_A\right)}{qN_{\mathrm{D}}}} \qquad \ldots(3.7)$$

โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

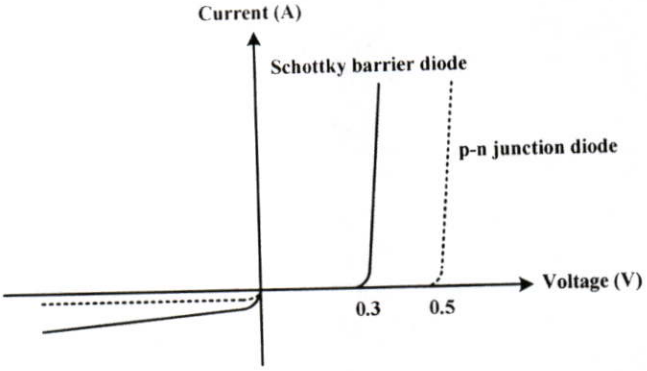
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

3.1.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสเรคติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น คือยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียวคือไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 3.5 พบว่าแรงดันภายในของช็อตกีย์ไดโอดมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ซึ่งต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็นที่มีค่าประมาณ 0.5-0.7 V และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยทำให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว ส่วนกระแสรั่วไหลของช็อตกีย์ไดโอดมีค่าสูงกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 3.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

3.1.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์

ค่าความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 3.6 จะเกิดขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ มีค่าดังสมการที่ 3.8

$$C = \frac{A\varepsilon_S}{W} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi}+V_A)}} \qquad \ldots(3.8)$$

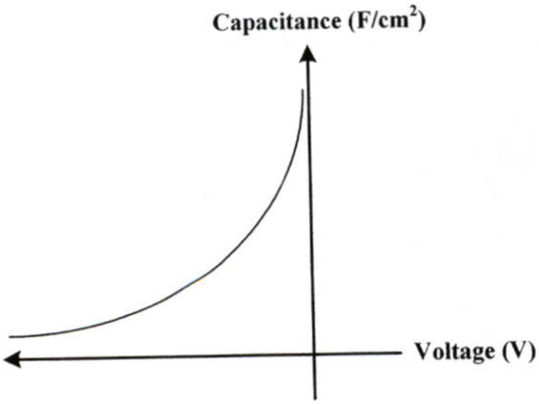
โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

V_A คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ



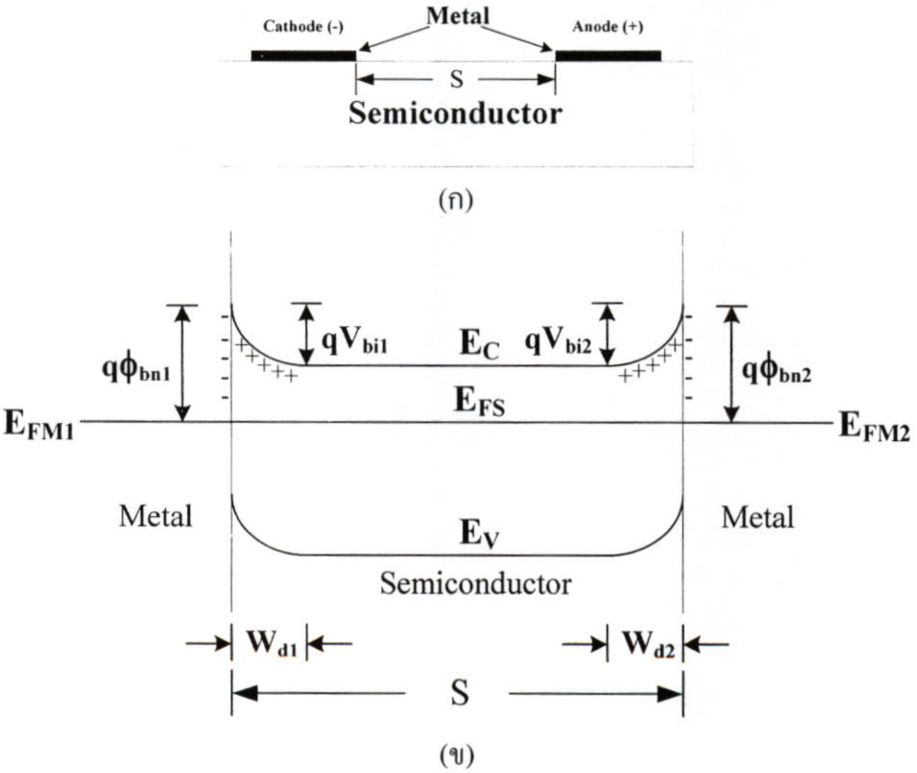
รูปที่ 3.6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของช็อตกีย์ไดโอด

3.2 โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM จัดอยู่ในกลุ่มช็อตกีย์โฟโตไดโอด โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสช็อตกีย์ 2 รอยสัมผัส ต่อแบบหันหลังชนกัน มีคุณสมบัติเด่นคือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี กระแสมืดต่ำ มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลานาร์ กระบวนการสร้างง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย เนื่องจากและกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟต จึงทำให้ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน และเพื่อให้เข้าใจถึงโครงสร้างและหลักการทำงานในหัวข้อนี้จึงจะได้อธิบายโครงสร้างและหลักการทำงาน โดยนำทฤษฎีของรอยสัมผัสช็อตกีย์ที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้มาอธิบายกับโครงสร้าง MSM

3.2.1 โครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุล

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจำนวนสองรอยสัมผัส ต่อกันแบบหันหลังชนกัน (back to back) มีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบให้มีขนาดแคบมากๆ เพื่อให้โฟโตไดโอดสามารถทำงานด้วยความเร็วสูง สารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองทั้งสอง จะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า



รูปที่ 3.7 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM

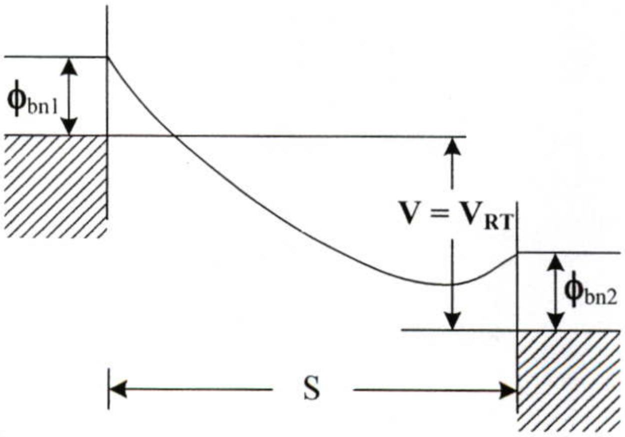
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 3.7 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสช็อตกีย์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อตกีย์ของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

3.2.2 โครงสร้าง MSM ขณะได้รับแรงดันไบอัส

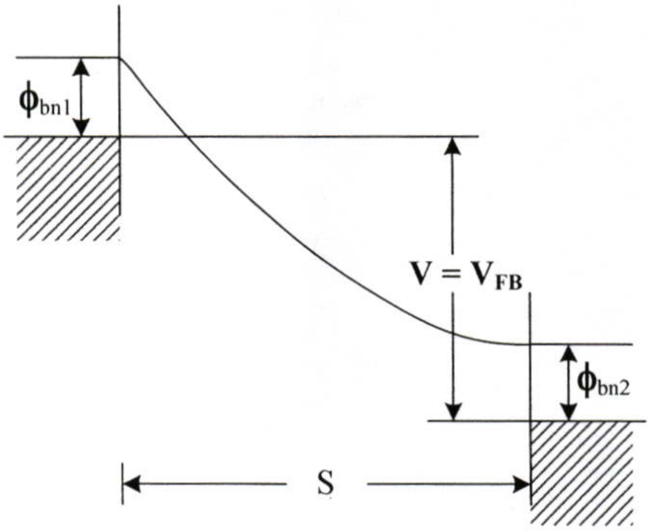
เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่รอยสัมผัสทั้งสอง ในที่นี้จะให้แรงดันไบอัสบวกเข้าที่ขั้วแอโนด และแรงดันไบอัสลบเข้าที่ขั้วแคโทด ดังนั้นรอยสัมผัสด้านแอโนดจึงเป็นลักษณะของการให้ไบอัสตรง ส่วนรอยสัมผัสด้านแคโทดจะเป็นลักษณะของการให้ไบอัสย้อนกลับ สำหรับโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่มักสร้างให้ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดแคบมากๆ เมื่อได้รับแรงดันไบอัสจึงสามารถแบ่งการทำงานออกเป็น 3 ช่วง [15] ดังนี้ คือ

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงแรงดันต่ำ ($V \leq V_{RT}$) โดยให้แรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะทั้งสองมีค่ากว้างขึ้น จนในที่สุดมาถึงที่แรงดันริช-ทรูซ์ (reach-through voltage : V_{RT}) ซึ่งบริเวณปลอดพาหะทั้งสองข้างจะสัมผัสกัน ทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเท่ากับระยะห่าง S ดังแสดงในรูปที่ 3.8



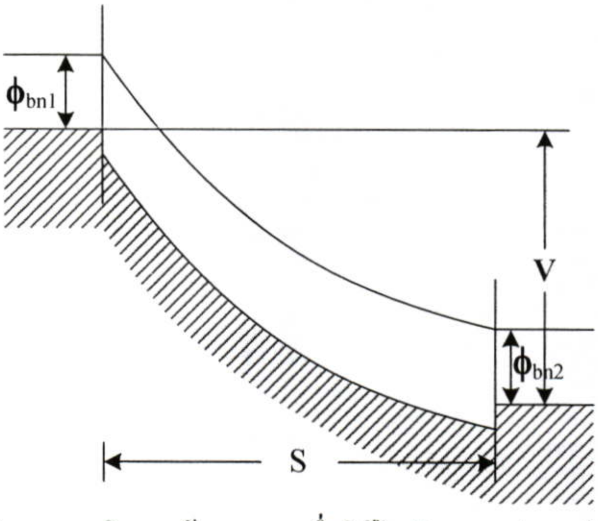
รูปที่ 3.8 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันริช-ทรูซ์ (V_{RT})

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงแรงดันระหว่างแรงดันริช์-ทรูซ์ถึงแรงดันแฟลต-แบนด์ ($V_{RT} < V \leq V_{FB}$) โดยให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นอีกจนทำให้สนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้แถบพลังงานที่ที่รอยสัมผัสด้านแอโนดมีลักษณะแบนราบ ซึ่งคือ เงื่อนไขของแฟลต-แบนด์ที่จุดนี้เรียกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์ (flat-band voltage : V_{FB}) แสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันแฟลต-แบนด์ (V_{FB})

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงแรงดันที่มากกว่า V_{FB} ($V > V_{FB}$) เมื่อให้แรงดันไบอัสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์พบว่า แถบพลังงานจะโค้งงอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์ (V_{FB})

แต่ในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง ซึ่งเป็นโครงสร้างแบบที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้ พบว่าโครงสร้าง MSM จะมีการทำงานอยู่ในช่วงที่ 1 เท่านั้นเนื่องจากระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง จึงทำให้แรงดันริช-ทรูซ์มีค่าสูงกว่าแรงดันพังทลายของ

โครงสร้าง MSM แรงดันไบอัสที่ป้อนระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด จะถูกแบ่งตกคร่อมรอยสัมผัสทั้ง 2 ด้าน โดยแรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัสช็อตกีย์ด้านแคโทดเป็น V_1 ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัสช็อตกีย์ด้านแอโนดเป็น V_2 ที่รอยสัมผัสด้านแคโทดจะเกิดลักษณะไบอัสย้อนกลับ โดยกำแพงศักย์ภายในมีค่าสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ และทำให้บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) ขยายตัวกว้างขึ้นดังสมการที่ 3.9

$$W_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_{bi} + V_1)}{q N_D}} \quad \ldots(3.9)$$

ส่วนที่รอยสัมผัสด้านแอโนด กำแพงศักย์ภายในมีค่าลดลงเป็น $V_{bi} - V_2$ และบริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด (W_A) มีขนาดแคบลง ดังสมการที่ 3.10

$$W_A = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_{bi} - V_2)}{q N_D}} \quad \ldots(3.10)$$

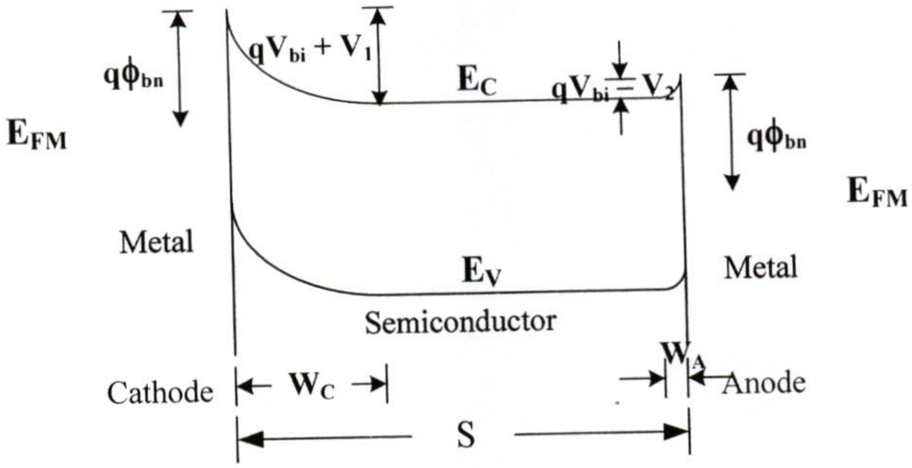
โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

โดยผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดและด้านแอโนดน้อยกว่าระยะห่างระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอโนด เนื่องจากแรงดันไบอัสมีค่าต่ำกว่าแรงดันริช-ทรูซ์ จึงทำให้เกิดมีบริเวณนิวทรัล (neutral region) ขึ้น ซึ่งบริเวณนิวทรัลนี้จะพิจารณาว่ามีสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด [9] ทำให้แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง มีลักษณะดังรูปที่ 3.11



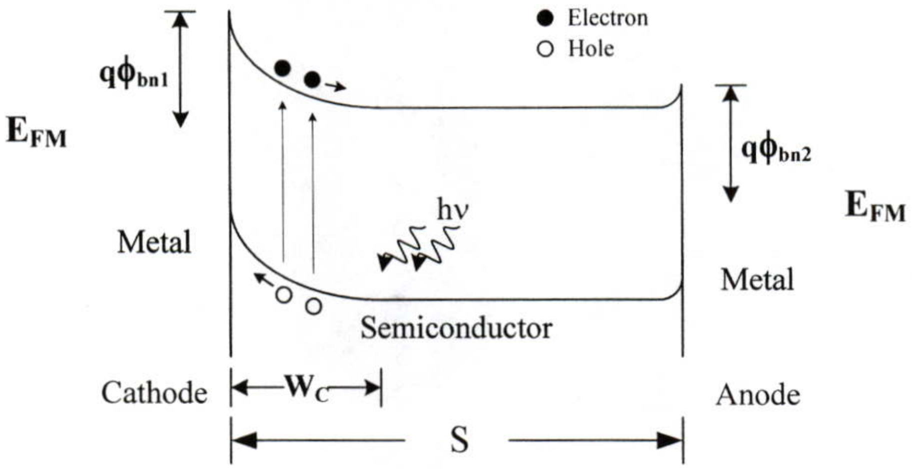
รูปที่ 3.11 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 3.11 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น ($V_{bi} + V_1$) อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อตกีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อตกีย์ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ V_{bi}-V_2 ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดของโครงสร้าง MSM จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก [15]

ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้าง MSM กรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้ความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณปลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะได้อธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

3.2.3 โครงสร้าง MSM ภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้เช่นเดียวกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM



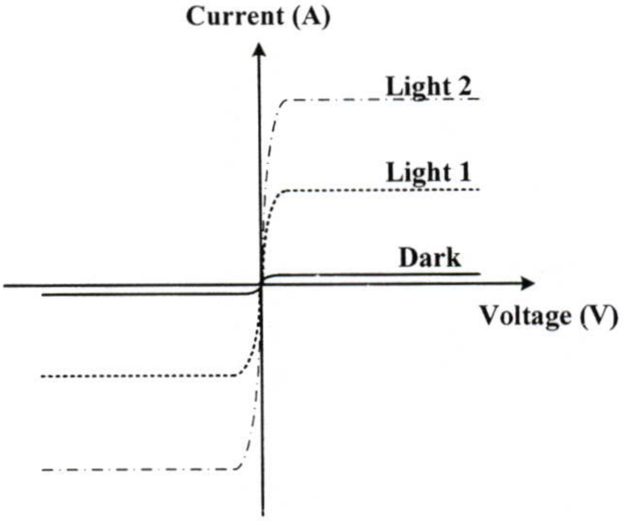
รูปที่ 3.12 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดภายใต้การให้แรงดันไบอัส แสดงดังรูปที่ 3.12 เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชิ้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณ

นิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชิ้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [16-17]

3.2.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 3.13 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ได้รับไบอัสตรงและด้านที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบมีความเข้มแสงมากขึ้น

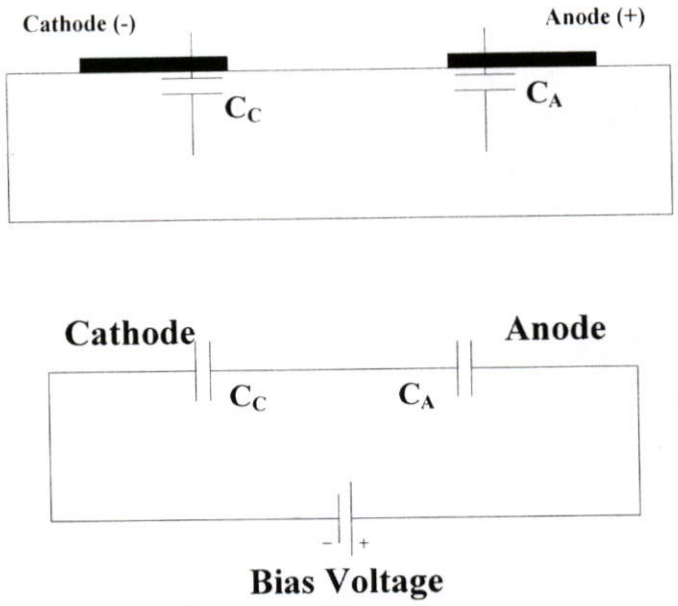


รูปที่ 3.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

3.2.5 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 3.14 โดยความจุไฟฟ้ารวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบ ด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด (C_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านแอโนด (C_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 3.11, 3.12 และ 3.13

$$C_T = \frac{C_C \, C_A}{C_C + C_A} \qquad \text{...(3.11)}$$



รูปที่ 3.14 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

และ

$$C_C = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_1)}} \qquad ...(3.12)$$

$$C_A = \sqrt{\frac{q\varepsilon_S N_D}{2(V_{bi} + V_2)}} \qquad ...(3.13)$$

โดย ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

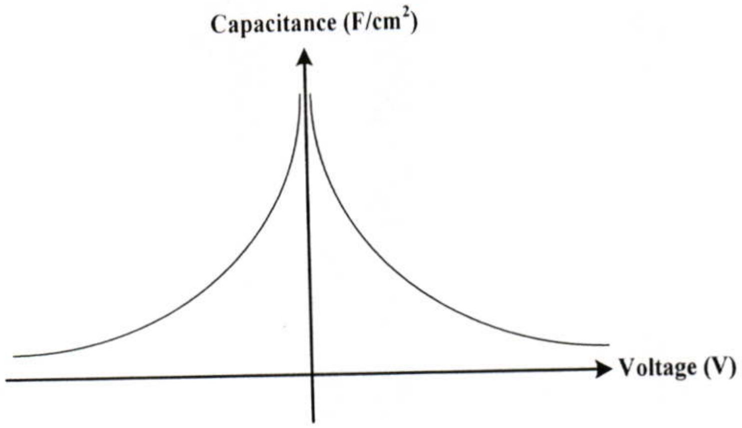
N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

V_1 คือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสด้านแคโทด

V_2 คือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสด้านแอโนด

รูปที่ 3.15 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 3.15 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

บทที่ 4

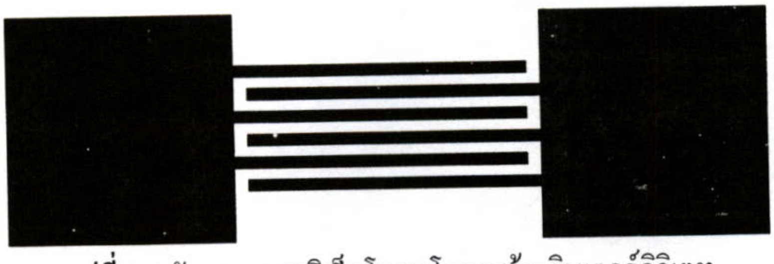
การออกแบบและกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al

โฟโตไดโอดชนิดอลูมิเนียม-ซิลิคอนชนิดเอ็น-อลูมิเนียม (Al/n-Si/Al) แบบอินเตอร์ดิจิเตท สามารถสร้างได้ง่ายด้วยกระบวนการสร้างที่ใช้กระจกต้นแบบเพียง 1-2 แผ่น ซึ่งการออกแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทให้มีขนาดและจำนวนที่เหมาะสมจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแสงได้ดีที่สุด ในบทนี้จะได้กล่าวถึงการออกแบบขั้วอิเล็กโทรดเพื่อใช้ในการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงความกว้าง ความยาวของอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และจำนวนของอิเล็กโทรด เพื่อทดลองผลตอบสนองทางแสงทั้งแบบกระแสตรงและแบบกระแสสลับ เพื่อหาลักษณะโครงสร้างและขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์

4.1 โครงสร้างและการออกแบบ

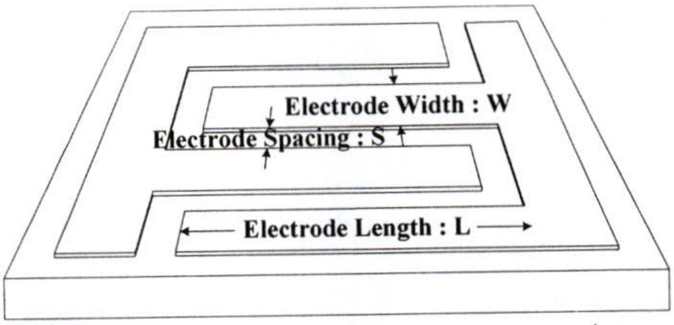
โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม-ซิลิคอนจำนวนสองรอยสัมผัส ซึ่งวัสดุทั้งสองหาสามารถได้ง่ายและยังเป็นวัสดุที่สำคัญในการสร้างวงจรรวม โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน (resistivity) 20 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งเมื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสกับโลหะอลูมิเนียมจะทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์

โครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าเป็นลักษณะของซี่คล้ายส้อม (fork shape) หรือ นิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้าน



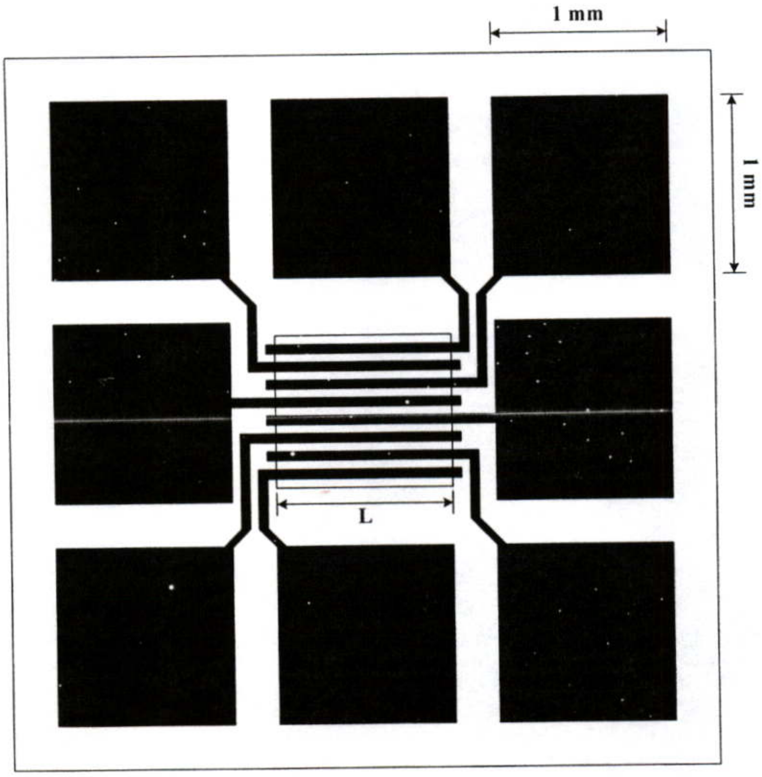
รูปที่ 4.1 ลักษณะของอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท

ภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทมีตัวแปรกำหนดขนาดที่สำคัญ 3 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (S) ความกว้างอิเล็กโทรด (W) และความยาวอิเล็กโทรด (L) ดังรูปที่ 4.2 ซึ่งการออกแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทให้มีขนาดและจำนวนที่เหมาะสมจะทำให้ได้ประสิทธิภาพการตอบสนองต่อแสงได้ดีที่สุด [8-9]



รูปที่ 4.2 ตัวแปรกำหนดขนาดของโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท

ในการออกแบบอิเล็กโทรดเพื่อใช้ในการทดลอง จะทำการออกแบบอิเล็กโทรดเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทโดยมีการแยกขั้วอิเล็กโทรดแต่ละขั้วออกจากกัน เพื่อประโยชน์ในการศึกษาผลของจำนวนขั้วอิเล็กโทรด (N) ลักษณะขั้วอิเล็กโทรดเลียนแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่ใช้ในการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 โครงสร้างขั้วอิเล็กโทรดเลียนแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่ออกแบบขึ้นเพื่อใช้ในการทดลอง

โฟโตไดโอดแต่ละตัวจะมีจำนวนขั้วอิเล็กโทรดรวม 8 ขั้ว แยกออกจากกันเป็นอิสระ โดยแต่ละขั้วจะมีจุดเชื่อมต่อ (bonding pad) ขนาด 1x1 mm อยู่ด้านข้าง ดังรูปที่ 4.3 พื้นที่รับแสงของ

โฟโตไดโอดจะอยู่ตรงกลางซึ่งจะใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำหน้าที่กำหนดความยาวของอิเล็กโทรด และพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด

โดยการออกแบบโครงสร้างอิเล็กโทรดเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทนี้จะแบ่งออกเป็น 3 ชุด เพื่อใช้ในการศึกษาขนาดที่เหมาะสมของแต่ละตัวแปร

ชุดที่ 1 ออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (S) โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลง คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 μm โดยที่มีความกว้างของอิเล็กโทรดคงที่ 40 μm ความยาวอิเล็กโทรด 1 mm

ชุดที่ 2 ออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบผลของความกว้างของอิเล็กโทรด (W)โดยมีความกว้างของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลง คือ 20, 40, 60, 80 และ 100 μm โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดคงที่ 20 μm และความยาวอิเล็กโทรดคงที่ 1 mm

ชุดที่ 3 ออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบผลของความยาวของอิเล็กโทรด (L) โดยมีความยาวของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลง คือ 0.5, 1, 1.5 และ 2 mm โดยมีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดคงที่ 20 μm และความกว้างของอิเล็กโทรดคงที่ 40 μm

ซึ่งเมื่อทำการศึกษาผลของตัวแปรต่างๆแล้ว จะได้ข้อสรุปสำหรับขนาดที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ด้วยเทคโนโลยีวงจรรวมของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ จากข้อสรุปดังกล่าวจะได้นำไปออกแบบเป็นโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทที่เห็นดังรูปที่ 4.1 ต่อไป

4.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมซึ่งใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลังจากขั้นตอนการออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบ (mask) แล้วจึงจะเริ่มกระบวนการสร้าง โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระนาบ (100) สภาพต้านทาน 20 โอห์ม-เซนติเมตร มาเข้าสู่กระบวนการสร้าง เริ่มจาก

1. ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น
   - อุลตร้าโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธ์ (de-ionization water : DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
   - จุ่มใน DI 1 แก้ว
   - เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
   - ต้มในกรดไนตริก (nitric acid : HNO_3) จำนวน 2 แก้วๆ ละ 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
   - จุ่มใน DI 1 แก้ว
   - ต้มใน DI 2 แก้วๆ ละ 5 นาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทธีรีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- อุลตร้าโซนิคในอะซิโตน (Acetone) 2 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid : HF) ที่มีความเข้มข้น 5 % ใช้เวลา 20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการออกซิเดชัน

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชั่น (thermal oxidation) ให้ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไดซ์ที่มีความหนา 5000 Å โดยให้แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 ^{o}C เงื่อนไขและกระบวนการสร้างดังนี้

- ทำการออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชั่นแบบชื้นเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชั่นแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1200 cc/นาที

3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี มาร์กที่ 1

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 ^{o}C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 1 ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาส์ค (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 10 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสง โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH_3F ในอัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที เป็นเวลาประมาณ 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

4. กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ 2 x 10^{-6} Torr

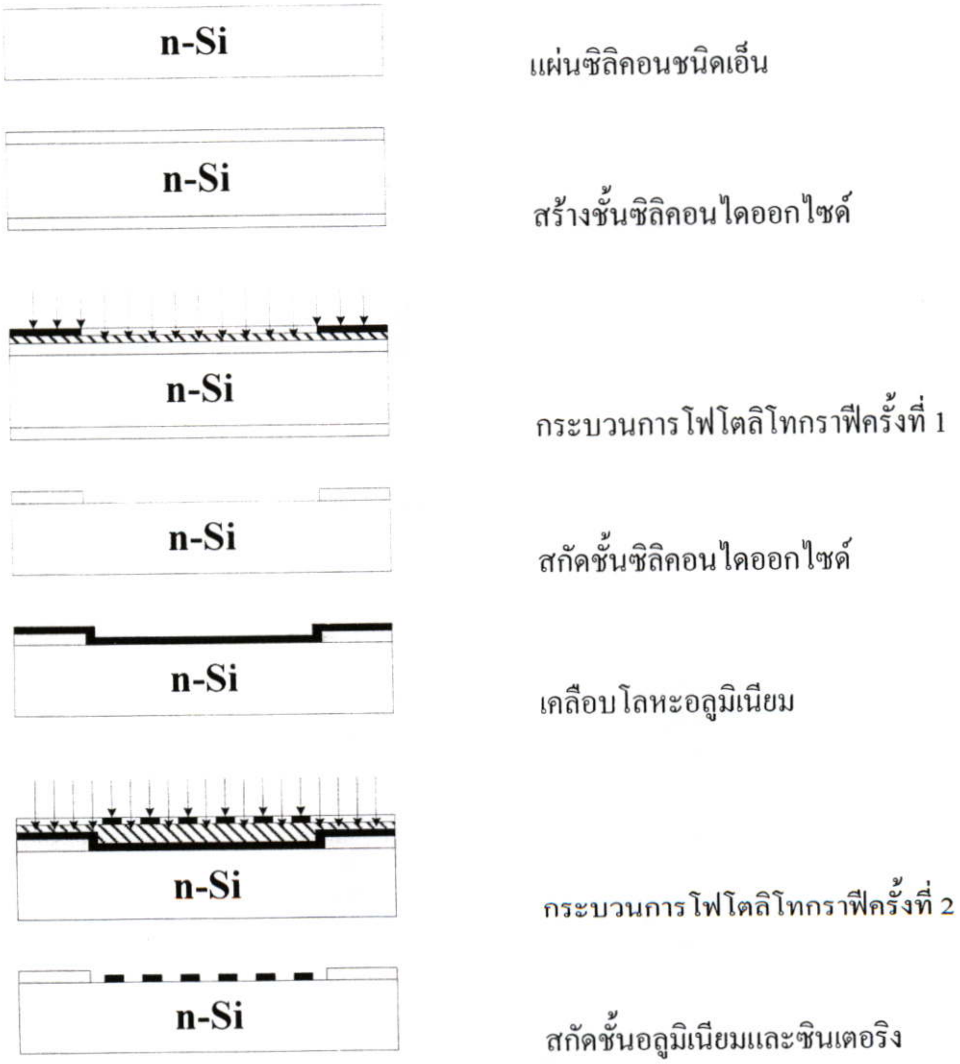
5. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟฟี มาร์กที่ 2
- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 2 ด้วยเครื่องปรับซ้อนมาส์ค (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 10 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างเป็นขั้วอิเล็กโทรด ใช้สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ซึ่งมีส่วนผสมของ H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : H_2O ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 โดยจุ่มลงในสารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิประมาณ 40 °C ใช้เวลาประมาณ 10-20 วินาที

- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

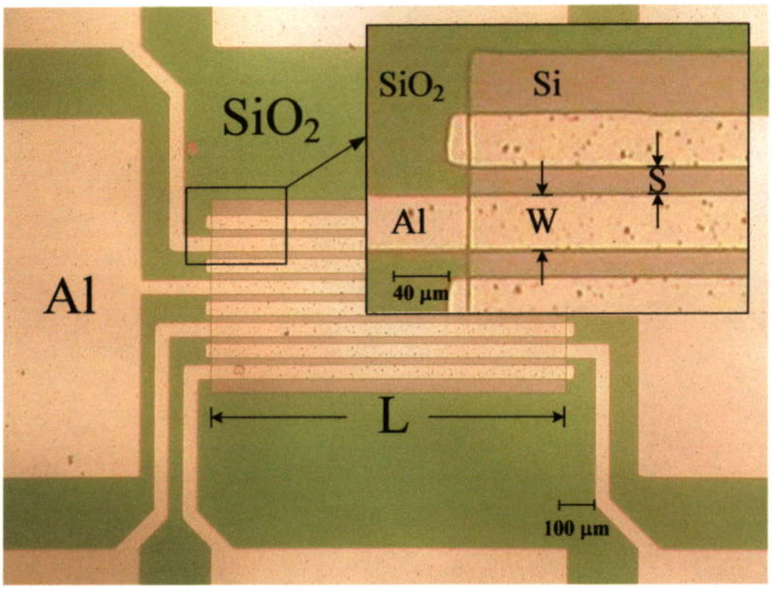
6. กระบวนการซินเตอร์ริง

กระบวนการซินเตอริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}$C โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1000 cc/นาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ [19]

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al สรุปได้ดังรูปที่ 4.4 ส่วน



รูปที่ 4.4 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al



รูปที่ 4.5 โฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น

รูปที่ 4.5 แสดงภาพถ่ายของชิ้นงานผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า ของโฟโต-ไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขนาดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20 μm ความกว้างของอิเล็กโทรด 40 μm ความยาวของอิเล็กโทรด 1 mm

บทที่ 5
การทดลอง ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง

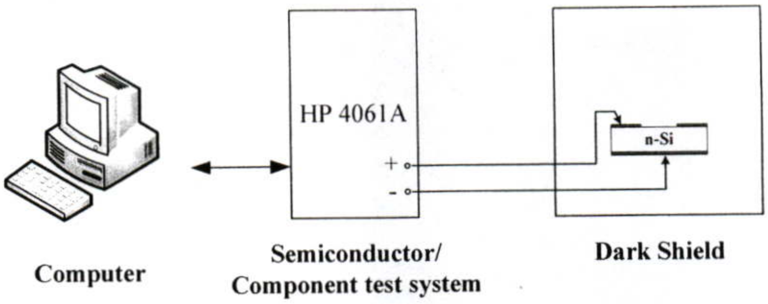
ในบทนี้จะได้กล่าวถึงลำดับขั้นตอนการทดลอง ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน ตามลำดับขั้นตอนการศึกษา การทดลองตอนที่ 1 มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อหาขนาดของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมในการสร้างเป็นโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท โดยศึกษาจากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน และผลตอบสนองทางความถี่ ส่วนการทดลองตอนที่ 2 เป็นการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท และศึกษาคุณสมบัติของโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้น

5.1 การทดลองตอนที่ 1

เนื่องจากโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสช็อตกีย์ 2 รอยสัมผัส การทดลองตอนที่ 1 นี้ในขั้นแรกจึงทำการทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอน ซึ่งเป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ จากนั้นจะเป็นการทดสอบผลตอบสนองของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al เพื่อศึกษาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความกว้างของอิเล็กโทรด ความยาวของอิเล็กโทรดและจำนวนของอิเล็กโทรด โดยศึกษาผลตอบสนองในแบบของสัญญาณแสงกระแสตรงและกระแสสลับ โดยลักษณะอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองได้ออกแบบเลียนแบบอิเล็กโทรดโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทดังที่ได้อธิบายในบทที่ 4 ผลการทดลองจะแบ่งออกเป็นการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และวัดผลตอบสนองต่อความถี่ของโฟโตไดโอด ข้อมูลจากผลการทดลองที่ได้จะนำมาวิเคราะห์เพื่อพิจารณาระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความกว้าง ความยาวและจำนวนของอิเล็กโทรดที่เหมาะสมเพื่อใช้ออกแบบอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทต่อไป

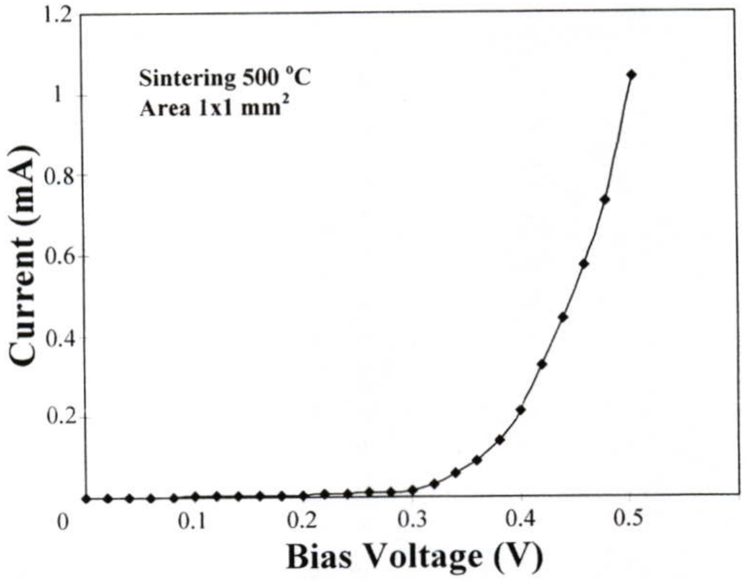
5.1.1 ผลการทดสอบสมบัติของรอยสัมผัสช็อตกีย์

สมบัติของรอยสัมผัสช็อตกีย์ที่สำคัญได้แก่ แรงดันภายใน (V_{bi}) และความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์ (ϕ_{bn}) การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์จะใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor/Component test system) HP 4061A แสดงดังแผนภาพในรูปที่ 5.1 โดยเทคนิคการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ร่วมกับการคำนวณจะทราบถึงแรงดันภายใน และความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์



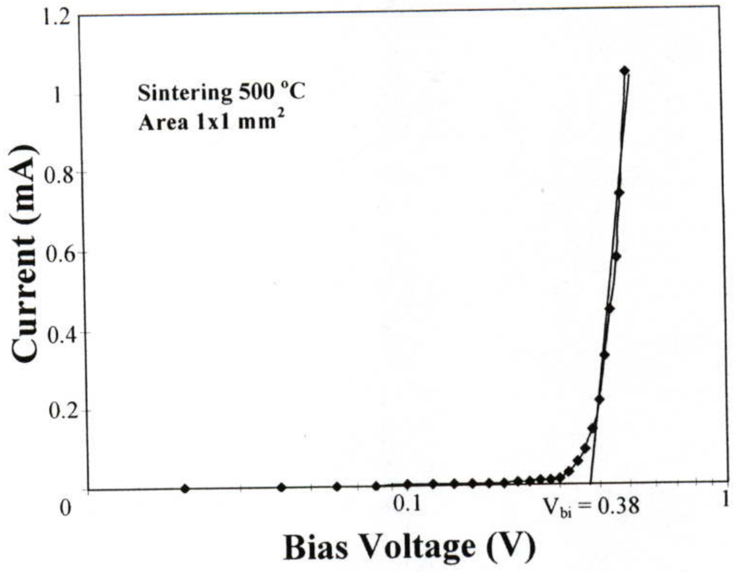
รูปที่ 5.1 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองกำแพงศักย์ช็อตกีย์

ในการสร้างรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอน เพื่อให้เกิดรอยสัมผัสที่ดี จะทำการสร้างโดยใช้เงื่อนไขการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที [18] หลังจากนั้นจะทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์ที่สร้างขึ้นด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ซึ่งลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์จะแสดงในรูปที่ 5.2



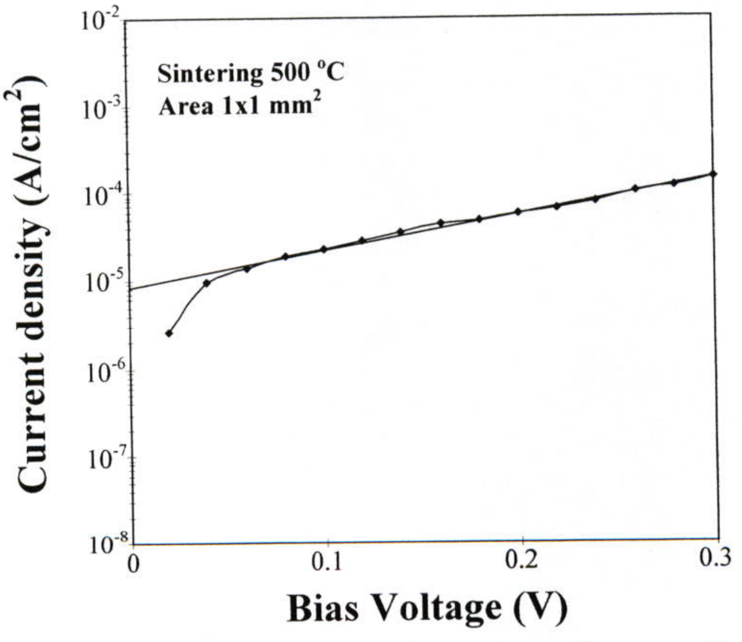
รูปที่ 5.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนชนิดเอ็น

เมื่อนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันมาหาค่าแรงดันภายในโดยแกนตั้งของกราฟเป็นแกนกระแส ส่วนแกนนอนเป็นแกนแรงดันไบอัสในแบบกึ่งล็อก (semi-log) ดังรูปที่ 5.3 พบว่ารอยสัมผัสช็อตกีย์มีแรงดันภายในประมาณ 0.38 โวลต์ ซึ่งสอดคล้องในทำนองเดียวกับการหาค่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตกีย์ที่ผ่านมา [4,5,18]



รูปที่ 5.3 การหาแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตกีย์

สำหรับกำแพงศักย์ช็อตกีย์สามารถหาได้ด้วยเทคนิคกระแส-แรงดัน [4,5,19] โดยนำลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นกระแส (J) - แรงดันในแบบกึ่งล็อก ดังรูปที่ 5.4 เมื่อลากเส้นตรงผ่านจุดไปตัดแกนความหนาแน่นกระแส จะได้ความหนาแน่นของกระแสที่แรงดันไบอัสเท่ากันศูนย์ หรือเรียกว่าความหนาแน่นกระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (J_0) โดยความหนาแน่นกระแสสามารถหาได้จากสมการที่ 5.1



รูปที่ 5.4 การหาค่า J_0 จากกราฟความหนาแน่นกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อตกีย์

$$J = J_0\left\{\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right)-1\right\} \quad ...(5.1)$$

โดยที่ J_0 คือ ความหนาแน่นกระแสิ่มตัวย้อนกลับ มีค่าเท่ากับ

$$J_0 = RT^2\exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad ...(5.2)$$

ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์สามารถหาได้จาก

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{RT^2}{J_0}\right) \quad ...(5.3)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่ของโบสต์มันน์

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

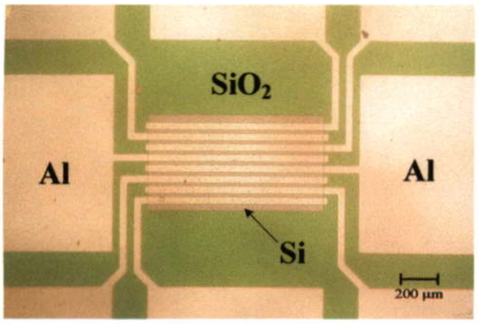
R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่าเท่ากับ 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si) [12]

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

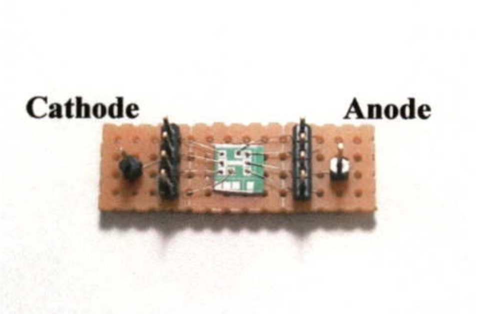
เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 5.3 ทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตกีย์เท่ากับ 0.72 V ซึ่งได้ผลลัพธ์ตรงกับทฤษฎีและผลการทดลองที่มีมาก่อนหน้านี้ [4,5,12,18]

5.1.2 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดในสัญญาณแสงกระแสตรง

เมื่อทำการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วอิเล็กโทรดเลียนแบบอินเตอร์ดิจิเตทเรียบร้อยแล้ว จึงทำการตัดแยกชิ้นงานและทำการเชื่อมต่อขั้วอิเล็กโทรดด้วยกาวเงินดังรูปที่ 5.5 เพื่อทำการวัดผลการทดลองต่อไป



(ก)



(ข)

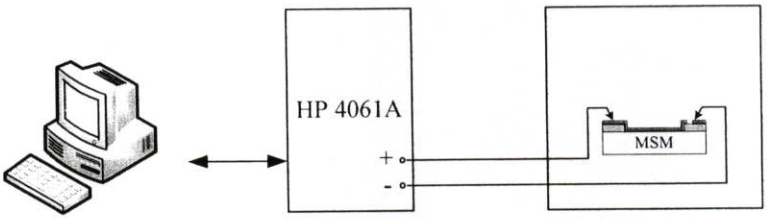
รูปที่ 5.5 ภาพของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีขั้วอิเล็กโทรดเลียนแบบอินเตอร์ดิจิเตท

(ก) ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่า

(ข) ภาพชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน

5.1.2.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสงกระทบ

การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ หรือที่เรียกว่ากระแสมืด (I_{dark}) ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A ซึ่งแสดงแผนภาพของเครื่องมือดังรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ แสดงดังรูปที่ 5.7 ซึ่งพบว่ากระแสมืดของโฟโตไดโอดมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นกับแรงดันไบอัส เมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นกระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้นตามนอกจากกระแสมืดจะเพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสแล้ว การเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรดมีผลทำให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดเปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ที่แรงดันไบอัส 5 โวลต์ โฟโตไดโอดที่มีจำนวนอิเล็กโทรด 2, 4, 6 และ 8 ขั้ว กระแสมืดมีค่าเท่ากับ 18 nA, 30 nA, 55 nA และ 102 nA ตามลำดับ โดยมีความสมมาตรกันทั้งด้านบวกและลบ

การที่กระแสมืดเปลี่ยนแปลงตามจำนวนอิเล็กโทรดเนื่องมาจาก การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดจะทำให้พื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์เพิ่มขึ้น จากสมการที่ 5.4 พบว่ากระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อตกีย์แปรผันกับขนาดพื้นที่ของรอยสัมผัส

$$I_0 = ART^2 e^{\frac{-q\phi_{bn}}{kT}} \quad ...(5.4)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส

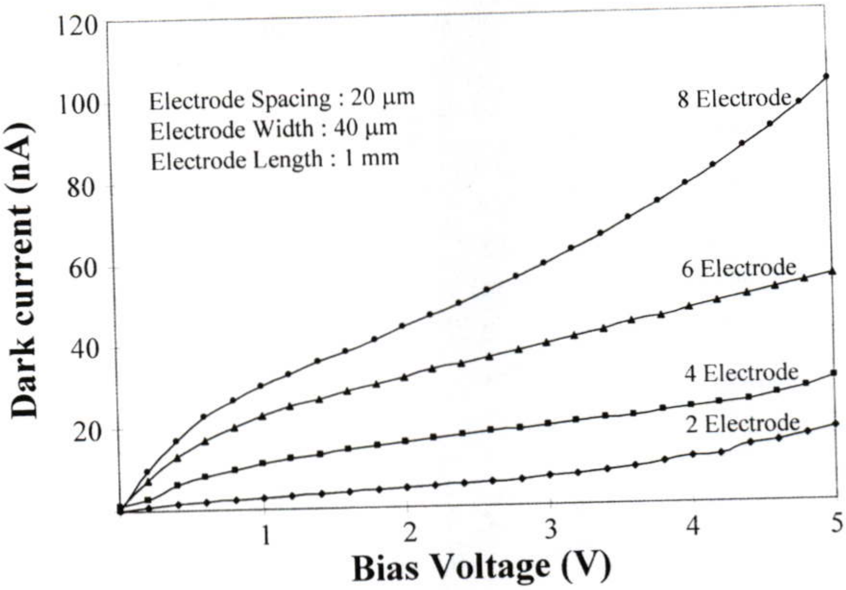
R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า 110 $A.cm^{-2}.K^{-2}$ (n-Si) [12]

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อตกีย์

k คือ ค่าคงที่โบลต์มันน์ มีค่าเท่ากับ 8.617×10^{-5} eV/K

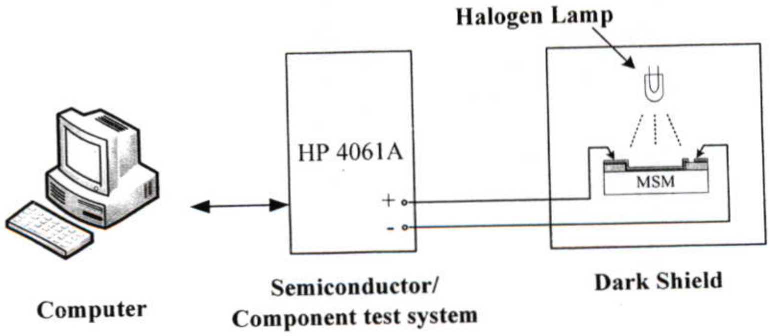


รูปที่ 5.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วอิเล็กโทรด

นอกจากการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรดจะทำให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นแล้ว การเปลี่ยนแปลงความกว้างของอิเล็กโทรด และการเปลี่ยนแปลงความยาวของอิเล็กโทรด ซึ่งทำให้พื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์เพิ่มขึ้น ต่างก็ทำให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดสูงขึ้นด้วยเช่นกัน ส่วนแรงดันพังทลายของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al มีค่าอยู่ในช่วง 8-15 โวลต์

5.1.2.2 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

ในการวัดลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันในสัญญาณแสงกระแสตรงใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน แสดงดังแผนภาพของเครื่องมือในรูปที่ 5.8

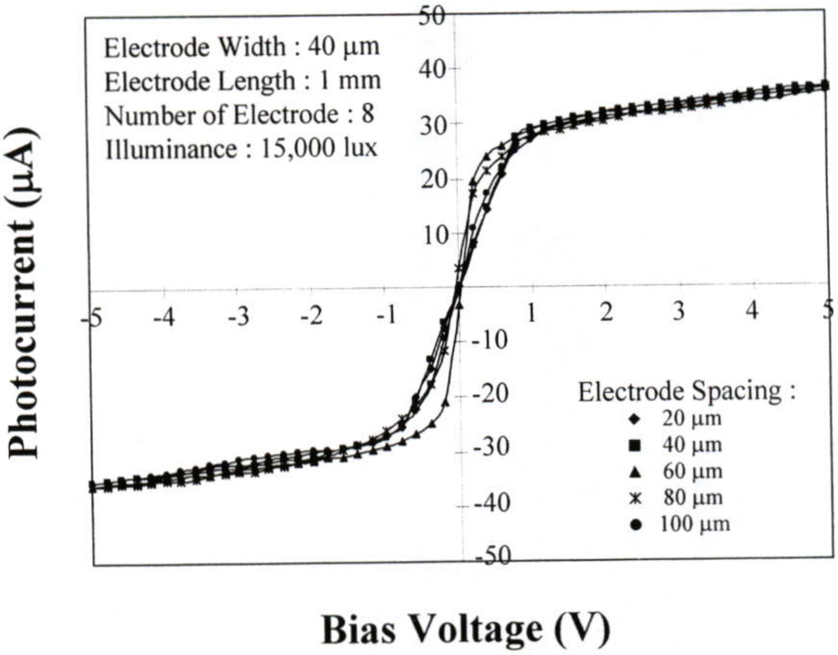


รูปที่ 5.8 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

โดยทำการวัดกระแสมืดในขณะที่โฟโตไดโอดไม่ได้รับแสงตกกระทบ (I_{dark}) และกระแสรวมของโฟโตไดโอดขณะได้รับแสงตกกระทบ (I_{total}) จากนั้นจึงทำการหาค่ากระแสแสงของโฟโต-ไดโอด (I_{photo}) จากสมการที่ 5.5

$$I_{photo} = I_{total} - I_{dark} \qquad \text{...(5.5)}$$

จากนั้นนำค่ากระแสแสงที่ได้มาแสดงเป็นกราฟลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เพื่อวิเคราะห์สมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ต่อไป



รูปที่ 5.9 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (S) ในช่วง 20-100 µm

จากผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ในรูปที่ 5.9 พบว่าโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด 20, 40, 60, 80 และ 100 µm ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่งให้กระแสแสงใกล้เคียงกัน โดยที่แรงดันไบอัส 4 โวลต์ จะได้กระแสแสงประมาณ 34 µA ซึ่งการทดลองนี้ให้ผลที่สอดคล้องกับการทดสอบกับลวดลายอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว [18] สาเหตุที่กระแสแสงของโฟโตไดโอดไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เพราะการเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดถึงจะทำให้พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้น แต่พื้นที่ที่เพิ่มขึ้นกลับเป็นส่วนที่ไม่ทำให้เกิดกระแสแสง เนื่องจากกระแสแสงของโฟโตไดโอดจะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณปลอดพาหะเท่านั้น[6] ซึ่งสามารถคำนวณความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (W_C) ได้จากสมการที่ 5.6

$$W_C = \left\{ \frac{2\varepsilon}{qN_D} \left(V_{bi} + V_1 \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad \ldots(5.6)$$

โดยที่ ε คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

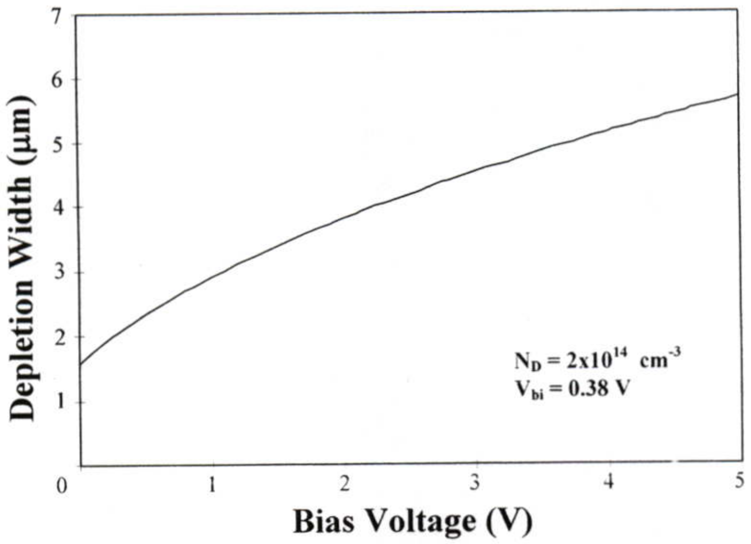
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602 x 10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

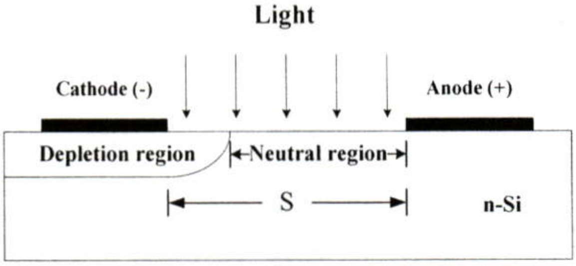
V_A คือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสช็อตกีย์

เมื่อแทนค่าต่างๆ ลงในสมการที่ 5.6 จะได้ว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะแปรผันกับแรงดันไบอัสเป็นฟังก์ชันพาราโบลาร์ ดังแสดงได้จากรูปที่ 5.10



รูปที่ 5.10 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

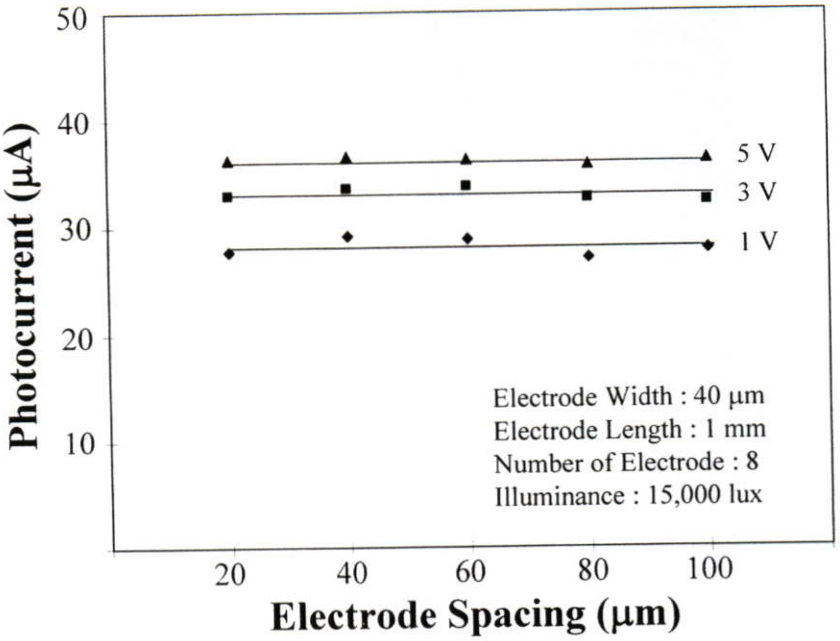
จากความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสและความกว้างบริเวณปลอดพาหะในรูปที่ 5.10 พบว่าเมื่อให้แรงดันไบอัส 5 โวลต์ จะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวประมาณ 5.7 μm ในขณะที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่น้อยที่สุดที่สร้างขึ้นมีขนาด 20 μm ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วแคโทดและแอโนดจึงประกอบไปด้วยบริเวณปลอดพาหะและบริเวณที่เป็นกลางหรือเรียกว่าบริเวณนิวทรัล ซึ่งแสดงสมบัติเป็นกลางทางไฟฟ้า ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมเนื่องจากพิจารณาว่าแรงดันเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะ ดังแสดงในรูปที่ 5.11



รูปที่ 5.11 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีขนาดกว้าง เมื่อให้แรงดันไบอัสแล้ว เกิดบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล

เมื่อแรงดันไบอัสคงที่ การเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจึงทำให้เฉพาะส่วนที่เป็นบริเวณนิวทรัลมีความกว้างเพิ่มขึ้น เมื่อแสงตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดจะทำให้คู่อิเล็ตรอน-โฮลเกิดขึ้นทั้งในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล สนามไฟฟ้าที่ตกคร่อมในบริเวณปลอดพาหะจะทำให้โฮลเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับทิศของสนามไฟฟ้าเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัลโฮลที่เกิดขึ้นบางส่วนจะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เข้าสู่บริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งให้เคลื่อนที่ไปยังขั้วแคโทด โฮลส่วนที่เหลือจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในบริเวณนิวทรัล เนื่องจากแผ่นผลึกฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นมีปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับอะตอมสารเจือที่อยู่ในซิลิคอน การเคลื่อนที่แบบแพร่ของอิเล็กตรอนจึงเกิดขึ้นได้น้อย โดยอิเล็กตรอนส่วนใหญ่จะรวมตัวกับโฮลในที่สุด จากคำอธิบายข้างต้นจึงสรุปได้ว่ากระแสแสงของโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al จึงเป็นกระแสแสงที่เกิดจากโฮล [13,16,17] การเพิ่มแรงดันไบอัสจะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวมากขึ้นกระแสแสงที่ได้จากโฟโตไดโอดจึงมีค่าสูงขึ้น ดังผลการทดลองในรูปที่ 5.9

เมื่อนำข้อมูลจากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันในรูปที่ 5.9 มาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระว่างระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกับกระแสแสง ในรูปที่ 5.12 พบว่าที่แรงดันไบอัส 1, 3 และ 5 โวลต์พบว่าความสัมพันธ์เป็นไปตามแนวโน้มเดียวกัน คือ ค่ากระแสแสงมีค่าคงไม่ขึ้นกับระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด โดยที่แรงดันดันไบอัส 1, 3 และ 5 โวลต์ จะมีค่ากระแสแสงเฉลี่ย 27 μA, 33 μA และ 36 μA ตามลำดับ สังเกตว่าค่ากระแสแสงเฉลี่ยจะสูงขึ้นตามแรงดันไบอัส ซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะเมื่อเพิ่มแรงดันไบอัส

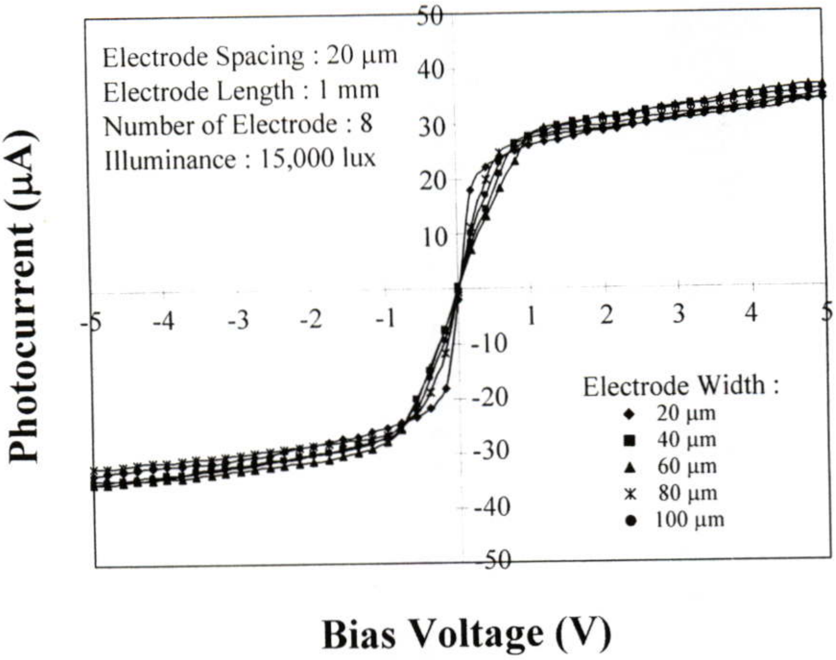


รูปที่ 5.12 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

จากผลการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้ได้ข้อสรุปว่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดของโครงสร้าง MSM ที่มีขนาดกว้างเกินกว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ไม่มีผลทำให้ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al มีการเปลี่ยนแปลง ในการออกแบบอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท จึงควรออกแบบให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบเพื่อลดความกว้างของบริเวณนิวทรัล หากลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจนทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวจากด้านแคโทดไปถึงด้านแอโนดได้ กระแสแสงที่เกิดขึ้นจะมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากเป็นกระแสรวมที่เกิดจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮล [20]

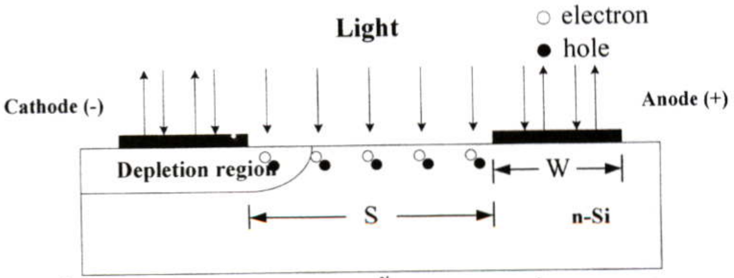
5.1.2.3 ผลของความกว้างอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

จากผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างอิเล็กโทรด ในรูปที่ 5.13 ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่งกระแสแสงที่เกิดจากโฟโตไดโอดที่มีความกว้างอิเล็กโทรด 20, 40, 60, 80 และ 100 μm มีค่าใกล้เคียงกัน ยกตัวอย่างที่แรงดันไบอัส 4 โวลต์ กระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าประมาณ 34 μA



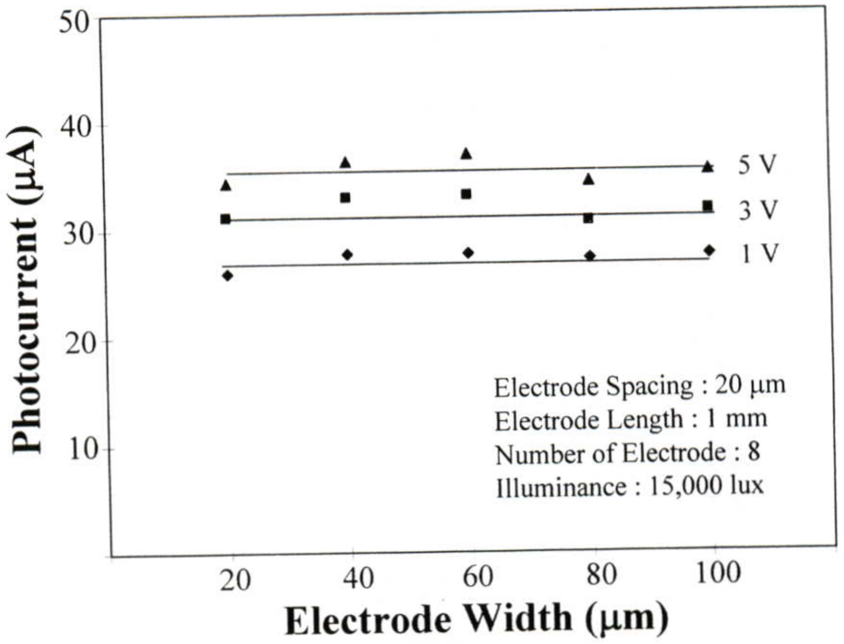
รูปที่ 5.13 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างอิเล็กโทรด (W) ในช่วง 20-100 μm

การที่กระแสแสงของโฟโตไดโอดไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เพราะการเพิ่มความกว้างอิเล็กโทรดให้มากขึ้นถึงจะทำให้มีพื้นที่บริเวณปลอดพาหะเพิ่มขึ้นแต่การเลือกใช้โลหะอลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะทึบแสงเป็นขั้วอิเล็กโทรดทำให้แสงที่ตกกระทบลงบนขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นโลหะอลูมิเนียมเกิดการสะท้อนกลับ เมื่อโฟตอนไม่สามารถทะลุผ่านชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมลงไปได้ การกระตุ้นให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮลในซิลิคอนภายใต้ขั้วอิเล็กโทรดจึงไม่เกิดขึ้น แสดงดังในรูปที่ 5.14 บริเวณปลอดพาหะที่จะทำให้เกิดกระแสแสงจึงเป็นเพียงเฉพาะบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นโดยรอบขั้วอิเล็กโทรดเท่านั้น ผลจากการสะท้อนแสงของขั้วอิเล็กโทรดจะทำให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกลดลงด้วย [8]



รูปที่ 5.14 การสะท้อนแสงของขั้วอิเล็กโทรดที่ใช้โลหะทึบแสง

จากการนำข้อมูลลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันในรูปที่ 5.13 มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างอิเล็กโทรดและกระแสแสงในรูปที่ 5.15 ที่แรงดันไบอัสตั้งแต่ 1, 3 และ 5 โวลต์ ความสัมพันธ์เป็นไปตามแนวโน้มเดียวกัน คือ ค่ากระแสแสงมีค่าคงที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงความกว้างของอิเล็กโทรด โดยที่แรงดันไบอัส 1, 3 และ 5 โวลต์จะได้ค่ากระแสแสงเฉลี่ย 27 μA, 32 μA และ 35 μA ตามลำดับ ซึ่งระดับค่ากระแสแสงเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้น เนื่องมาจากแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้นทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายตัวได้มากขึ้นนั่นเอง



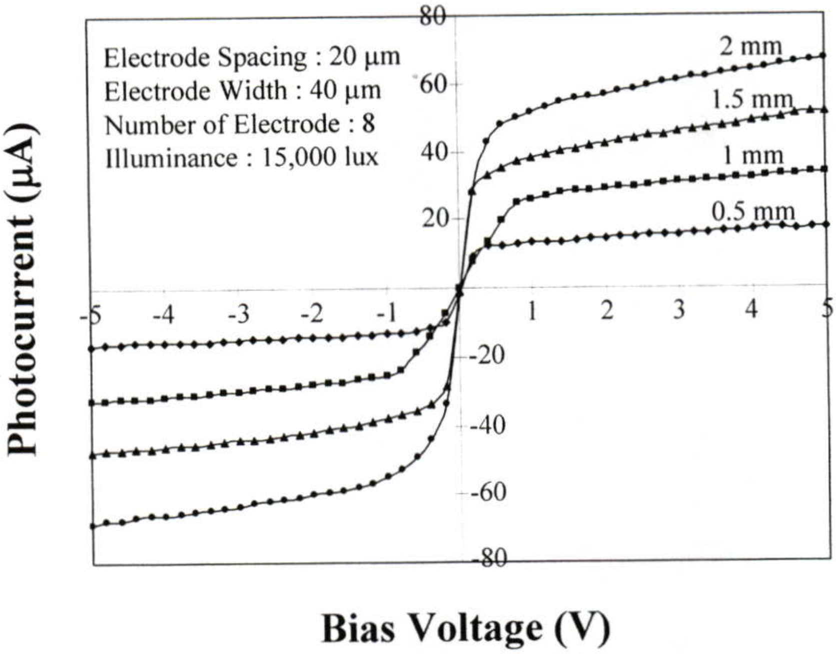
รูปที่ 5.15 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความกว้างของอิเล็กโทรด

จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ทำให้ได้ข้อสรุปว่า การเปลี่ยนแปลงความกว้างของอิเล็กโทรดไม่ทำให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al เปลี่ยนแปลง เมื่อพิจารณาผลของการสะท้อนแสงซึ่งทำให้ค่าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกลดลงด้วยแล้ว ในการออกแบบอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท จึงควรออกแบบให้ความกว้างของอิเล็กโทรดมีขนาดแคบ เพื่อลดผลของการสะท้อนแสงที่ขั้วอิเล็กโทรด และลดกระแสมืดของโฟโตไดโอด

5.1.2.4 ผลของความยาวอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

จากรูปที่ 5.16 ซึ่งเป็นผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรด ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง พบว่าโฟโตไดโอดที่มีความยาวอิเล็กโทรด 0.5 mm ให้กระแสแสงต่ำที่สุด เมื่อเพิ่มความยาวอิเล็กโทรดให้มากขึ้นเป็น 1, 1.5 และ

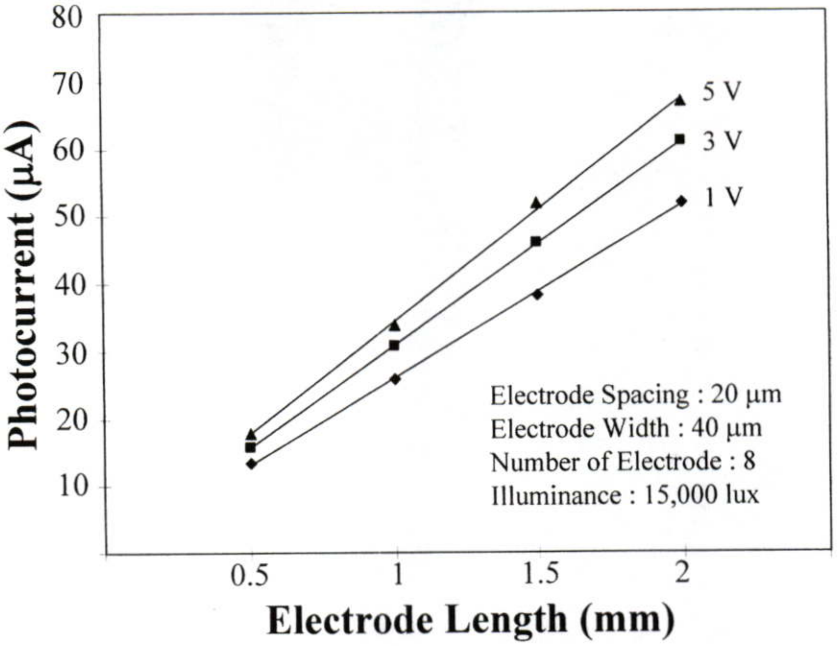
2 mm กระแสแสงจะเพิ่มสูงมากขึ้น โดยที่แรงดันไบอัส 4 โวลต์ โฟโตไดโอดที่มีความยาวอิเล็กโทรด 0.5, 1, 1.5 และ 2 mm ให้ค่ากระแสแสง 17 μA, 32 μA, 49 μA และ 64 μA ตามลำดับ สังเกตได้ว่าเมื่อความยาวของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น 2 เท่า ทำให้ค่ากระแสแสงเพิ่มขึ้นเกือบ 2 เท่าด้วยเช่นกัน ซึ่งให้ผลเหมือนกันกับอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว [18]



รูปที่ 5.16 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรด (L) ในช่วง 0.5-2 mm

วิธีการเพิ่มกระแสแสงด้วยการเพิ่มความยาวอิเล็กโทรดเป็นวิธีที่ใช้ได้ทั้งในอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวและอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท โดยการเพิ่มความยาวอิเล็กโทรดจะทำให้บริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นส่วนที่ทำให้เกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอด โดยเกิดขึ้นรอบๆ ขั้วแคโทด มีพื้นที่รวมเพิ่มมากขึ้น กระแสแสงของโฟโตไดโอดจึงมีค่าสูงขึ้น

จากการนำข้อมูลผลการทดลองในรูปที่ 5.16 มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างความยาวอิเล็กโทรดและกระแสแสงในรูปที่ 5.17 โดยเลือกข้อมูลกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 1, 3 และ 5 โวลต์ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความยาวอิเล็กโทรดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะฟังก์ชันเชิงเส้น ซึ่งความชันของกราฟความสัมพันธ์จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสพบว่าความชันของกราฟมีค่าสูงขึ้น ส่วนการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงต่อการเพิ่มความยาวอิเล็กโทรด พบว่าเมื่อความยาวอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า จะทำให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.96 เท่า ซึ่งใกล้เคียงกับในทางอุดมคติที่เมื่อเพิ่มความยาวอิเล็กโทรดเป็น 2 เท่า กระแสแสงจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าด้วยเช่นกัน



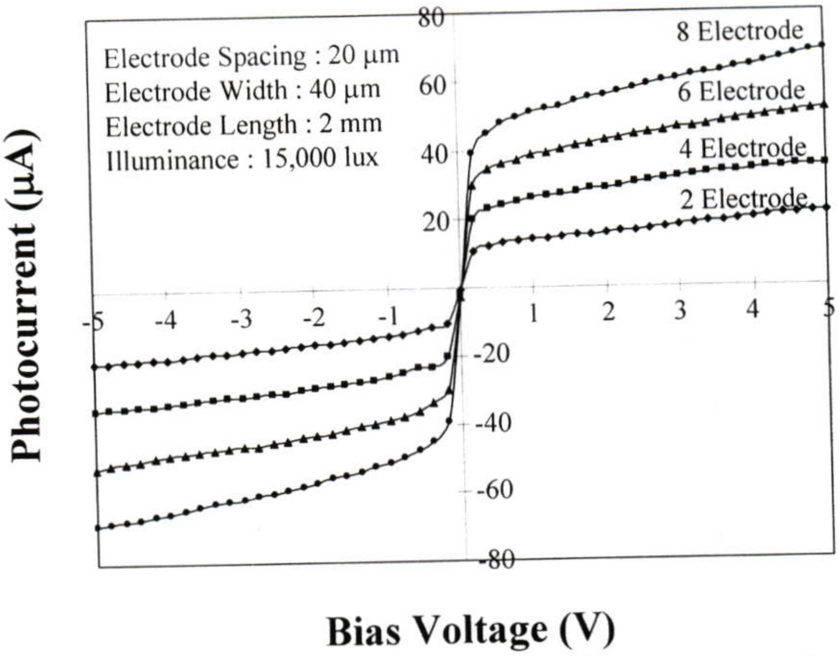
รูปที่ 5.17 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความยาวอิเล็กโทรด

จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงความยาวของอิเล็กโทรด ได้ข้อสรุปว่าการเพิ่มความยาวอิเล็กโทรดทำให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันเชิงเส้น โดยความยาวอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ทำให้ได้กระแสแสงเพิ่มขึ้นเฉลี่ยเป็น 1.96 เท่า ดังนั้นในการออกแบบอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทเพื่อให้ได้กระแสแสงสูง จึงควรให้อิเล็กโทรดมีความยาวให้ครอบคลุมพื้นที่ที่แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบให้มากที่สุด แต่ต้องคำนึงถึงกระแสมืดของโฟโตไดโอดที่เพิ่มมากขึ้นด้วยเช่นกัน

5.1.2.5 ผลของจำนวนอิเล็กโทรดต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน

รูปที่ 5.18 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรด พบว่าที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง อิเล็กโทรดจำนวน 2 ขั้วจะให้กระแสแสงต่ำที่สุดเมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดให้มากขึ้นเป็น 4, 6 และ 8 ขั้วกระแสแสงจะเพิ่มสูงมากขึ้น ที่แรงดันไบอัส 4 โวลต์ โฟโตไดโอดที่มีจำนวนอิเล็กโทรด 2, 4, 6 และ 8 ขั้ว ให้ค่ากระแสแสง 20 μA , 34 μA, 49 μA และ 64 μA ตามลำดับ

การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดทำให้บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆ อิเล็กโทรดมีพื้นที่เพิ่มมากขึ้น บริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นโดยรอบอิเล็กโทรดนี้เปรียบได้กับเส้นรอบรูปของอิเล็กโทรด ความยาวเส้นรอบรูปที่มากกว่าจะทำให้ได้กระแสแสงสูงกว่า ซึ่งการเพิ่มเส้นรอบรูปนี้นอกจากจะใช้การเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดแล้วยังสามารถใช้วิธีการเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดได้ด้วยเช่นกัน

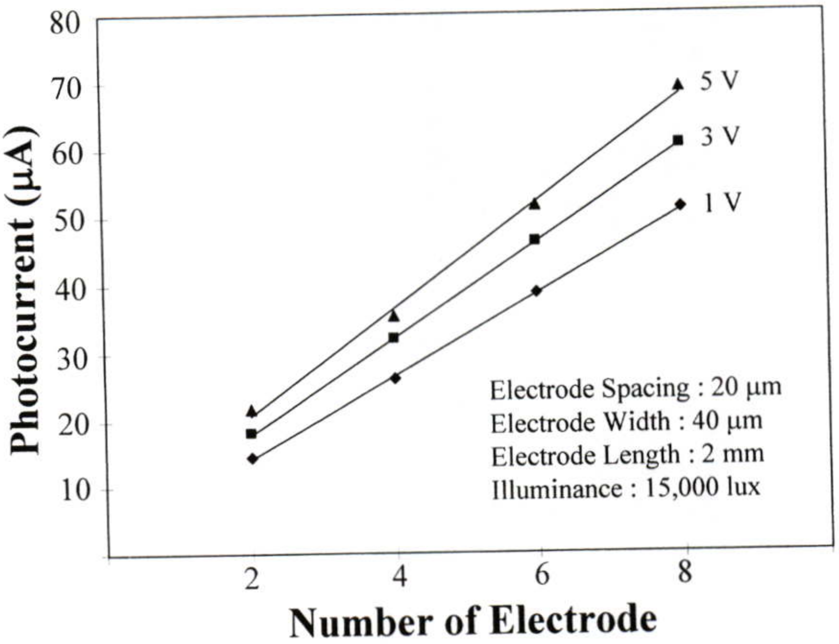


รูปที่ 5.18 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรด (N)

เมื่อเปรียบเทียบกับอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวจะเห็นว่าอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์-ดิจิเตทที่มีขั้วอิเล็กโทรด 2 ขั้ว ก็คืออิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวนั่นเอง ซึ่งข้อจำกัดของอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวคือ การเพิ่มกระแสแสงต้องใช้วิธีการเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดได้เพียงวิธีเดียว แต่ในอิเล็กโทรดที่ใช้โครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิเตท พบว่านอกจากการเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดแล้ว การเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดก็ทำให้กระแสแสงเพิ่มขึ้นได้เช่นเดียวกัน จากข้อได้เปรียบจุดนี้จึงทำให้อิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทได้รับความนิยมมากกว่าอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว

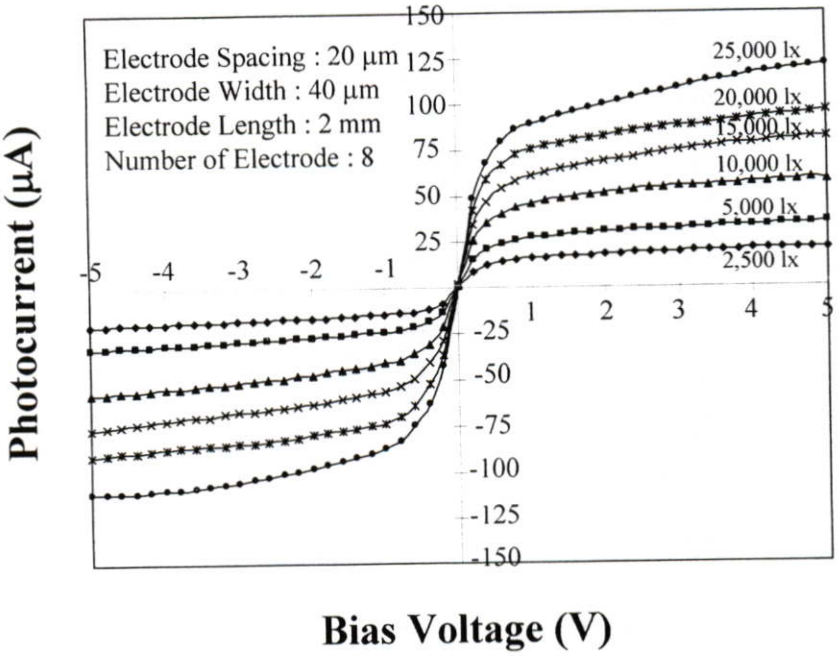
จากการนำข้อมูลผลการทดลองในรูปที่ 5.18 มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนอิเล็กโทรดและกระแสแสงในรูปที่ 5.19 ที่แรงดันไบอัส 1, 3 และ 5 โวลต์ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและจำนวนอิเล็กโทรดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในลักษณะฟังก์ชันเชิงเส้นเช่นเดียวกับการเพิ่มความยาวอิเล็กโทรด โดยความชันของกราฟความสัมพันธ์จะเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสพบว่าความชันของกราฟมีค่าสูง ส่วนการเพิ่มขึ้นของกระแสแสง พบว่าการเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดขึ้นเป็น 2 เท่า จะทำให้กระแสแสงสูงขึ้นเฉลี่ย 1.82 เท่า

จากผลการทดลองเปลี่ยนแปลงจำนวนของอิเล็กโทรด ได้ข้อสรุปว่าการเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดทำให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นแบบฟังก์ชันเชิงเส้น โดยจำนวนอิเล็กโทรดที่เพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ทำให้กระแสแสงเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 1.82 เท่า ดังนั้นในการออกแบบอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท จึงควรออกแบบให้มีจำนวนอิเล็กโทรดมีจำนวนมากพอที่จะครอบคลุมพื้นที่ที่แสงตกกระทบให้มากที่สุด แต่ต้องคำนึงถึงกระแสมืดของโฟโตไดโอดที่เพิ่มมากขึ้นด้วย



รูปที่ 5.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและจำนวนอิเล็กโทรด

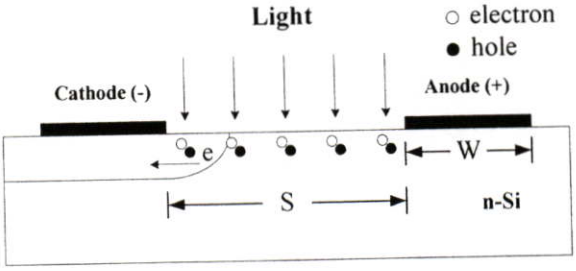
5.1.2.6 ผลของความเข้มแสงต่อลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน



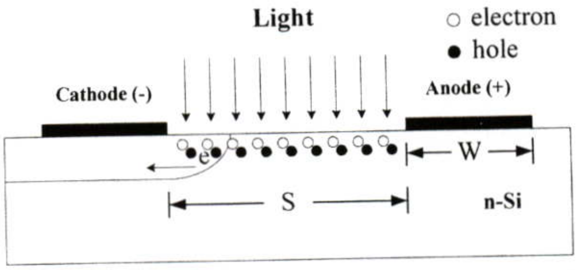
รูปที่ 5.20 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในช่วง 2,500 – 25,000 ลักซ์

ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในรูปที่ 5.20 ที่แรงดันไบอัสคงที่ค่าหนึ่ง ความเข้มแสงตกกระทบ 2500 ลักซ์ให้กระแสแสงน้อยที่สุด เมื่อเพิ่ม

ความเข้มแสงที่ตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดเป็น 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 ลักซ์ ทำให้โฟโตไดโอดมีกระแสแสงสูงมากขึ้น โดยที่แรงดันไบอัส 4 โวลต์ กระแสแสงมีค่า 19 μA, 31 μA, 52 μA, 71 μA, 83 μA และ 105 μA ตามลำดับ การที่กระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสง เพราะปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดมีมากขึ้น ความเข้มแสงหมายถึงความหนาแน่นของโฟตอนที่ตกกระทบลงบนพื้นผิวต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ เมื่อปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบมีมากขึ้น ดังแสดงได้จากรูปที่ 5.21 ทำให้อัตราการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย เมื่อปริมาณพาหะที่ทำให้เกิดกระแสมีสูงขึ้นกระแสแสงที่ได้จึงเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ



(ก)

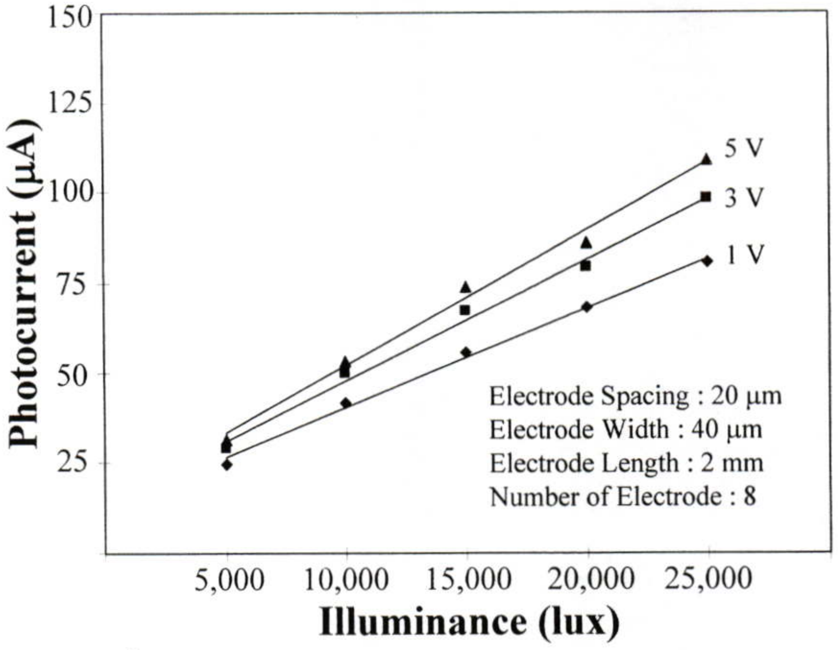


(ข)

รูปที่ 5.21 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เมื่อได้รับแสงตกกระทบ
(ก) กรณีความเข้มแสงน้อย
(ข) กรณีความเข้มแสงมาก

ด้วยการนำข้อมูลจากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในรูปที่ 5.20 มาหาเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงแสดงได้ดังรูปที่ 5.22 โดยได้เลือกข้อมูลกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 1, 3 และ 5 โวลต์ มาพิจารณา พบว่าที่แรงดันไบอัสต่างกันจะให้ความชันต่างกัน ที่แรงดันไบอัสค่าน้อย ความชันของกราฟจะมีค่าน้อย เมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นความชันของกราฟจะเพิ่มสูงขึ้น

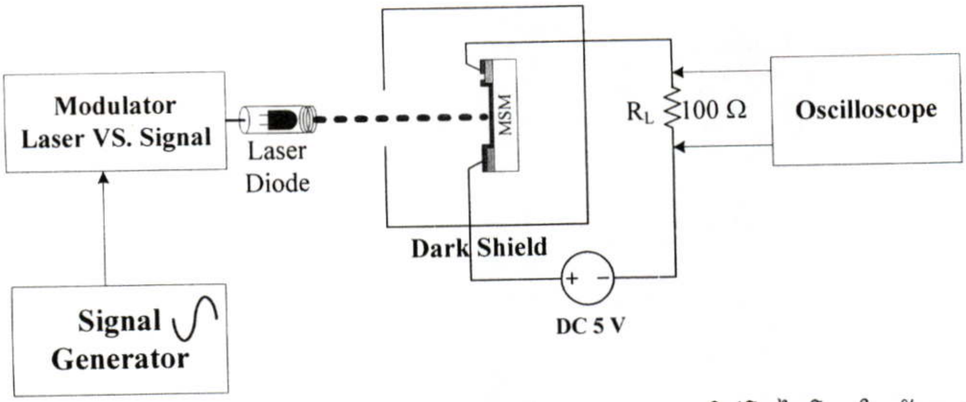
จากลักษณะสมบัติที่กล่าวข้างต้นทำให้โฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจวัดความเข้มแสงได้



รูปที่ 5.22 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสง

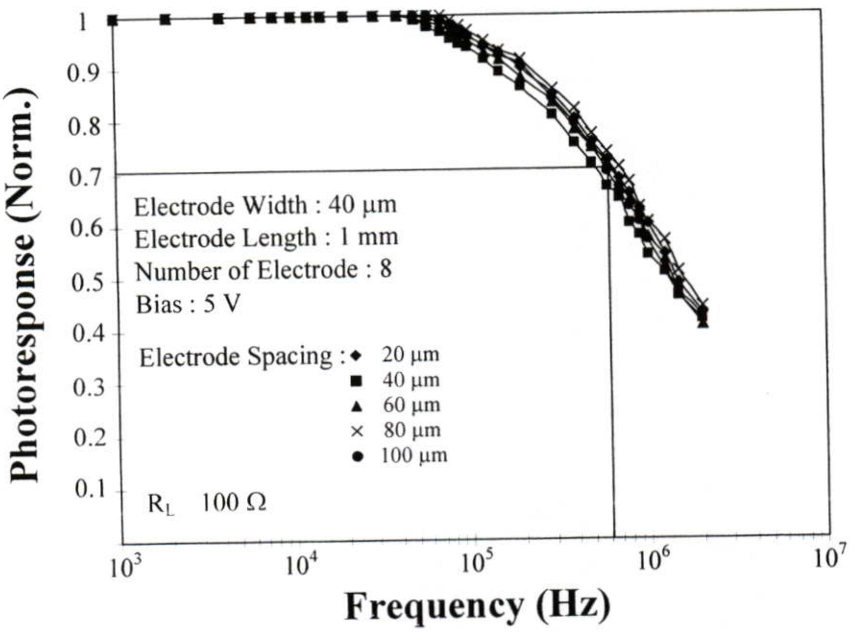
5.1.2 ผลการทดสอบลักษณะการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดในสัญญาณแสงกระแสสลับ

การวัดผลการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดในสัญญาณแสงกระแสสลับของโฟโตไดโอดทำโดยต่อวงจรวัดดังแผนภาพในรูปที่ 5.23 โดยจะใช้เครื่องกำเนิดสัญญาณ (function generator) ของบริษัท Tektronix รุ่น AFG 320 ส่งสัญญาณรูปซายน์ (sine) ขนาด 400 mV_{pp} ความถี่ต่างๆเข้าสู่วงจรมอดูเลท (modulator) ซึ่งจะทำงานร่วมกับเลเซอร์ไดโอดโดยเปลี่ยนสัญญาณให้อยู่ในรูปของสัญญาณแสงกระแสสลับ เลเซอร์ไดโอดที่ใช้มีความยาวคลื่น 670 nm ของบริษัท RS รุ่น V9323 (194-004) กำลังงาน 2.67 mW (วัดด้วยเครื่องเลเซอร์วัตต์มิเตอร์ของบริษัท Edmund Optics) โดยจัดตำแหน่งให้ลำแสงเลเซอร์ตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดซึ่งอยู่ในกล่องมืด โฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al จะต่ออนุกรมอยู่กับแหล่งจ่ายไฟและความต้านทานโหลด (R_L) การวัดสัญญาณจะวัดศักย์ไฟฟ้าที่ตกคร่อมโหลด R_L 100 โอห์ม ด้วยออสซิลโลสโคป (oscilloscope) ของบริษัท Tektronix รุ่น TDS 3012B แล้วนำค่าที่ได้ทำการนอร์มอลไรซ์ (normalize) เพื่อหาผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 5.23 แผนภาพการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดในสัญญาณแสงกระแสสลับ

5.1.3.1 ผลของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

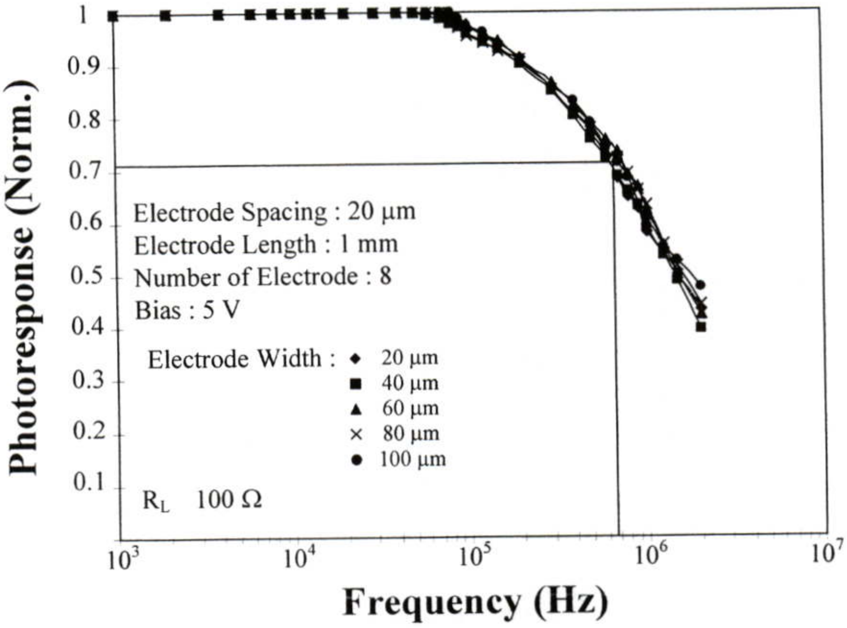


รูปที่ 5.24 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด

จากผลการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในรูปที่ 5.24 พบว่าโฟโตไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 และ 100 μm มีความถี่คัทออฟ 600, 500, 600, 700 และ 500 kHz ตามลำดับ ซึ่งการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยนี้อาจพิจารณาได้ว่าการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดไม่มีผลทำให้ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดมีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากโฟโต-ไดโอดโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบ ซึ่งความถี่คัทออฟจะลดลงเมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เนื่องจากช่วงเวลาการส่งผ่าน (transit time) มากขึ้นจากระยะทางที่

ประจุพาหะต้องเคลื่อนที่ผ่านกว้างมากขึ้นนั่นเอง ในกรณีของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกว้าง พบว่าปัจจัยที่เป็นตัวจำกัดความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอดคือช่วงเวลาการแพร่ของประจุพาหะที่เกิดขึ้นนอกบริเวณปลอดพาหะ แต่ในส่วนผลการทดลองที่ได้ความถี่คัทออฟใกล้เคียงกันอาจเนื่องมาจาก ค่าเวลาคงตัวที่เกิดจากผลคูณของความต้านทานและความจุไฟฟ้า (RC time constant) ซึ่งอิเล็กโทรดออกแบบเพื่อเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทนี้มีการแยกจุดเชื่อมต่อออกจากกัน ทำให้ความจุไฟฟ้าที่เกิดจากจุดเชื่อต่อมีค่ามาก จึงทำให้ค่าเวลาคงตัวเป็นปัจจัยที่เป็นตัวจำกัดความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอด

5.1.3.1 ผลของความกว้างอิเล็กโทรด

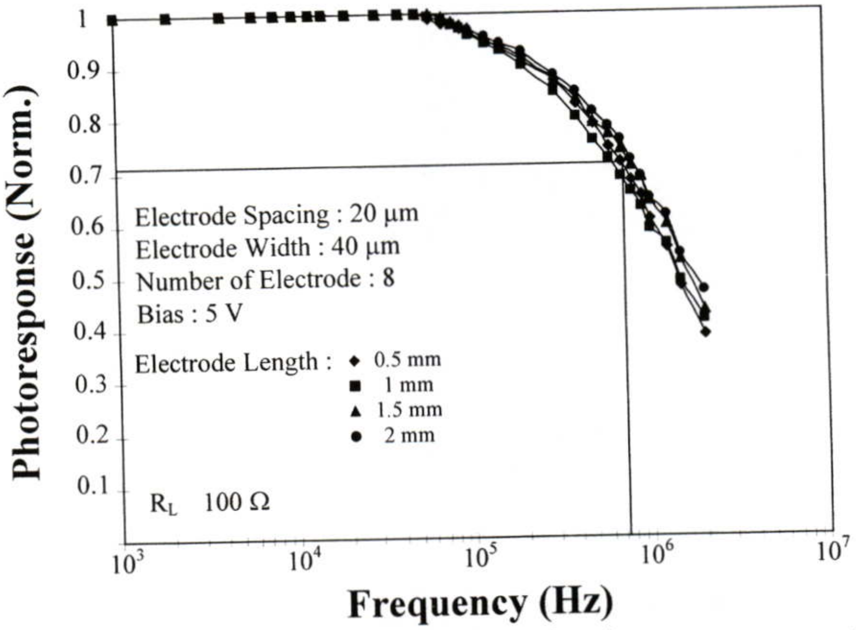


รูปที่ 5.25 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความกว้างอิเล็กโทรด

จากผลการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของอิเล็กโทรดในรูปที่ 5.25 พบว่าความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของอิเล็กโทรดตั้งแต่ 20, 40, 60, 80 และ 100 μm มีความถี่คัทออฟที่ 600, 600, 600, 700 และ 700 kHz ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอยู่ในช่วงแคบมากจนพิจารณาได้ว่า การเปลี่ยนแปลงความกว้างอิเล็กโทรดไม่มีผลทำให้ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดมีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยทั่วไป ซึ่งความถี่คัทออฟจะลดลงเมื่อเพิ่มความกว้างของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออิเล็กโทรดมีความกว้างมากขึ้น จะทำให้ความจุไฟฟ้าที่เกิดบริเวณรอยสัมผัสช็อตกีย์มีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม ส่งผลให้ค่าเวลาคงตัวสูงขึ้น ซึ่งจะทำให้ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดลดลง ส่วนผลการทดลองที่ได้ความถี่คัทออฟใกล้เคียงกัน

อาจเนื่องมาจาก ความจุไฟฟ้าที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อมีค่ามาก จึงทำให้ปัจจัยที่เป็นตัวจำกัดความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอด

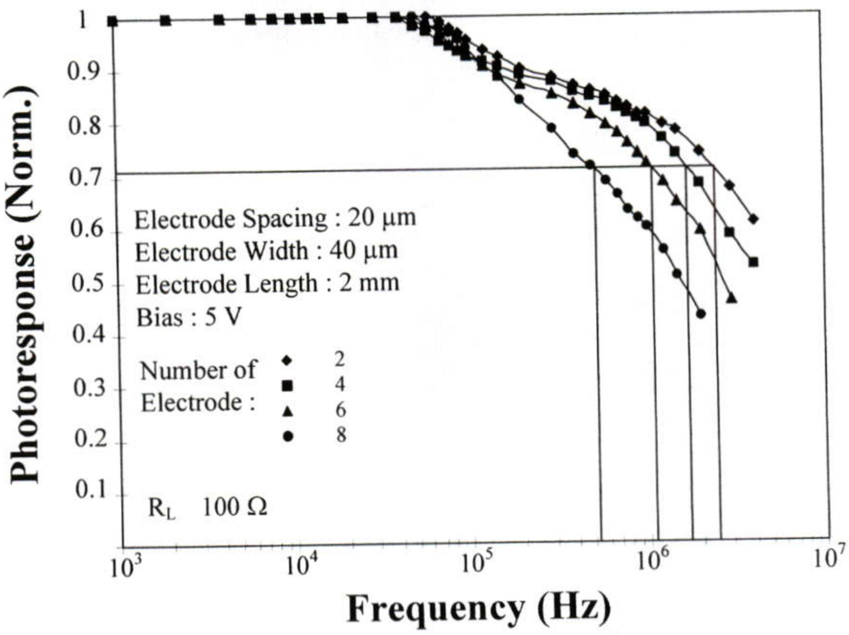
5.1.3.2 ผลของความยาวอิเล็กโทรด



รูปที่ 5.26 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรด

จากผลการตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรดในรูปที่ 5.26 พบว่าความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของอิเล็กโทรดตั้งแต่ 0.5, 1, 1.5 และ 2 mm มีความถี่คัทออฟ 700, 600, 800 และ 800 kHz ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่ามีการเปลี่ยนแปลงไม่มากนักจนสามารถพิจารณาว่าการเปลี่ยนแปลงความยาวอิเล็กโทรดไม่มีผลทำให้ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดมีการเปลี่ยนแปลง ผลการทดลองที่ได้แตกต่างจากโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยทั่วไป ซึ่งความถี่คัทออฟจะลดลงเมื่อเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่ออิเล็กโทรดมีความยาวมากขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดบริเวณรอยสัมผัสช็อตกีย์จะเพิ่มมากขึ้นตาม จึงทำให้ค่าคงตัวเวลาสูงขึ้น ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดจึงลดลง ส่วนผลการทดลองที่ได้ความถี่คัทออฟใกล้เคียงกันอาจเนื่องมาจากค่าความจุไฟฟ้าที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อมีค่ามาก จึงทำให้ค่าเวลาคงตัวเป็นปัจจัยที่เป็นตัวจำกัดความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอด

5.1.3.3 ผลของจำนวนอิเล็กโทรด



รูปที่ 5.27 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดเมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรด

จากผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรดในรูปที่ 5.27 โฟโตไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนอิเล็กโทรดตั้งแต่ 2, 4, 6 และ 8 ขั้ว ทำให้ความถี่คัทออฟเปลี่ยนแปลงจาก 2 MHz, 1.5 MHz, 1 MHz และ 500 kHz ตามลำดับ สังเกตได้ว่าความถี่คัทออฟของโฟโต-ไดโอดลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรด น่าจะมีผลมาจากการออกแบบซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบอิเล็กโทรดเพื่อเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทโดยได้มีการแยกขั้วอิเล็กโทรดเป็นอิสระจากกันโดยแต่ละอิเล็กโทรดจะมีจุดเชื่อมต่อ สำหรับเชื่อมต่อกับเครื่องมือวัดภายนอก ซึ่งจากการคำนวนพบว่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อมต่อมีค่าสูงกว่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสช็อตกีย์มาก เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดจึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้ารวมมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากจากขนาดพื้นที่ของจุดเชื่อมต่อที่เพิ่มขึ้น ซึ่งผลคูณของความต้านทานและค่าความจุไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้น จึงทำให้ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดลดลง ผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มเดียวกับโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM โดยทั่วไป ที่ความถี่คัทออฟจะลดลงเมื่อเพิ่มจำนวนของอิเล็กโทรด แต่การลดลงเนื่องจากความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตกีย์เพิ่มสูงขึ้น

จากผลการทดลองลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันและผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีการเปลี่ยนแปลงระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความกว้างของอิเล็กโทรด ความยาวของอิเล็กโทรด และจำนวนอิเล็กโทรด ทำให้ได้ข้อสรุปดังนี้

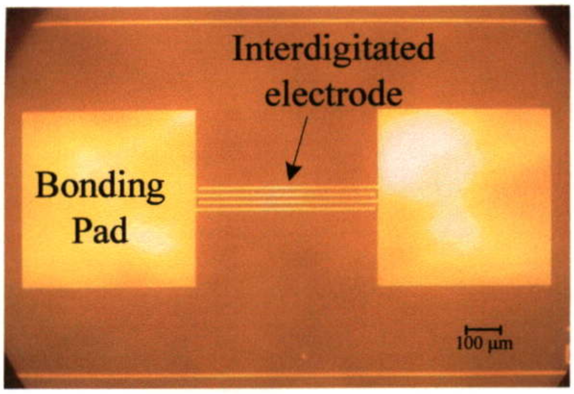
ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดควรมีขนาดแคบที่สุด เพื่อลดส่วนของบริเวณนิวทรัลลง ซึ่งหากสามารถลดระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดลงจนกระทั่งบริเวณปลอดพาหะขยายจากอิเล็กโทรดด้านแคโทดไปถึงอิเล็กโทรดด้านแคโทดจะทำให้คู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นสามารถเคลื่อนที่ไปยังขั้วอิเล็กโทรดได้ด้วยผลของสนามไฟฟ้า และไม่มีบริเวณนิวทรัลซึ่งทำให้เกิดการรวมตัวของพาหะ กระแสแสงที่ได้จะเป็นกระแสแสงที่เกิดจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดจะสูงขึ้นจากความเร็วในการเคลื่อนที่ของประจุพาหะเป็นความเร็วดริฟท์ (drift) ซึ่งมีความเร็วมากกว่าความเร็วในการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) [11] ซึ่งเกิดขึ้นในบริเวณนิวทรัล

ความกว้างของอิเล็กโทรดจะต้องมีขนาดเล็กที่สุด เพื่อลดผลของการสะท้อนแสงและทำให้ประสิทธิภาพภายนอกสูงขึ้น [8] การลดความกว้างของอิเล็กโทรดลงจะทำให้พื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์ลดลง กระแสรั่วไหลที่รอยสัมผัสช็อตกีย์หรือที่เรียกว่ากระแสมืดของโฟโตไดโอดลดลงเช่นกัน ขนาดของพื้นที่รอยสัมผัสช็อตกีย์ยังมีผลต่อความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยสัมผัสช็อตกีย์ พื้นที่มากยิ่งทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าสูง การลดความกว้างของอิเล็กโทรดจะทำให้ความถี่คัทออฟที่ถูกจำกัดด้วยค่าเวลาคงตัวมีค่าเพิ่มสูงขึ้น

การเพิ่มความยาวและจำนวนขั้วอิเล็กโทรดทำให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดสูงขึ้น แต่ต้องเลือกให้เหมาะสมกับขนาดพื้นที่ที่แสงจากแหล่งกำเนิดแสงตกกระทบ การเพิ่มความยาวและจำนวนอิเล็กโทรดให้มีขนาดพื้นที่รับแสงมากเกินความจำเป็น นอกจากจะสิ้นเปลืองพื้นที่บนชิ้นสารกึ่งตัวนำแล้ว ยังจะทำให้กระแสรั่วไหลและค่าความจุไฟฟ้าสูงขึ้น ส่งผลกระทบเช่นเดียวกับการเพิ่มความกว้างของขั้วอิเล็กโทรด

ขนาดจุดเชื่อมต่อจะต้องมีขนาดเล็กที่สุดเพื่อให้ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้นฉนวนในลักษณะโครงสร้าง MOS (MOS capacitance) มีค่าน้อยที่สุด ซึ่งพบว่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบริเวณจุดเชื่อมต่อนี้ส่งผลอย่างมากต่อความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอด

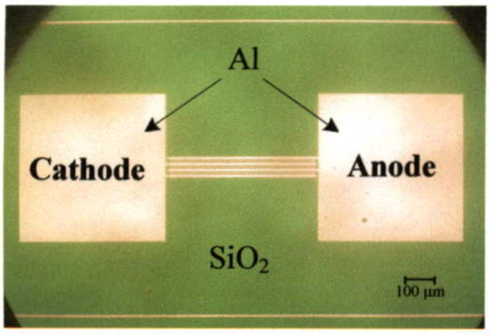
ทั้งหมดที่กล่าวมาเป็นแนวทางในการออกแบบ ซึ่งขีดจำกัดของการออกแบบจะอยู่ที่เทคโนโลยีในการสร้างต้นแบบและเทคโนโลยีในการสร้างอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ สำหรับศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์มีขีดจำกัดอยู่ที่การสร้างลวดลายต้นแบบ โดยขนาดของลวดลายที่เล็กที่สุดที่สามารถสร้างได้คือ 20 μm ดังนั้นจึงออกแบบให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดและความกว้างของอิเล็กโทรดมีขนาด 20 μm โดยมีความยาวของอิเล็กโทรด 1 mm จำนวนอิเล็กโทรด 4 ขั้ว และขนาดจุดเชื่อมต่อ 1x1 mm ซึ่งเป็นขนาดที่สามารถเชื่อมต่ออุปกรณ์ออกสู่วงจรภายนอกโดยใช้กาวเงินได้ ซึ่งรูปที่ 5.28 แสดงถึงลวดลายต้นแบบที่ได้ออกแบบจากขนาดที่กล่าวมาข้างต้น



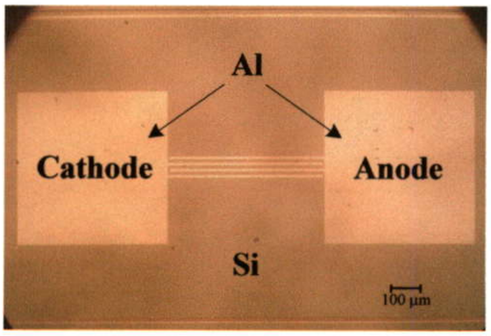
รูปที่ 5.28 ภาพจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50 เท่า ของลวดลายต้นแบบ

5.2 การทดลองตอนที่ 2

เมื่อทำการออกแบบอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทและสร้างต้นแบบตามขนาดที่สรุปได้จากการทดลองตอนที่ 1 แล้ว ในการทดลองตอนที่ 2 จึงทำการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทขึ้น และจากการทดลองที่ผ่านมาในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al จะมีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่างซิลิคอนและอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการให้เกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์ เพื่อกำหนดพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด และลดกระแสรั่วไหลที่จะเกิดจากรอยสัมผัสช็อตกีย์บริเวณจุดเชื่อมต่อ เพื่อศึกษาผลของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่สร้างขึ้น จึงได้ทำการทดลองโดยสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ระหว่างซิลิคอนและอลูมิเนียมใต้บริเวณจุดเชื่อมต่อซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ใช้ในการทดลองตอนที่ 1 และโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ซึ่งได้ปรับกระบวนการสร้างโดยลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกไป ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 50 เท่า ของโฟโตไดโอดทั้ง 2 แบบที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 5.29



(ก)



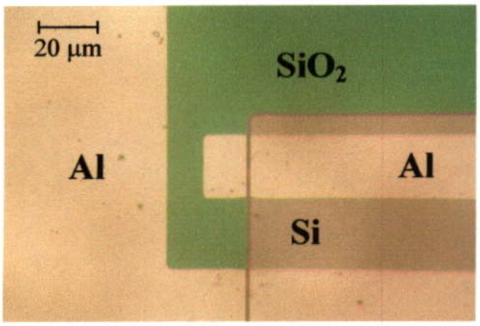
(ข)

รูปที่ 5.29 ภาพโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท

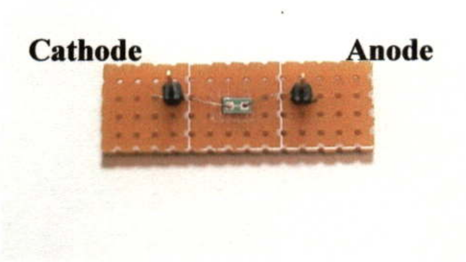
(ก) โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

(ข)โฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงในรูปที่ 5.30 (ก) รอยสัมผัสช็อตกีย์จะเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทเท่านั้น ส่วนบริเวณจุดเชื่อมต่อจะมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์รองรับชั้นอลูมิเนียมไว้จึงไม่ทำให้เกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์ขึ้น ภายหลังตัดแยกชิ้นงานและทำการเชื่อมต่อกาวเงินจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.30 (ข)



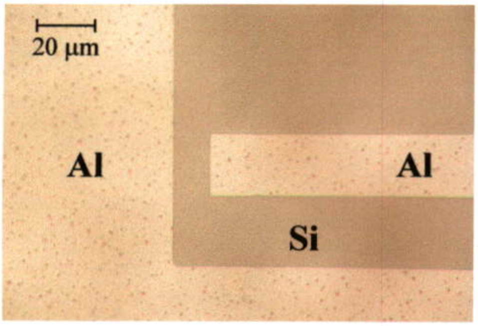
(ก)



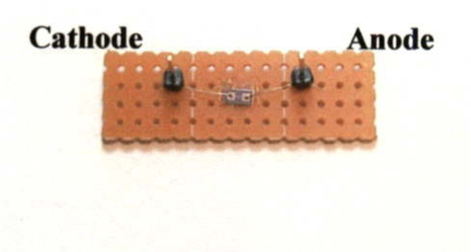
(ข)

รูปที่ 5.30 ภาพถ่ายของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
(ก) จากกล้องจุลทรรศน์
(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน

ภาพถ่ายผ่านกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 400 เท่า ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงในรูปที่ 5.31 (ก) เมื่อไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสช็อตกีย์ครอบคลุมทั้งบริเวณอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทและบริเวณจุดเชื่อมต่อ ภายหลังตัดแยกชิ้นงานและทำการเชื่อมต่อกาวเงินจะมีลักษณะดังรูปที่ 5.31 (ข)



(ก)



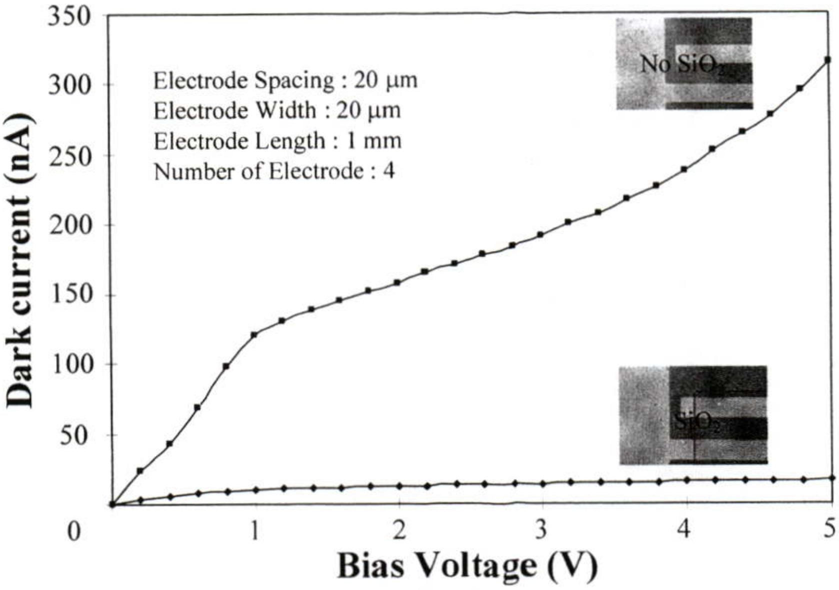
(ข)

รูปที่ 5.31 ภาพถ่ายของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
(ก) จากกล้องจุลทรรศน์
(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมต่อด้วยกาวเงิน

5.2.1 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ในสัญญาณแสงกระแสตรง

การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ ใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A ดังแผนภาพในรูปที่ 5.6 ซึ่งได้กล่าวไว้ในการทดลองที่ 5.1.2.1

5.2.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 5.32 ลักษณะกระแส-แรงดัน เปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

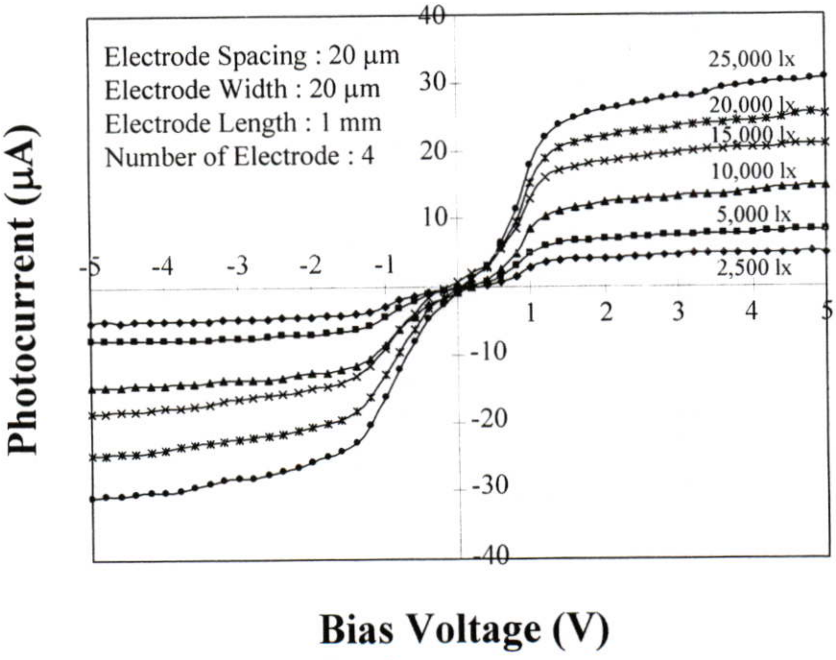
จากการเปรียบเทียบกระแสมืดของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในรูปที่ 5.32 พบว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะมีกระแสมืดต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด ที่แรงดันไบอัส 5 โวลต์ โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่ากระแสมืด 16 nA ส่วนโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่ากระแสมืด 315 nA สาเหตุเพราะพื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์เกิดขึ้นในโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เกิดเฉพาะส่วนที่อิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทเท่านั้น แต่โฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์ทั้งในส่วนอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทและส่วนจุดเชื่อมต่อ โฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงมีพื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์มากกว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์กั้นบริเวณจุดเชื่อมต่อ เป็นผลทำให้กระแสมืดมีค่าสูงกว่า ซึ่งในทางปฏิบัติจะพบผลของ

การรวมตัวของประจุพาหะที่ผิว (surface recombination) รวมอยู่ด้วย จากการคำนวนพบว่าโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีพื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์ใต้ชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมมากกว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 26 เท่า ทำให้ได้กระแสมืดที่มีค่าสูงกว่าประมาณ 20 เท่า

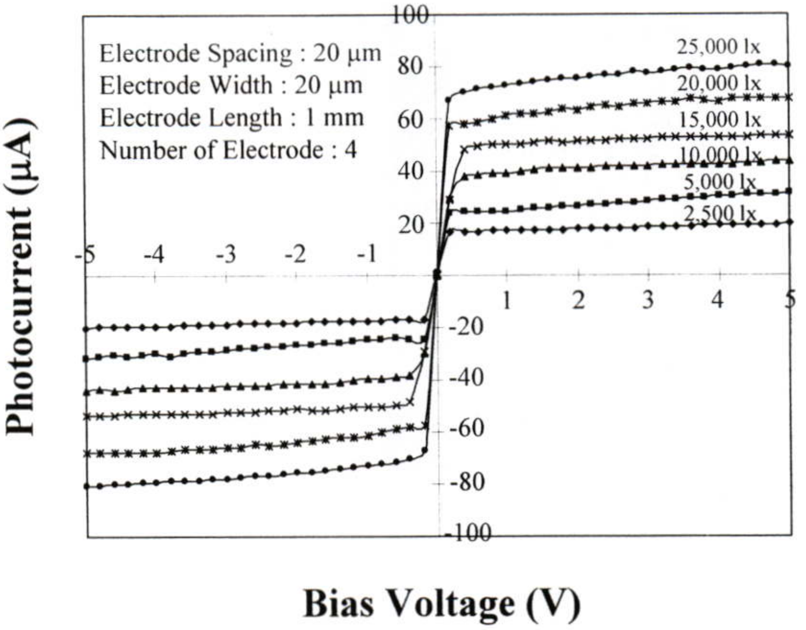
ซึ่งข้อดีของการมีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นอกจากจะทำให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดลดลงได้แล้ว การสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ยัง ช่วยให้การเชื่อมต่อด้วยกาวเงินทำได้ง่ายขึ้น

5.2.1.2 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท

เมื่อนำโฟโตไดโอดมาทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ภายใต้การให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนความเข้มแสงค่าต่างๆ ดังที่ได้อธิบายในการทดลองที่ 5.1.2.2 จะได้ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ภายใต้การให้แสงตกกระทบค่าต่างๆ ดังรูปที่ 5.33 และ 5.34 โดยรูปที่ 5.33 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ส่วนรูปที่ 5.34 เป็นลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

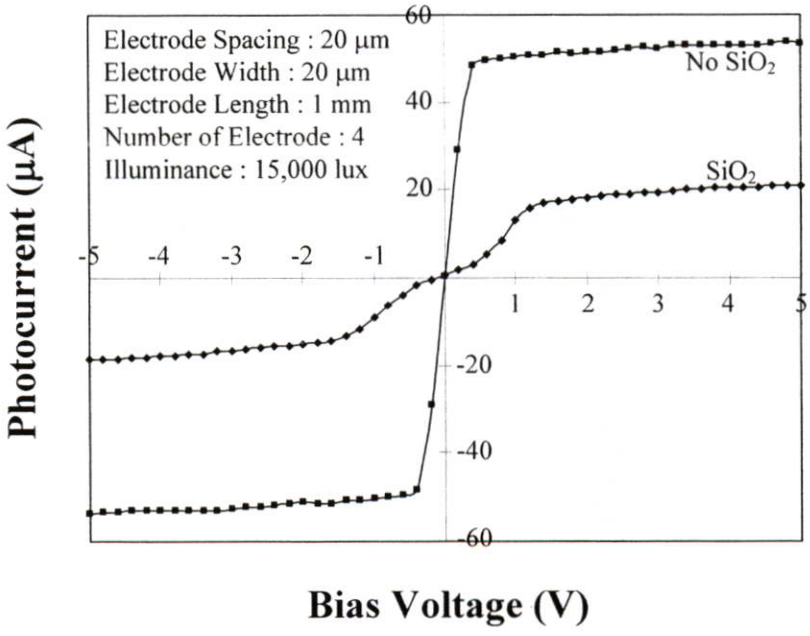


รูปที่ 5.33 ลักษณะกระแสแสง-แรงดัน เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



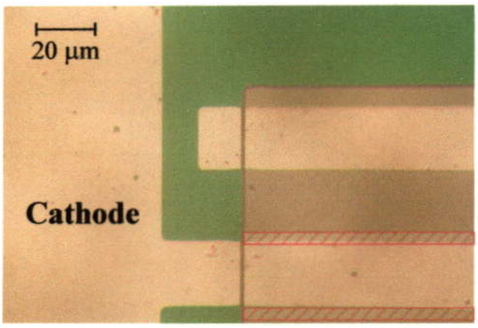
รูปที่ 5.34 ลักษณะกระแสแสง-แรงดัน เมื่อเปลี่ยนความเข้มแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เมื่อนำลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงในกราฟเดียวกันเพื่อเปรียบเทียบกระแสแสงที่ความเข้มแสง 15,000 ลักซ์ ดังรูปที่ 5.35

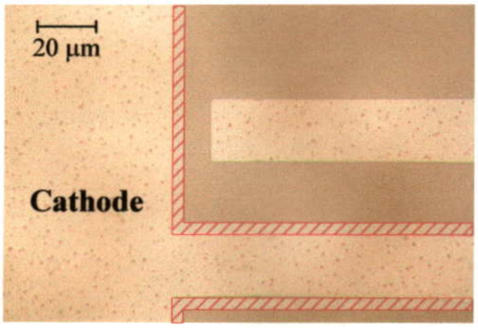


รูปที่ 5.35 ลักษณะกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทเปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

พบว่ากระแสแสงที่ได้จากโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่า เนื่องจากในการให้แรงดันไบอัสกับโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นเฉพาะส่วนที่เป็นอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทเท่านั้น พื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะรวมของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จึงมีน้อยกว่าโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เพราะโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นโดยรอบรอยสัมผัสช็อตกีย์ซึ่งจะเกิดขึ้นทั้งในส่วนอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทและจุดเชื่อมต่อจะเกิดเป็นเหตุให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าสูงกว่า ดังแสดงในรูปที่ 5.36



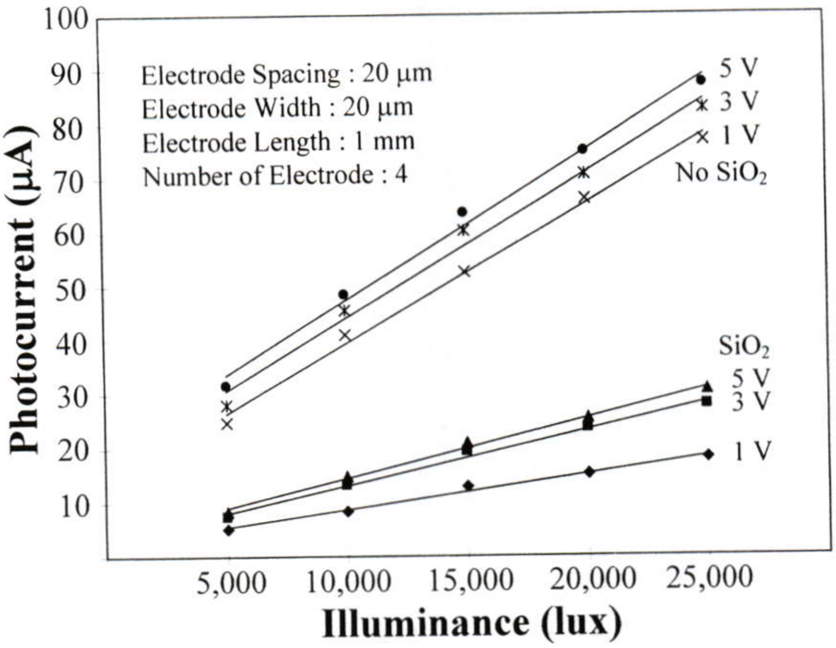
(ก)



(ข)

รูปที่ 5.36 การเกิดบริเวณปลอดพาหะรอบขั้วอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al
(ก) โฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
(ข) โฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

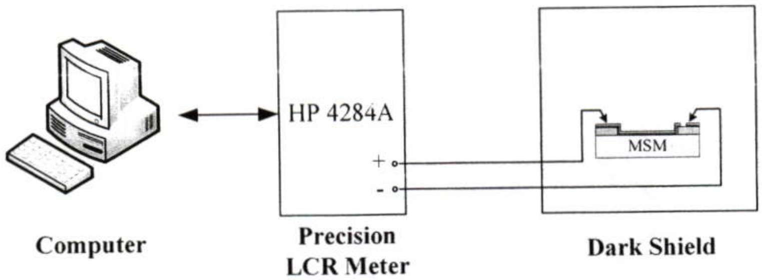
จากการนำข้อมูลผลการทดลองในรูปที่ 5.33 และ 5.34 ของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ มาแสดงในรูปความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงที่แรงดันไบอัส 1, 3 และ 5 โวลต์ ดังรูปที่ 5.37 จะเห็นได้ว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะมีระดับกระแสแสงที่ต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากพื้นที่รวมของบริเวณปลอดพาหะมีน้อยกว่าโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 5.37 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตทเปรียบเทียบระหว่างโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

5.2.2 ผลการทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท

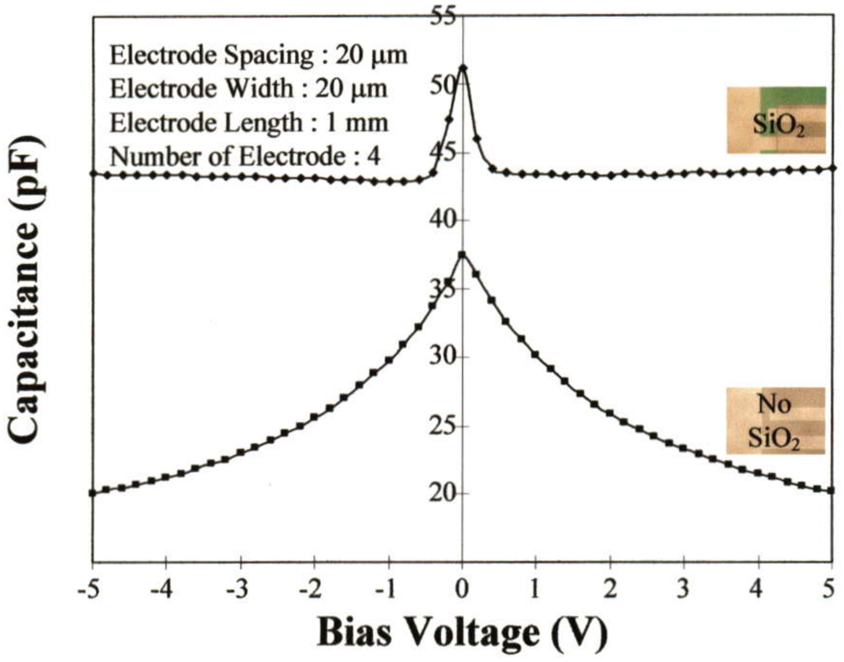
การทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน จะใช้เครื่อง HP 4284 A ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 5.38



รูปที่ 5.38 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

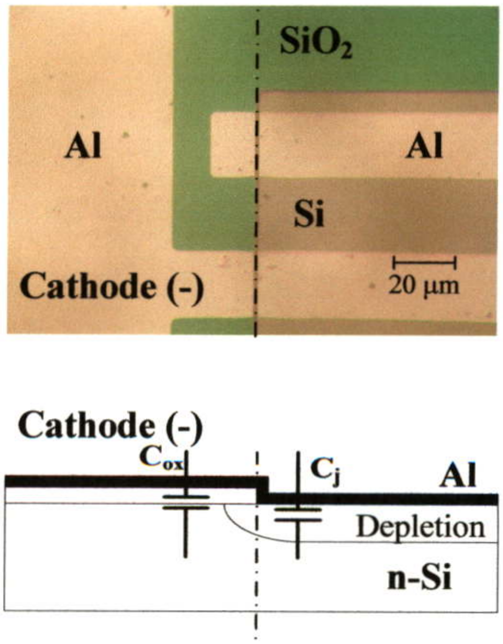
เมื่อทำการวัดผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ทั้งที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้ผลดังรูปที่ 5.39

ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์พบว่ามีลักษณะคงที่ ไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัส แต่ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์พบว่ามีลักษณะคงที่แปรผันตามแรงดันไบอัส



รูปที่ 5.39 ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท เปรียบเทียบระหว่างมีชั้นออกไซด์และไม่มีชั้นออกไซด์

โฟโตไดโอดที่มีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ จะมีความจุไฟฟ้าเกิดขึ้น 2 ส่วน คือ ความจุไฟฟ้าที่เกิดจากรอยสัมผัสช็อตกีย์ (C_j) และความจุไฟฟ้าที่เกิดจากชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (C_{ox}) ต่อกันแบบขนาน ดังแสดงในรูปที่ 5.40



รูปที่ 5.40 ความจุไฟฟ้าที่เกิดในโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

ความจุไฟฟ้าที่เกิดจากรอยสัมผัสช็อตกีย์จะแปรผกผันกับแรงดันไบอัสดังสมการที่ 5.7

$$C_{\mathrm{j}} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_{\mathrm{S}}N_{\mathrm{D}}}{2(V_{\mathrm{bi}} - V_{\mathrm{R}})}} \quad ...(5.7)$$

ส่วนความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5.8

$$C_{ox} = \frac{\varepsilon A}{t_{ox}} \quad ...(5.8)$$

โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ

q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

V_R คือ แรงดันไบอัสย้อนกลับ

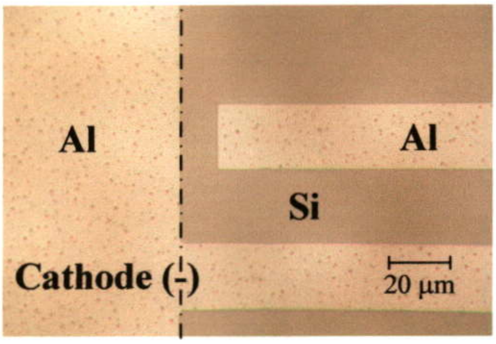
t_{ox} คือ ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

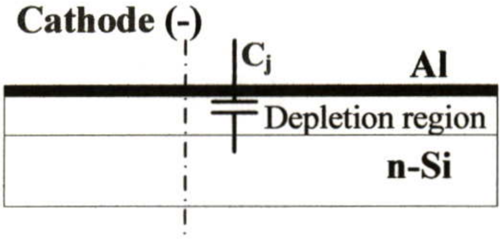
ความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าคงที่ ขึ้นกับความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และขนาดจุดเชื่อมต่อ จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีลักษณะคงที่ไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัส ความจุไฟฟ้ารวม (C_T) ของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าในชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตกีย์ ดังสมการที่ 5.9

$$C_T = C_j + C_{ox} \quad ...(5.9)$$

เนื่องจากจุดเชื่อมต่อของโฟโตไดโอดมีขนาดใหญ่จึงทำให้ผลของความจุไฟฟ้าที่บริเวณจุดเชื่อมต่อมีค่ามากกว่าความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสช็อตกีย์ จึงทำให้ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน มีลักษณะเป็นค่าคงที่ไม่ขึ้นกับแรงดันไบอัส เป็นดังรูปที่ 5.39

ส่วนความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เป็นความจุไฟฟ้าที่เกิดจากรอยสัมผัสช็อตกีย์ (C_j) ซึ่งเกิดทั้งบริเวณอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทและบริเวณจุดเชื่อมต่อ ดังแสดงในรูปที่ 5.41 ความจุไฟฟ้ารวม (C_T) ของโฟโตไดโอดจึงมีค่าเท่ากับ C_j ซึ่งแปรผันกับแรงดันไบอัส ดังลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ในรูปที่ 5.39



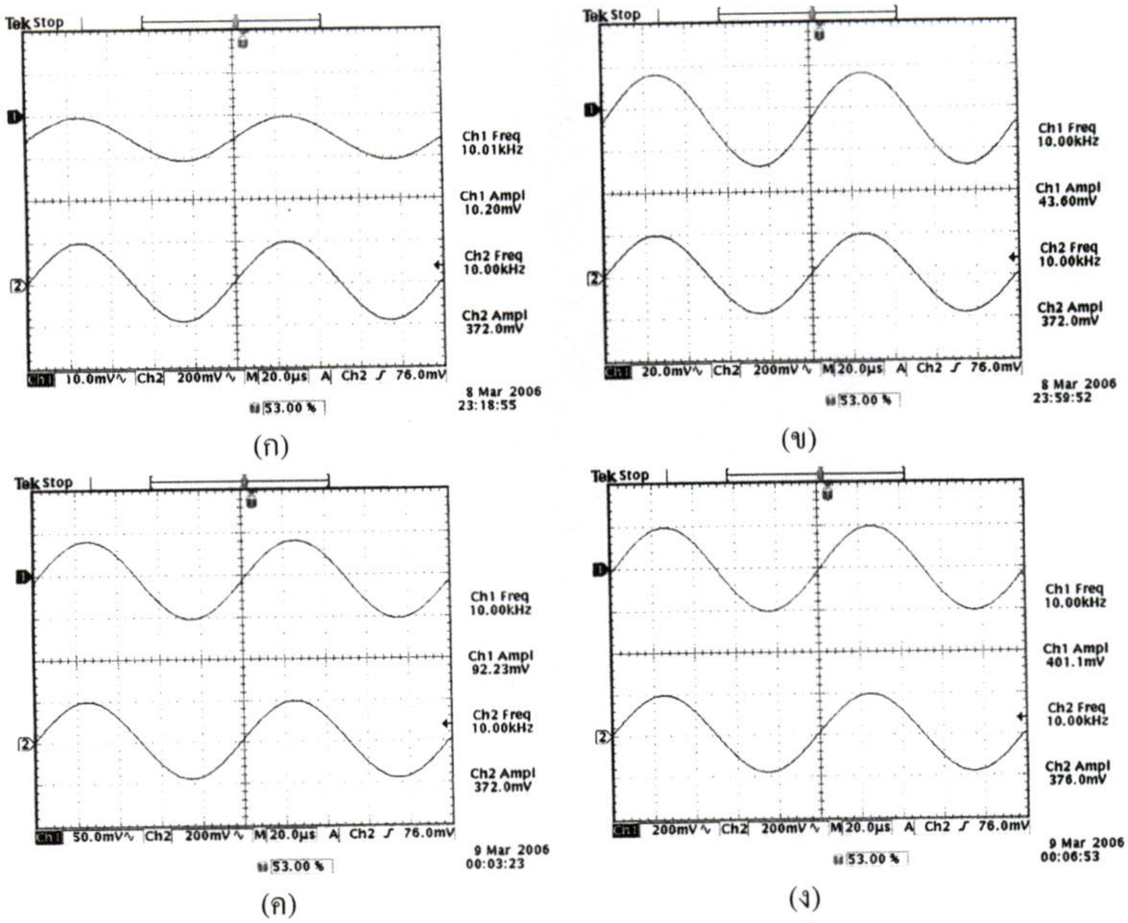


รูปที่ 5.41 ความจุไฟฟ้าที่เกิดในโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

5.2.3 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ในสัญญาณแสงกระแสสลับ

วิธีการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ในสัญญาณแสงกระแสสลับ รวมทั้งแผนภาพและวงจรที่ใช้ทดลอง ได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 5.1.3

จากรูปที่ 5.42 เป็นสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ Ch1 คือ แอมปริจูด (amplitude) ของสัญญาณที่วัดด้วยออสซิลโลสโคปคร่อมความต้านทานโหลด 100 Ω, 500 Ω, 1 kΩ และ 5 kΩ ตามลำดับ Ch2 คือสัญญาณรูปซายน์จากเครื่องกำเนิดความถี่ มีค่าแรงดันประมาณ 400 mV_{pp} ซึ่งสัญญาณเอาท์พุท ที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณรูปซายน์เช่นเดียวกับสัญญาณอินพุท และมีเฟส (phase) เดียวกัน เมื่อเปลี่ยนความต้านทานโหลดให้มีค่าสูงขึ้น พบว่าสัญญาณเอาท์พุทที่วัดได้มีแอมปริจูดเพิ่มขึ้น

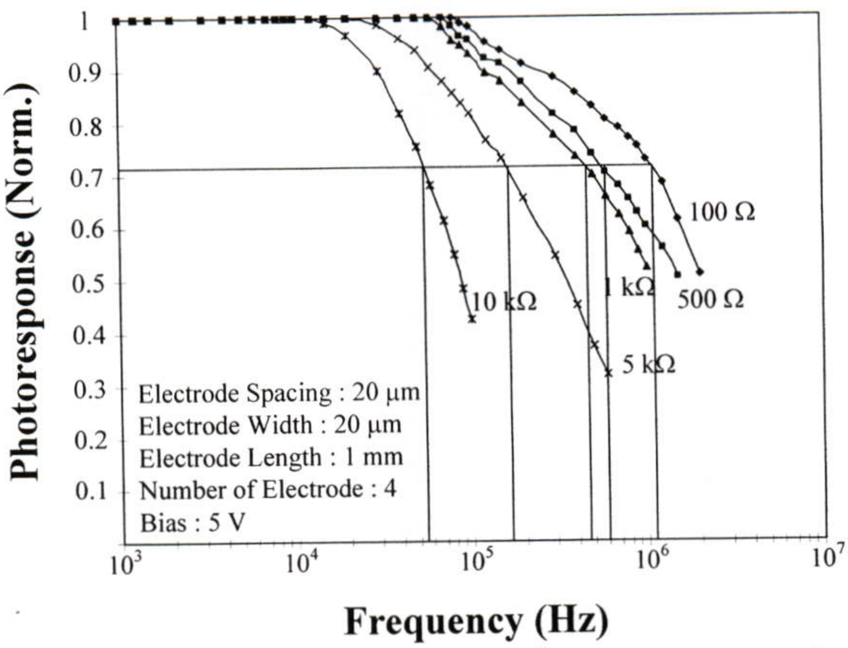


รูปที่ 5.42 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

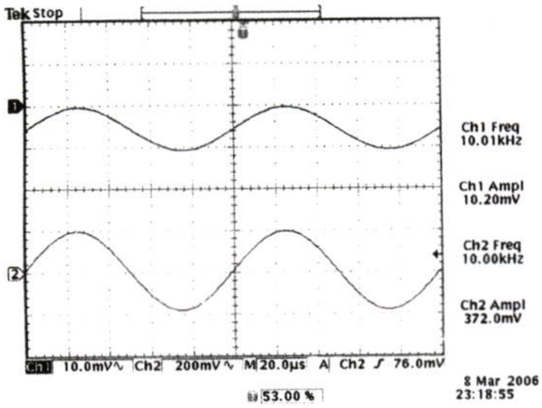
(ก) 100 Ω (ข) 500 Ω (ค) 1 kΩ (ง) 5 kΩ

เมื่อทำการวัดแอมปริจูดของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆแล้วทำการนอร์มอลไรซ์ มีแกนตั้งเป็นสัญญาณการตอบสนองของความต้านทานโหลดเนื่องจากสัญญาณแสงที่ถูกนอร์มอลไรซ์ ส่วนแกนนอนเป็นแกนของความถี่ตั้งแต่ 1 kHz – 10 MHz จากนั้นเปลี่ยนความต้านทานโหลดค่าต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเปลี่ยนความต้านทานโหลด

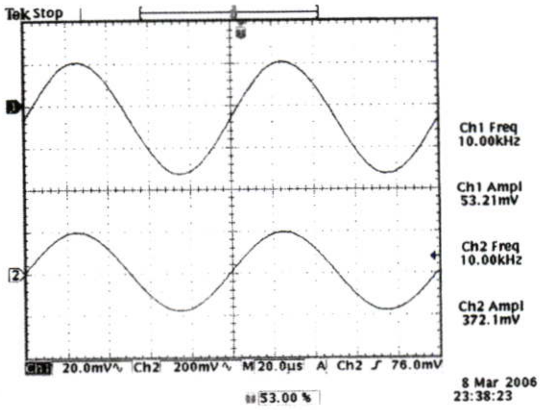
จากรูปที่ 5.43 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของความต้านทานโหลด จากผลการทดลองพบว่าที่ความต้านทานโหลด 100 Ω และ 500 Ω จะพบการตอบสนองเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกจะเป็นลักษณะของกระแสที่เกิดบริเวณปลอดพาหะหรือเรียกว่ากระแสไดโอด (I_d) ส่วนช่วงที่สองเป็นผลของกระแสที่เกิดบริเวณนิวทรัลหรือเรียกว่ากระแสคอนดักเตอร์ (I_c) [13] ที่ความต้านทานโหลด 100 Ω ความถี่คัทออฟของโฟโต-ไดโอดสูงสุดที่ 1 MHz ในกรณีของความต้านทานโหลด 1 kΩ - 10 kΩ พบว่าการตอบสนองทางความถี่ลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลมาจากค่าเวลาคงตัว ซึ่งเกิดจากผลคูณของความจุไฟฟ้าและความต้านทานมีค่ามากขึ้น ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดจึงลดลงเมื่อความต้านทานโหลดเพิ่มขึ้น ซึ่งผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นไปในแนวทางเดียวกัน



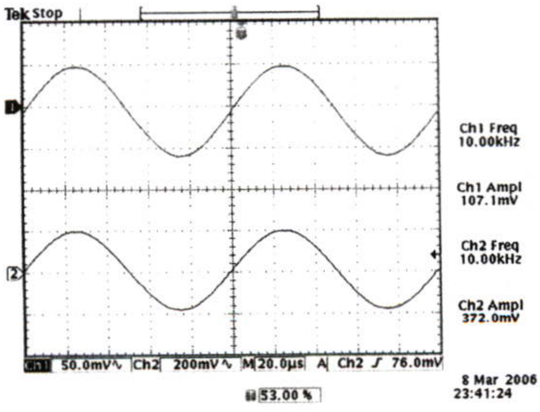
รูปที่ 5.43 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด



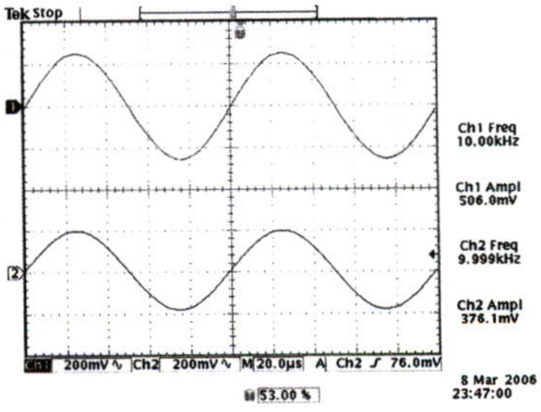
(ก)



(ข)



(ค)

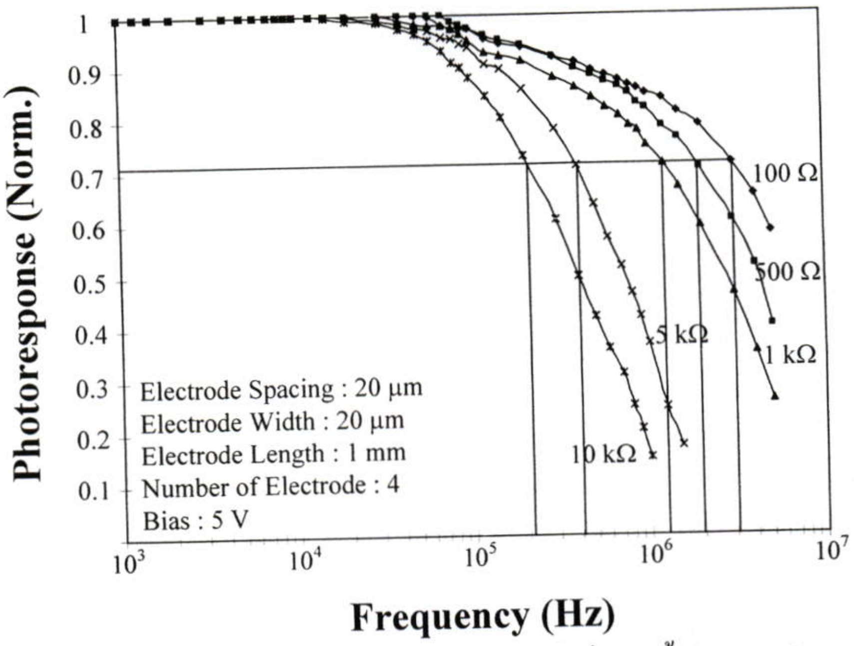


(ง)

รูปที่ 5.44 สัญญาณจากออสซิลโลสโคปของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

(ก) 100 Ω (ข) 500 Ω (ค) 1 kΩ (ง) 5 kΩ

รูปที่ 5.44 เป็นสัญญาณที่ได้จากโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ Ch1 คือ แอมปริจูดของสัญญาณที่วัดด้วยออสซิลโลสโคปคร่อมความต้านทานโหลด 100 Ω, 500 Ω, 1 kΩ และ 5 kΩ ตามลำดับ Ch2 คือสัญญาณรูปซายน์จากเครื่องกำเนิดความถี่ มีค่าแรงดันประมาณ 400 mV_{pp} ซึ่งสัญญาณเอาท์พุทที่ได้มีลักษณะเป็นสัญญาณรูปซายน์เช่นเดียวกับสัญญาณอินพุทและมีเฟสเดียวกัน เมื่อเปลี่ยนความต้านทานโหลดให้มีค่าสูงขึ้น พบว่าสัญญาณเอาท์พุทที่วัดได้มีแอมปริจูดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 5.45 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อเปลี่ยนแปลงความต้านทานโหลด

เมื่อทำการวัดแอมปริจูดของสัญญาณที่ความถี่ต่างๆแล้วทำการนอร์มอลไรซ์มีแกนตั้งเป็นสัญญาณการตอบสนองของความต้านทานโหลดเนื่องจากสัญญาณแสงที่ถูกนอร์มอลไรซ์ ส่วนแกนนอนเป็นแกนของความถี่ตั้งแต่ 1 kHz – 10 MHz จากนั้นเปลี่ยนความต้านทานโหลดค่าต่างๆ เพื่อดูผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเปลี่ยนความต้านทานโหลด รูปที่ 5.45 ผลตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีการเปลี่ยนแปลงตามค่าของความต้านทานโหลด จากผลการทดลองพบว่าที่ความต้านทานโหลด 100 Ω - 1 kΩ จะพบการตอบสนองเป็น 2 ช่วง โดยช่วงแรกจะเป็นลักษณะของกระแสที่เกิดบริเวณปลอดพาหะหรือเรียกว่ากระแสไดโอด (I_d) ส่วนช่วงที่สองเป็นผลของกระแสที่เกิดบริเวณนิวทรัลหรือเรียกว่ากระแสคอนดักเตอร์ (I_c) [13] เช่นเดียวกับที่พบในโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ความต้านทานโหลด 100 Ω ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดสูงสุดที่ 3 MHz ในกรณีของความต้านทานโหลด 5 kΩ และ 10 kΩ พบว่าการตอบสนองทางความถี่ลดลงอย่างลวดเร็ว เป็นผลมาจากค่าเวลาคงตัวซึ่งเกิดจากผลคูณของความจุไฟฟ้าและความต้านทานมีค่ามากขึ้น

จากผลการทดลองตอนที่ 2 พบว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ทำการเชื่อมต่อด้วยกาวเงินทำได้ง่าย และให้กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดที่ต่ำกว่าโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากรอยสัมผัสช็อตกีย์เกิดขึ้นเฉพาะบริเวณอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทเท่านั้น ซึ่งมีขนาดพื้นที่น้อยกว่าจุดเชื่อมต่อมาก เมื่อให้แสงตกกระทบแก่โฟโตไดโอด พบว่าโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ให้กระแสแสงสูงกว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ เนื่องจากรอยสัมผัสช็อตกีย์ที่จุดเชื่อมต่อทำให้เกิดบริเวณปลอดพาหะรอบๆ ซึ่งบริเวณปลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบจุดเชื่อมต่อนี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอด เมื่อรวมบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากจุดเชื่อมต่อและบริเวณปลอดพาหะที่เกิดจากอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท ทำให้พื้นที่ของบริเวณปลอดพาหะรวมมีมากกว่าของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ จึงทำให้กระแสแสงที่ได้มีค่ามากกว่า จากการวิเคราะห์ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ พบว่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเกิดจาก 2 ส่วน คือ บริเวณจุดเชื่อมต่อและรอยสัมผัสช็อตกีย์ ซึ่งจะทำให้ความจุไฟฟ้ารวมของโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลอคอนไดออกไซด์สูงกว่าโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดอกไซด์ซึ่งมีความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อตกีย์เพียงอย่างเดียว ด้วยเหตุนี้จึงทำให้การตอบสนองทางความถี่ของโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ดีกว่าโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยโฟโตไดโอดที่ไม่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ มีความถี่คัทออฟสูงสุด 3 MHz ที่ความต้านทานโหลด 100 Ω ส่วนโฟโตไดโอดที่มีชั้นซิลิคอนไดออกไซด์มีความถี่คัทออฟสูงสุด 1 MHz ที่ความต้านทานโหลดค่าเดียวกัน

บทที่ 6

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยที่ได้เสนอในวิทยานิพนธ์นี้ เป็นการศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิเตท ซึ่งโลหะอลูมิเนียมและสารกึ่ง-ตัวนำซิลิคอนที่เลือกใช้ในงานวิจัยนี้เป็นวัสดุที่หาง่าย ราคาถูก กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อน และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมด้วยเทคโนโลยีซิลิคอนที่มีความแพร่หลายอย่างมากได้ ซึ่งในการสร้างเป็นวงจรรวม พบว่าการออกแบบขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทได้รับความนิยมมากกว่าอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว เพราะนอกจากกระแสแสงที่ได้จะสูงกว่าแล้ว ยังช่วยลดพื้นที่บนชิ้นสารกึ่งตัวนำลง ทำให้ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดลดลง ส่งผลให้โฟโตไดโอดสามารถทำงานที่ความถี่สูงได้

ในงานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาการเปลี่ยนแปลงพารามิเตอร์ภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตท โดยศึกษาผลกระทบต่อการตอบสนองต่อสัญญาณแสงทั้งในแบบกระแสตรงและกระแสสลับ โดยพารามิเตอร์ที่ศึกษาคือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (S), ความกว้างของอิเล็กโทรด (W), ความยาวของอิเล็กโทรด (L) และจำนวนอิเล็กโทรด (N) โดยในการศึกษาได้ออกแบบและสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะอิเล็กโทรดเลียนแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทขึ้น โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดออกแบบให้เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 20-100 μm ความกว้างของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 20-100 μm ความยาวของอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.5-2 mm จำนวนอิเล็กโทรดเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 2-8 ขั้ว

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ พบว่าการเพิ่มความกว้างของอิเล็กโทรด, ความยาวของอิเล็กโทรด และจำนวนของอิเล็กโทรด ทำให้กระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้น เนื่องจากพื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์เพิ่มขึ้น ทำให้กระแสรั่วไหลที่รอยสัมผัสช็อตกีย์ หรือกระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้น

จากผลการทดลองการเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al พบว่ากระแสมืดและกระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง แตกต่างจากโฟโต-ไดโอดโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบ ซึ่งกระแสแสงของโฟโต-ไดโอดจะเพิ่มขึ้นตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดกว้าง คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีความกว้างมากกว่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะทำให้บริเวณปลอดพาหะไม่ครอบคลุมขั้วแคโทดและแอโนด กระแสแสงซึ่งเกิดขึ้นเฉพาะ

บริเวณปลอดพาหะและไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแต่จะเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัสเท่านั้น จึงเป็นเหตุให้กระแสแสงมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ส่วนผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด พบว่าความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากถูกจำกัดด้วยค่าเวลาคงตัวซึ่งเป็นผลคูณของความต้านทานและความจุไฟฟ้า

จากการทดลองเพิ่มความกว้างของอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al พบว่ากระแสมืดของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้น แต่กระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากขั้วอิเล็กโทรดเป็นโลหะอลูมิเนียมซึ่งเป็นโลหะทึบแสง ทำให้แสงไม่สามารถผ่านลงและทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลได้ ส่วนผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเพิ่มความกว้างของอิเล็กโทรดพบว่าความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดไม่เปลี่ยนแปลง เนื่องจากถูกจำกัดความจุไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อ

จากการทดลองเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al พบว่ากระแสมืดและกระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้น โดยเมื่อความยาวอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ทำให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.96 เท่า ซึ่งใกล้เคียงกับในอุดมคติ ส่วนผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรด พบว่าความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดไม่เปลี่ยนแปลงเนื่องจากถูกจำกัดด้วยความจุไฟฟ้าที่จุดเชื่อมต่อกับวงจรภายนอก

จากการทดลองเพิ่มจำนวนของอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al พบว่ากระแสมืดและกระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าสูงขึ้น โดยเมื่อจำนวนอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่า ทำให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 1.82 เท่า ส่วนผลตอบสนองทางความถี่เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดพบว่าความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดมีการเปลี่ยนแปลง เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดมากขึ้นทำให้ความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอดลดลง เนื่องจากการออกแบบอิเล็กโทรดเลียบแบบโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทมีการแยกจุดเชื่อมต่อของอิเล็กโทรดแต่ละขั้วออกจากกัน เมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดทำให้ความจุไฟฟ้าที่เกิดบริเวณจุดเชื่อมต่อมีค่าสูงขึ้น ค่าเวลาคงตัวซึ่งเป็นผลคูณของความต้านทานและความจุไฟฟ้าจึงเป็นปัจจัยหลักที่จำกัดความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอด

ดังนั้นในการออกแบบโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ให้มีประสิทธิภาพการทำงานสูง ควรออกแบบให้ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดแคบมากๆ เพื่อให้บริเวณปลอดพาหะที่ขยายตัวจากด้านแคโทดไปถึงด้านแอโนดประจุพาหะที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วดริฟท์ กระแสแสงที่ได้จะเป็นผลรวมของกระแสที่เกิดจากทั้งอิเล็กตรอนและโฮล ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดที่แคบมากๆ จะทำให้เวลาส่งผ่านของประจุพาหะลดลง ความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอดจะสูงขึ้น การออกแบบความกว้างของอิเล็กโทรดควรออกแบบให้มีขนาดแคบมากๆ เช่นดียวกัน เพื่อลดพื้นที่ของโฟโตไดโอด ลดกระแสมืดที่เกิดจากการไบอัสย้อนกลับของรอยสัมผัสช็อตกีย์ และลดค่าความจุไฟฟ้าบริเวณรอยสัมผัสช็อตกีย์ลง ค่าเวลาคงตัวที่เป็นปัจจัยจำกัดความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอดมีค่าลดลง การออกแบบความยาวของอิเล็กโทรดและ

จำนวนอิเล็กโทรดจะต้องทำควบคู่กันไปเพื่อให้โฟโตไดโอดมีพื้นที่ครอบคลุมบริเวณที่แสงตกกระทบให้มากที่สุดเพื่อให้กระแสแสงมีค่าสูง สามารถรับสัญญาณแสงที่มีความเข้มต่ำๆ ได้ และทำให้สัญญาณรบกวนอยู่ในระดับต่ำ แต่จะต้องคำนึงถึงกระแสมืดของโฟโตไดโอดที่เพิ่มขึ้นตามขนาดพื้นที่ของรอยสัมผัสช็อตกีย์ อีกทั้งความจุไฟฟ้าที่เกิดบริเวณรอยสัมผัสช็อตกีย์ที่สูงขึ้นทำให้ค่าเวลาคงตัวที่เป็นปัจจัยจำกัดความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอดมีค่าเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน ขนาดของจุดเชื่อมต่อต้องมีขนาดพื้นที่เล็กที่สุดเท่าที่สามารถทำได้ เพื่อลดความจุไฟฟ้าที่เกิดในชั้นฉนวน ซึ่งหากเป็นการออกแบบในวงจรรวมจะสามารถลดผลจากจุดนี้ไปได้

ในการเพิ่มประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM นอกจากจะใช้วิธีการออกแบบแล้ว ยังมีเทคนิคอื่นที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตไดโอด เช่น การเปลี่ยนสภาพต้านทานของแผ่นผลึกฐานรองให้มีสภาพต้านทานสูงขึ้น เพื่อให้บริเวณปลอดพาหะขยายได้มากขึ้น การเติมอะตอมของสารเจือบางชนิดลงในแผ่นผลึกฐานรองเพื่อให้เกิดระดับแทรบขึ้น ทำให้เพิ่มความเร็วในการทำงานของโฟโตไดโอด หรือการเปลี่ยนชนิดสารกึ่งตัวนำของแผ่นผลึกฐานรองเพื่อใช้งานที่ความเร็วสูง การใช้ขั้วอิเล็กโทรดที่เป็นตัวนำโปร่งแสงจะช่วยให้กระแสแสงและประสิทธิภาพควอนตัมของโฟโตไดโอดสูงขึ้น เป็นต้น

เอกสารอ้างอิง

[1] Paul R. Berger. "MSM Photodiodes" **IEEE Potentials**, Vol. 15, no. 2, April/May 1996. pp. 25-29.

[2] Sze S.M., Coleman D. J., Jr. and Loya A. "Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structures" **Solid-State Electronics**, Vol. 14, 1971. pp. 1209-1218.

[3] Phillip B. Espinasse. and Steven L. Kosier. "What's in Store for Silicon Photoreceiver?" **IEEE Circuit & Device Magazine**, March/April 2004, pp. 23-31.

[4] สรายุทธ วิศวแสวงสุข., สมชาติ พนาเกษม., สุรศักดิ์ เนียมเจริญ., โยอิจิ ยาซูมุระ. และ วิสุทธิ์ ฐิติรุ่งเรือง. "การศึกษาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบชอตต์กีที่ผ่านการซินเตอร์ริ่ง" **การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า**, ครั้งที่ 23, พฤศจิกายน 2543. หน้า 721-724.

[5] ธเนศ โชะเหม., สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. และ สรายุทธ วิศวแสวงสุข. "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์" **วิศวสารลาดกระบัง**, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน 2547. หน้า 14-19.

[6] ธเนศ โชะเหม., มานิตา ด้วงแสง. และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง" **วิศวสารลาดกระบัง**, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2548. หน้า 13-18.

[7] C. J. WEI., D. KUHI., E. H. BÖTTCHER., D. BIMBERG. and E. KUPHAL. "Lateral High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes on High-Resistivity InGaAs" **IEEE Electron Device Letters**, Vol. 11, no. 8, August 1990. pp. 334-335.

[8] S. V. Averine., Y. C. Chan. and Y. L. Lam. "Geometry Optimization of Interdigitated Schottky-Barrier Metal-Semiconductor-Metal Photodiode Structures" **Solid-State Electronics**, Vol. 45, 2001. pp. 441-446.

[9] Jinwook Burm., Kerry I. Litvin., William J. Schaff. and Lester F. Eastman. "Optimization of High-Speed Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors" **IEEE Photonics Technology Letters**, Vol. 6, no. 6, June 1994. pp. 722-724.

[10] R.-H. Yuang. and J.-I. Chyi. "Effect of Finger Width on Large-Area InGaAs MSM Photodetectors" **Electronics Letters**, Vol. 32, no. 2, January 1996. pp. 131-132.

[11] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ. พ.ศ. 2544.

[12] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. กรุงเทพฯ. พ.ศ. 2545.

[13] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. **"ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลานาร์."** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.

[14] Kathryn M. Booth and Steven L. Hill. **The essence of optoelectronics**. Great Britain : Prentice Hall. 1998.

[15] S. M. Sze., D. J. Coleman., Jr. and A. Loya. "Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structure" **Solid-State Electronics**, Vol. 14, 1971, pp. 1209-1218.

[16] S. Khunkhao., Y. Yasumura., K. Kitagawa., T. Masui. and K. Sato. "On Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures" **Solid-State Electronics**, Vol. 47, No. 10, October 2003. pp. 1811-1816.

[17] S. Niemcharoen., K. Kobayashi., M. Kimura. and K. Sato. "Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Condition" **Solid-State Electronics**, Vol. 45, No. 10, October 2001. pp. 1815-1819.

[18] ธเนศ โซะเหม. **"การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์."** วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์ บัณฑิตวิทยาลัย, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.

[19] Chino K. "Behavior of Al-Si Schottky Barrier Diodes under Heat Treatment" **Solid- State Electronics**, Vol. 16, 1973. pp. 119-121.

[20] Anthony W. Sarto. and Bart J. Van Zeghbroeck. "Photocurrent in a Metal-Semiconductor-Metal Photodetector" **IEEE Journal of Quantum Electronics**, Vol. 33, no. 12, December 1997, pp. 2188-2194.

ลาดกระบัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ENGINEERING

ปีที่ 22 ฉบับที่ 1 มีนาคม 2548

1. การศึกษาการปลูกฟิล์มบางอะมอร์ฟัสซิลิคอนชนิดบริสุทธิ์ด้วยวิธีพลาสมาซีวีดีความถี่สูง 1

อัศวิน พงษ์สิงห์ทอง วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง พงศพันธ์ สิชฌนุกฤษฏ์

2. การพัฒนาฟิล์มบางซิลิคอนชนิดพีด้วยวิธี PECVD เพื่อประยุกต์ใช้เป็นชั้นหน้าต่างรับแสงในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดอะมอร์ฟัสซิลิคอน 7

อัศวิน พงษ์สิงห์ทอง วิสุทธิ์ จิตรุ่งเรือง พงศพันธ์ สิชฌนุกฤษฏ์

3. การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/a-Si/Al แบบพลานาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง 13

ธเนศ โชะเหม มานิดา ด้วงแสง สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

4. ระบบวัดมลภาวะแบบรีโมทข้อมูล โดยการตรวจจับกระแสรั่วไหล 19

สุพัด มาพันธุ์ มณฑล สีลาจันดาไกรฤกษ์

5. การคำนวณหาพิกัดกระแสและขนาดของสายเคเบิลแรงดันไฟฟ้าต่ำ และแรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง โดยคำนึงถึงลักษณะการติดตั้ง แรงดันตกในสาย และผลกระทบจากฮาร์มอนิก 25

ทีฆายุ ดิษสุธรรม ฟูลี บรรจงจิตร ประพาพรรณ เคลือบวรรณรัตน์ บุญเลิศ สื่อเฉย สิริวัช ทัดสวน

6. การประมาณช่องสัญญาณสำหรับการเชื่อมโยงขาขึ้นของระบบ OFDM-CDMA บนช่องสัญญาณสื่อสารการบิน 31

วันปิติ กลิ่นงาม กอบชัย เดชหาญ

7. การรู้จำใบหน้าโดยใช้หลักการของ 2DLDA 37

สิทธินนท์ คงสมทนา ยุทธพงษ์ รังสรรค์เสรี

8. การจัดประเภทแพ็กเก็ตตามกฎด้วยวิธี Bitmap Intersection Lookup (BIL) พร้อมการปรับปรุงกฎ 43

ณัฐโชติ พรหมฤทธิ์ อัครินทร์ คุณกิตติ

9. บล็อกกรองความถี่ที่ทำงานในโหมดกระแสปรับค่าได้โดยวิธีทางอิเล็กทรอนิกส์ด้วย CCCII แบบหลายเอ้าพุท 49

ทรงพล กลิ่นสุคนธ์ มนตรี คำเงิน กอบชัย เดชหาญ พิพัฒน์ พรหมมี ณรงค์ อวจฤทธิ์

10. วงจรตรวจจับค่าสูงสุดใช้แรงดันต่ำโดยใช้เทคโนโลยีซีมอส 54

กฤษณ์ อ่างแก้ว สุรชัย จันทร์ฉาย พิพัฒน์ พรหมมี กอบชัย เดชหาญ มนตรี สมดุลยกนก

11. วงจรคูณสัญญาณอนาลอกแบบซีมอส ความเพี้ยนต่ำโดยใช้ไฟเลี้ยงค่าชุดเดียว 59

มนตรี สมดุลยกนก พิพัฒน์ พรหมมี กอบชัย เดชหาญ กฤษณ์ อ่างแก้ว

12. การตรวจจับฮาร์มอนิกโดยการใช้โครงข่ายประสาทเทียมเพอร์เซ็บตรอนหลายชั้น 65

เอกวิทย์ หาญักษ์วงษ์ วิจิตร กิณเรศ

13. วงจรกรองกำลังแอคทีฟสามเฟสที่ใช้หลักการของกำลังไฟฟ้ารีแอคทีฟชั่วขณะควบคุมด้วยตัวประมวลผลสัญญาณดิจิตอล 71

สัมลิภาพ โคตทะเล วิจิตร กิณเรศ

14. The Management of Lead Waste Water Using Power Source 1440 Watts with Microcontroller 77

Siseerot Ketkaew

การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

Photocurrent Generation of Planar Al/n-Si/Al Photodiodes with Wide Electrode Gap

ธเนศ โชะเหม มานิตา ด้วงแสง สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทคัดย่อ

ในรายงานนี้จะพิจารณาถึงการเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาด 20-500 μm พบว่า กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ผ่านการซินเตอริงอุณหภูมิ 500 °C ที่ถูกวัดในแบบกระแสตรงและกระแสสลับ ในช่วงความถี่ 100 Hz ถึง 4 MHz จะเกิดกระแสแสงขึ้นสองส่วนจากบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยขนาดของกระแสแสงที่เกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะขึ้นอยู่กับพื้นที่บริเวณปลอดพาหะ ส่วนกระแสแสงจากบริเวณนิวทรัลจะเกิดจากผลของการแพร่ของพาหะส่วนน้อย ที่อยู่ใกล้ขอบของบริเวณปลอดพาหะ จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปอธิบายการเกิดกระแสแสงของไดโอดชนิด Al/n-Si/Al นี้ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างได้เป็นอย่างดี

Abstract

This paper considers the photocurrent generation of planar Al/n-Si/Al photodiodes with 20-500 μm electrode spacing. The experimental results reveal that photocurrent generation of 500 °C sintered photodiodes are measured the current-voltage (I-V) and optical response characteristics in both direct current (dc) and alternating current (ac), at frequency 100 Hz to 4 MHz, schemes. It is found that the presence of electrode gap under optical illumination can enhance the device photocurrent from neutral region and depletion region. Photocurrent from depletion region reflects the depletion area. On the other hand, photocurrent from neutral region reflects within the diffusion length of minority carriers from the boundary with depletion region. The experimental results can be explained photocurrent generation of Al/n-Si/Al photodiode with wide electrode gap.

1. บทนำ

โฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ (planar Al/n-Si/Al photodiode) หรือโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยกำแพงศักย์ช็อตกี (schottky barrier: ϕ_{bn}) ที่ปลายสุดทั้งสองด้าน ซึ่งต่อแบบหันหลังชนกัน [1] เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากมีสมบัติเด่นหลาย

ประการ คือ ทำงานด้วยความเร็วสูง หรือมีแบนวิดธ์กว้าง เพราะมีค่าความจุไฟฟ้าต่ำ ทำให้เหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบสื่อสารและการจัดการข้อมูลทางแสงที่มีความเร็วสูง [1-5] นอกจากนี้ยังมีกระบวนการสร้างที่ง่าย อีกทั้งโครงสร้างยังเป็นแบบพลานาร์ ทำให้สามารถสร้างเป็นวงจรรวมทางด้านออปโตอิเล็กทรอนิกส์ได้ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้สะดวกยิ่งขึ้น

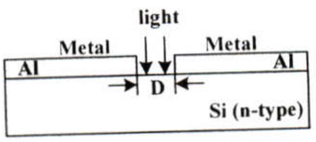
ในรายงานนี้จะนำเสนอการเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างอยู่ในช่วง 20-500 μm ภายหลังจากให้แสงตกกระทบที่บริเวณผิวหน้าด้านบนของอุปกรณ์

2. โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง

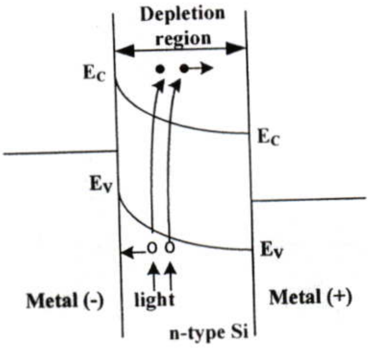
โครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (D) หรือระยะห่างขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนแยกรอยสัมผัสทั้งสองของโครงสร้าง MSM ดังรูปที่ 1 (ก) โดยทั่วไประยะห่างขั้วไฟฟ้าจะสร้างให้มีขนาดน้อยกว่า 3 μm เมื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงแล้วกระแสแสงที่ได้จะเกิดจากกระแสแสงไดโอดเพียงอย่างเดียว [2, 4, 5] เพราะบริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ดังรูปที่ 1 (ข)

ส่วนในรูปที่ 1 (ค) แสดงถึงโฟโตไดโอดที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง (D > 20 μm) ทำให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ได้รับ จะประกอบไปด้วยกระแสแสงสองส่วน [6,7] คือ กระแสแสงที่มาจากบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) และกระแสแสงที่มาจากบริเวณนิวทรัล (neutral region) โดยส่วนแรกเรียกว่ากระแสแสงไดโอด (I_d) และส่วนหลังเรียกว่ากระแสแสงคอนดัคเตอร์ (I_c) ดังนั้นกระแสแสงรวม (I_p) จึงเป็นผลรวมของกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดัคเตอร์ ดังสมการที่ 1

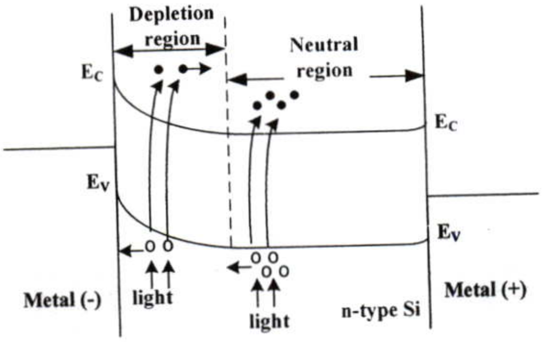
$$I_p = I_c + I_d \tag{1}$$



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 1 โครงสร้างและแถบพลังงาน MSM Photodiodes

(ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM

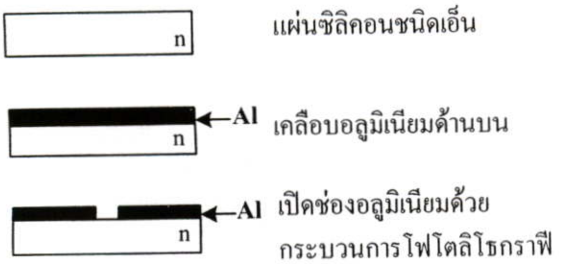
(ข) แถบพลังงานที่บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด

(ค) แถบพลังงานที่บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าบางส่วน

3. การเตรียมชิ้นงาน

โครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ในรายงานนี้จะใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วโลหะมีขนาด 1 x 1 mm^2 ส่วนสารกึ่งตัวนำจะเลือกใช้เป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งวัสดุทั้งสองหาสามารถได้ง่ายและยังเป็นวัสดุที่สำคัญในการสร้างวงจรรวม สำหรับระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นมีค่าระหว่าง 20-500 μm

กระบวนการสร้างอุปกรณ์ Al/n-Si/Al แสดงดังในรูปที่ 2 เริ่มด้วยการนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทานแผ่นประมาณ 7-21 Ω-cm มาเคลือบอลูมิเนียมด้านหน้าของแผ่น ด้วยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ ที่ความดันประมาณ 1.6 x 10^{-6} Torr จากนั้นใช้กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาตรฐาน เพื่อเปิดช่องรับแสง แล้วนำชิ้นงานไปทำการซินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 1 ลิตร/นาที เป็นเวลา 15 นาที จากกระบวนการสร้างนี้ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอน (ϕ_{bn}) มีค่าประมาณ 0.72-0.73 eV ซึ่งสอดคล้องกับการวัดที่ผ่านมา [8] ทำให้กระแสรั่วไหลที่ได้มีค่าต่ำ จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดลักษณะสมบัติทางแสงต่อไป โดยผลการทดลองทั้งหมดในรายงานนี้จะทำการวัดที่อุณหภูมิห้อง

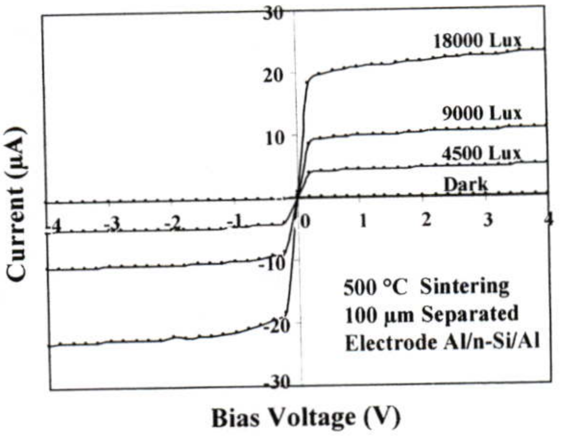


รูปที่ 2 กระบวนการสร้างอุปกรณ์ Al/n-Si/Al

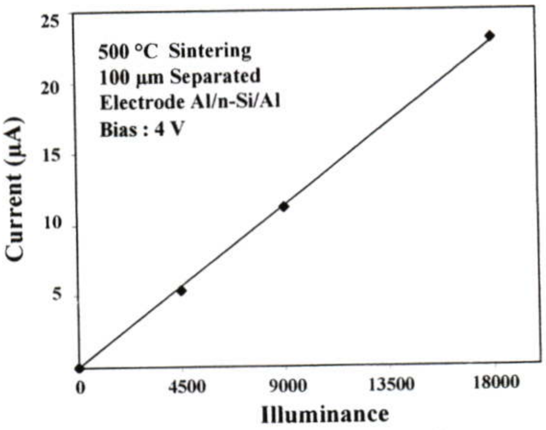
4. ผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al

ทำการวัดความสัมพันธ์กระแส-แรงดันแบบกระแสตรง ภายใต้เงื่อนไขของการให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ที่มีความเข้มค่าต่างๆ รวมทั้งกระแสมืด ด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าอุปกรณ์มีกระแสรั่วไหลที่ต่ำ ประมาณ 20 nA และกระแสของอุปกรณ์มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับความเข้มแสงเพิ่มขึ้น โดยที่ความเข้มแสง 4500 Lux, 9000 Lux และ 18000 Lux ที่แรงดันไบแอส 4 โวลท์ จะมีค่ากระแสประมาณ 6 μA, 12 μA และ 24 μA ตามลำดับ และมีการเปลี่ยนแปลงเป็นแบบเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4 จากลักษณะสมบัติที่กล่าวข้างต้นทำให้โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ Al/n-Si/Al สามารถนำไปใช้เป็นตัวตรวจจวัดแสงในเชิงพาณิชย์ได้เป็นอย่างดี



รูปที่ 3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm เมื่อได้รับแสงที่ความเข้มค่าต่างๆ



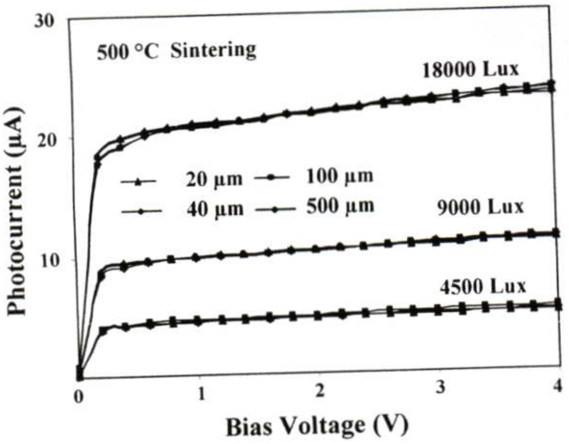
รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 μm เมื่อได้รับแรงดันไบแอส 4 โวลท์

4.2 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าต่างกัน

จากลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันที่วัดได้ดังในรูปที่ 3 นำมาทำการหากระแสแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าค่าต่างๆ โดยกระแสแสงหาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด (I_{Mea}) ลบด้วยกระแสมืด (I_{Dark}) ดังสมการที่ 2 [9] จะได้กราฟลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่า กระแสแสงที่ความเข้ม

แสงค่าเดียวกัน จะมีค่าเกือบเท่ากันเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงระยะห่างขั้วไฟฟ้าของโฟโตไดโอด และกระแสแสงจะมีค่ามากขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มแสง ดังนั้นจึงสามารถพิจารณาได้ว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20 μm ถึง 500 μm จะมีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้นน้อยมาก

$$I_p = I_{Mea} - I_{Dark} \qquad (2)$$



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าค่าต่างๆ

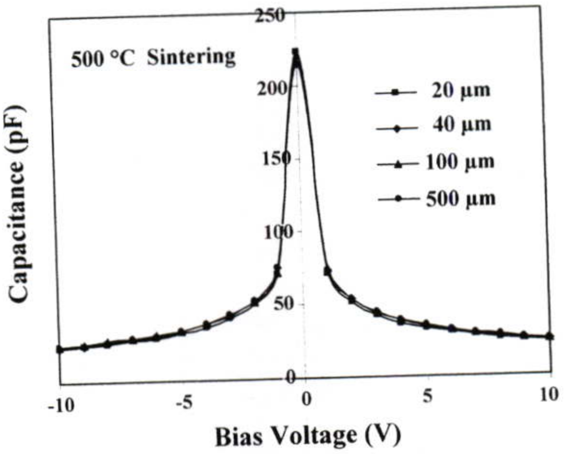
โดยทั่วไปแล้วโครงสร้าง MSM ที่บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด กระแสแสงที่ได้จะเป็นกระแสแสงไดโอดเพียงอย่างเดียวและปริมาณกระแสจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มระยะห่างขั้วไฟฟ้าให้มีขนาดมากขึ้น [4,5] ส่วนโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง กระแสแสงที่ได้ เป็นผลรวมของกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดัคเตอร์ โดยกระแสแสงคอนดัคเตอร์ขึ้นอยู่กับการแพร่ของพาหะที่อยู่ใกล้ขอบของบริเวณปลอดพาหะ พบว่าที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 μm กระแสแสงที่เกิดจากการแพร่ของพาหะส่วนน้อยมีค่าใกล้เคียงกันเป็นผลให้กระแสแสงรวมมีค่าเท่ากัน

4.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al

ทำการหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดันไบแอส ด้วยเครื่อง HP 4284A precision LCR meter ซึ่งโครงสร้าง MSM พิจารณาได้ว่าประกอบไปด้วยตัวเก็บประจุที่บริเวณรอยสัมผัสทั้งสองต่ออนุกรมกัน ดังนั้นความจุไฟฟ้าของ MSM จึงมีค่าใกล้เคียงความจุไฟฟ้าด้านที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับ มีค่าดังสมการที่ 3 [9]

$$C_{Reverse} = \sqrt{\frac{q\varepsilon_r\varepsilon_o N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \qquad (3)$$

เมื่อ ε_r คือ เปอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำของซิลิคอน, ε_o คือ เปอร์มิติวิตีในสุญญากาศ, V_{bi} คือ แรงดันภายใน, V_A คือ แรงดันไบแอส และ N_D คือ ความเข้มข้นของอะตอมสาร เจือผู้ให้



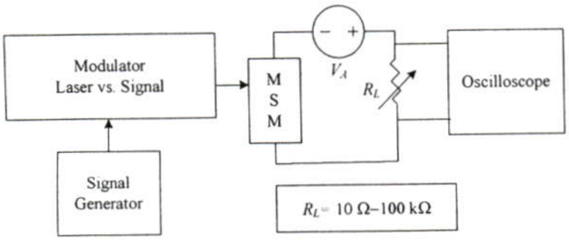
รูปที่ 6 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแรงดันไบแอสค่าต่างๆ

จากรูปที่ 6 พบว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al มีความสมมาตรกันซึ่งจะมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบแอสดังความสัมพันธ์ของสมการที่ (3) คือ เมื่อแรงดันไบแอสมีค่ามากขึ้นทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าระหว่าง 20-500 μm จะมีค่าความจุไฟฟ้าที่เท่ากัน คือ มีค่าประมาณ 25 pF ที่แรงดันไบแอส 10 โวลท์ ดังนั้นความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะขึ้นอยู่กับส่วนปลอดพาหะของรอยสัมผัสด้านที่ได้รับการไบแอสย้อนกลับ โดยระยะห่างขั้วไฟฟ้าไม่มีผลต่อความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์

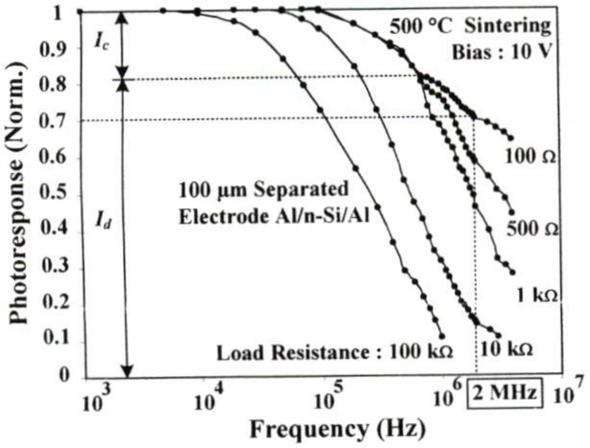
4.4 ลักษณะการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al

เพื่อยืนยันถึงผลรวมของกระแสแสงที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ซึ่ง

เกิดจากกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดักเตอร์ ดังนั้นจึงทำการวัดการตอบสนองสัญญาณรูปไซน์ (แบบกระแสสลับ) ของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al โดยใช้เลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 670 nm, กำลังงาน 2.68 mW ของบริษัท RS ซึ่งถูกมอดูเลทด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด 400 $mV_{p\text{-}p}$ เข้ากับเลเซอร์ที่ความถี่ในช่วง 100 Hz-4 MHz และให้โหลดความต้านทาน (R_L) มีค่าระหว่าง 100 Ω - 100 kΩ ดังรูปที่ 7



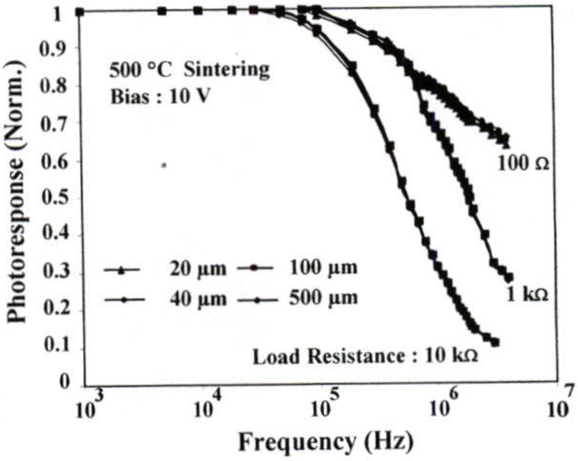
รูปที่ 7 แผนภาพที่ใช้ในการทดลองการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่ให้แรงดันไบแอส (V_A) คงที่ที่10 โวลท์



รูปที่ 8 การตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 100 µm โหลดความต้านทานมีค่า 100 Ω, 500 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ และ 100 kΩ ตามลำดับ

รูปที่ 8 แสดงการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ จากการทดลองพบว่าเส้นกราฟของโหลดความต้านทานที่มีค่าน้อย คือ ในกรณีที่โหลดความต้านทานเป็น 100 Ω-1 kΩ การตอบสนองทางแสงจะมีลักษณะที่เป็นสองช่วง โดยช่วงแรกเป็นผลจากบริเวณนิวทรัล ส่วนช่วงที่สองเป็นผลของบริเวณปลอดพาหะ โดยที่โหลดความต้านทาน 100 Ω มีความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ประมาณ 2 MHz ส่วนที่โหลดความต้านทานค่ามาก คือ 10-100 kΩ ขนาดสัญญาณจะมีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เป็นผลเนื่องจากค่าคงที่ของเวลา (RC time constant) มีค่ามากขึ้นจึงทำให้เห็นการตอบสนองในช่วงเดียว

จากผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่ากระแสแสงประกอบด้วยสองส่วน คือ กระแสแสงที่มาจากบริเวณปลอดพาหะซึ่งเป็นกระแสแสงส่วนมากของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al เมื่อนอร์มอลไรซ์ (normalized) แล้วมีค่ากระแสแสงไดโอด (I_d) ประมาณ 0.82 ของกระแสรวม และส่วนที่เกิดจากบริเวณนิวทรัล เมื่อนอร์มอลไรซ์แล้วจะมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ (I_c) ประมาณ 0.18 ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 9 การตอบสนองสัญญาณทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้า 20-500 µm โหลดความต้านทานมีค่า 10 kΩ ที่แรงดันไบแอส 10 โวลท์

เมื่อทำการเปลี่ยนระยะห่างขั้วไฟฟ้าเป็น 20-500 µm ดังแสดงในรูปที่ 9 พบว่า ผลการตอบสนองทางแสงมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะ และกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณนิวทรัลมีค่าเท่าเดิมจะไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างขั้วไฟฟ้า

5. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองพบว่าอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ากว้างมีค่าระหว่าง 20-500 µm บริเวณปลอดพาหะจะไม่ครอบคลุมระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งหมด ทำให้กระแสแสงที่ได้ประกอบไปด้วย กระแสแสงที่มาจาก

บริเวณปลอดพาหะ คือ กระแสแสงไดโอด และส่วนที่มาจากบริเวณนิวทรัล คือ กระแสแสงคอนดัคเตอร์

กระแสแสงรวมและการตอบสนองทางแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ไม่ขึ้นอยู่กับระยะห่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดกว้าง เนื่องจากกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดัคเตอร์มีค่าเท่าเดิม

จากผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำไปอธิบายการเกิดกระแสแสงของอุปกรณ์ Al/n-Si/Al ได้ และนำไปพัฒนาอุปกรณ์ให้มีลักษณะสมบัติทางแสงที่ดีขึ้นต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ Prof. Dr. Kazunori Sato และ รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช ที่ให้คำแนะนำอันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้ ขอขอบคุณทุนความร่วมมือระหว่างสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง - มหาวิทยาลัยโตไก ประเทศญี่ปุ่น ขอขอบคุณ คุณสรายุทธ์ วิศวแสวงสุข จากศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ที่ช่วยวัดผลของความจุไฟฟ้า และขอขอบคุณ คุณคมสันต์ พนมสีและคุณชาญชัย บุญมา ที่ช่วยวัดผลการทดลองบางส่วน

7. เอกสารอ้างอิง

[1] P. R. Berger, "MSM Photodiodes," IEEE Potentials, Vol. 15, No 2, pp. 25-29, 1996.

[2] S. Y. Chou, Y. Liu, W. Khalil, and S. Alexandrou, "Ultrafast Nanoscale Metal - Semiconductor - Metal Photodetectors on Bulk and LowtemperatureGrown GaAs," Journal of Applied Physics Letters, Vol. 61, No. 7, pp. 819-821, 1992.

[3] M. Seto, V.-J. Leduc, and A. M. F. Lammers, "Al-n-Si Double Schottky Photodiodes for Optical Storage Systems," 27th European Solid-State Device Research Conferrence, Stuttgart, 1997.

[4] B. Jinwook, W. David, J. William and J. Schaff, "High - Frequency, High - Efficiency MSM Photodiodes" IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 31, No. 8, pp. 1504-1509, 1995.

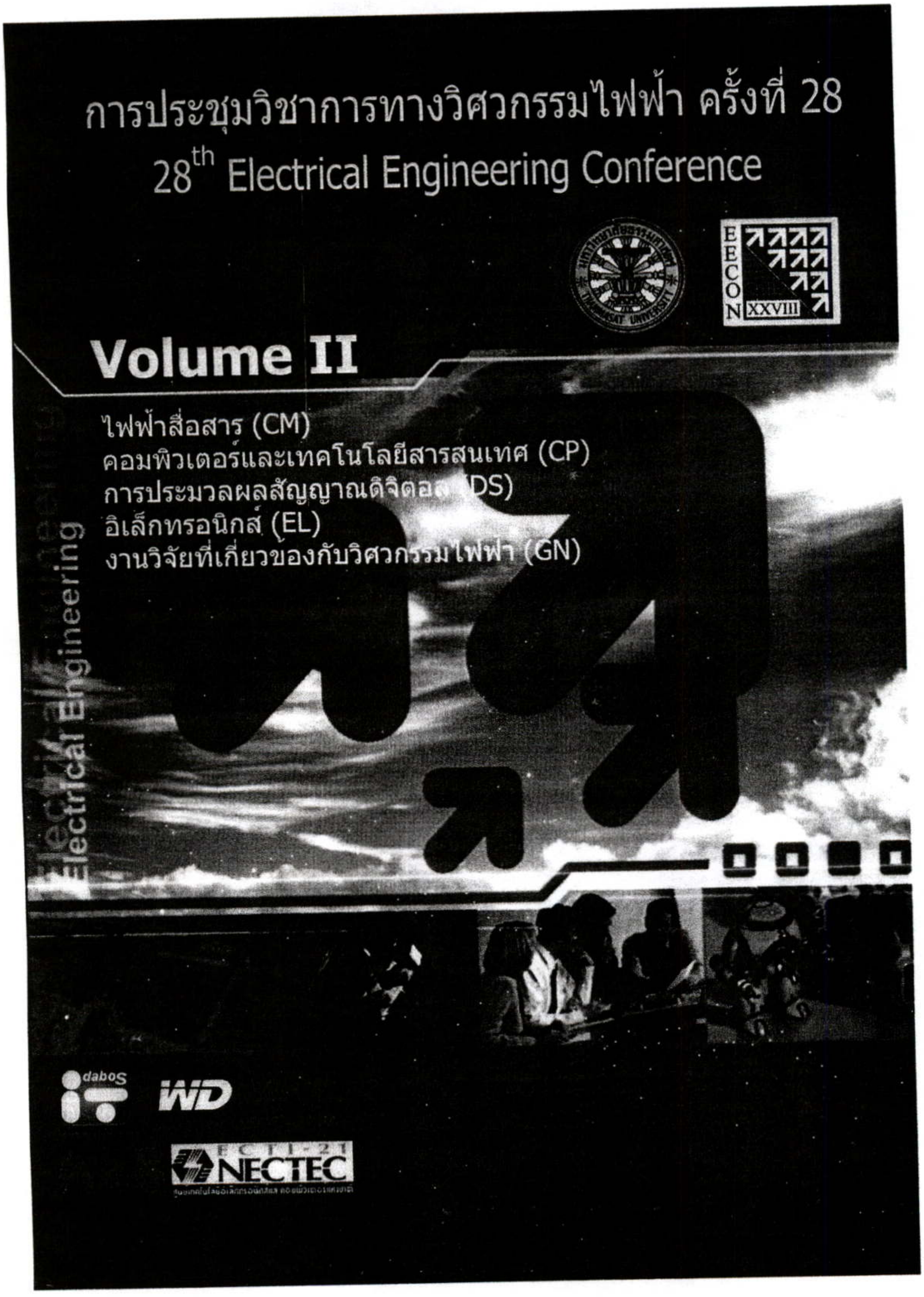
[5] B. D. Julian and H. Schumacher " Transit-Time Limited Frequency Response of InGaAs MSM Photodetectors" IEEE Transactions of Electron Devices, Vol. 37, No. 11, pp. 2285-2291, 1990.

[6] K. Kobayashi , S. Niemcharoen , S. Supadech, Y. Yasumura , and K. Sato , "Intrinsic and Extrinsic Photoresponse of Mo/n-Si/Mo Structures with Wide Electrode Gap," Solid-State Electronics,Vol. 46, No. 9, pp. 1411-1416, 2002.

[7] H. Takano , M. Kimura , T. Ando , S. Niemcharoen , Y. Yasumura and K. Sato, "Optical Response of Planar Mo/n-Si/Mo Structures with Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends," Solid-State Electronics, Vol. 44, No. 12, pp. 2161-2164, 2000.

[8] ธเนศ โซะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สรายุทธ์ วิศวแสวงสุข, "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์," วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 11, ฉบับที่ 3, กันยายน, หน้า 14-19, 2547.

[9] สมเกียรติ ศุภเดช, "สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ"คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2540.


การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28
28th Electrical Engineering Conference
EECON XXVIII
Volume II
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
การประมวลผลสัญญาณดิจิตอล (DS)
อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)
Electrical Engineering
WD
NECTEC

การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท

Photocurrent Increment of Al/n-Si/Al Photodiode by Changing Interdigitated Electrode Geometry

มานิตา ด้วงแสง วรเทพ น้อยปรีชา สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ และภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 3 หมู่ 2 ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 โทร. (66)-2739-0643 E-mail : knsurasa@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้เสนอผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวของอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และจำนวนขั้วของอิเล็กโทรดของโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al เพื่อให้ได้ค่ากระแสแสงที่สูงขึ้น จากผลการทดลองพบว่าการเพิ่มความยาวและจำนวนขั้วอิเล็กโทรดส่งผลให้กระแสแสงมีค่าเพิ่มขึ้นในลักษณะฟังก์ชันเชิงเส้น แต่การเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดในช่วง 40-100 μm ไม่มีผลทำให้ค่ากระแสแสงสูงขึ้น ส่วนผลการตอบสนองทางความถี่ที่ความต้านทานโหลด 1 kΩ มีความถี่คัทออฟอยู่ที่ 300 kHz

คำสำคัญ : โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ, อินเตอร์ดิจิเตท, ตัวตรวจวัดแสง, รอยสัมผัสช็อตกีย์

Abstract

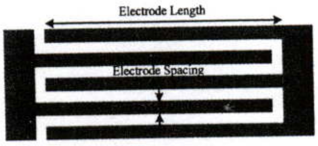
In an effect to increase the photocurrent in a Al/n-Si/Al photodiode we examined the results that occurred when the length of the electrode, the space of the electrode and the number of electrode were changed in Al/n-Si/Al photodiode. In the experiment, the photocurrent became greater as the length of the electrode is extended as more electrode are added. Importantly, when the space of the electrode ranged from 40-100 μm the photocurrent was not augment. The cutoff frequency is approximately 300 kHz at a 1 kΩ load.

Keywords : Metal-Semiconductor-Metal, Interdigitated, Photodetector, Schottky contact

1. บทนำ

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM (Metal-Semiconductor-Metal) เป็นโฟโตดีเทคเตอร์อีกชนิดหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ ด้วยคุณสมบัติเด่นในด้านความเร็วในการตอบสนองสูง มีโครงสร้างแบบพลานาร์ซึ่งสร้างได้ง่าย สามารถสร้างร่วมกับ FET เป็นวงจรรวมด้านออปโต-อิเล็กทรอนิกส์ได้ ข้อดีอีกประการของ MSM โฟโตไดโอดคือมีค่าความจุไฟฟ้าต่อขนาดพื้นที่ต่ำจึงสามารถสร้างให้พื้นที่รับแสงมีขนาดใหญ่เพื่อช่วยให้การเชื่อมต่อกับเส้นใยแก้วนำแสงทำได้ง่ายขึ้น [1,2]

เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับแสงให้ดีขึ้น ในขณะเดียวกันจะลดขนาดของพื้นที่ที่ใช้สร้างอุปกรณ์ด้วย จึงได้มีการปรับปรุงอิเล็กโทรดจากแบบช่องรับแสงเดี่ยว [3,4] มาเป็นแบบอินเตอร์ดิจิเตทซึ่งมีลักษณะดังรูปที่ 1 โดยระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความกว้างและความยาวของอิเล็กโทรดสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยการปรับเปลี่ยนที่กระจกต้นแบบเพียง 1-2 แผ่น ซึ่งการปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิเตทอย่างเหมาะสมจะทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของโฟโตไดโอด MSM ดีขึ้น ทั้งกระแสแสงที่สูงขึ้นและการตอบสนองทางความถี่ที่สูงขึ้น [2,5]



รูปที่ 1 ลักษณะของขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท

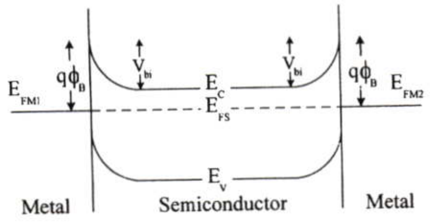
ในรายงานฉบับนี้ได้เสนอผลของการเปลี่ยนแปลงความยาวของอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และจำนวนขั้วของอิเล็กโทรด เพื่อให้ได้ค่ากระแสแสงที่สูงขึ้น

2. โครงสร้าง MSM

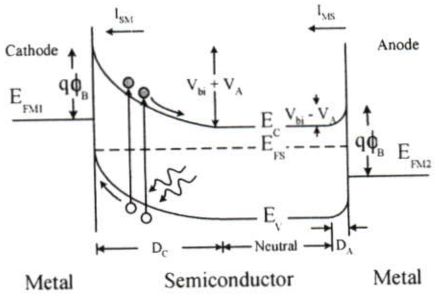
MSM โฟโตไดโอด เป็นโครงสร้างที่ประกอบด้วยรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ 2 รอยสัมผัส เมื่อขั้วไฟฟ้าทั้งสองต่อกันแบบอนุกรม ทำให้เกิดเป็นลักษณะของช็อตกีย์ไดโอดสองตัวต่อแบบหันหลังชนกัน โดยระหว่างรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ทั้งสองจะเป็นบริเวณพื้นที่รับแสง แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อนแสดงดังรูปที่ 2 (ก)

เมื่อให้แรงดันไบอัส V_A แก่ขั้วโลหะทั้งสอง โดยขั้วหนึ่งเป็นแอโนด (Anode) และอีกขั้วเป็นแคโทด (Cathode) จะทำให้ด้านแอโนดเกิดไบอัสตรง ที่ขั้วโลหะแอโนดจะมีศักย์เป็นบวกเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำซึ่งจะทำให้กำแพงศักย์ที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi}-V_A)$ ทำให้อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปที่ขั้วโลหะได้ เกิดกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ส่วนที่ด้านแคโทดเกิดไบอัสย้อนกลับโดยที่ขั้วแคโทดมีศักย์เป็นลบเมื่อเทียบกับสารกึ่งตัวนำ กำแพงศักย์มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi}+V_A)$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายเพิ่มขึ้น

สนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสมีค่าสูงขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางขั้วโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อตกีย์เข้าไปในด้านสารกึ่ง-ตัวนำ ทำให้เกิดมีกระแส (I_{SM}) ไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสมืด (Dark current) ของโฟโตไดโอด ดังในรูป 2 (ข) [6]



(ก)



(ข)

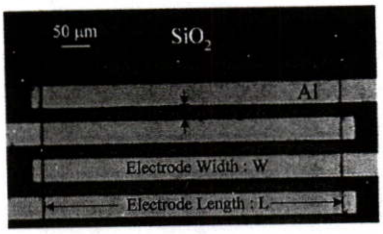
รูปที่ 2 (ก) แถบพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อน
(ข) แถบพลังงานเมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบ

เมื่อโฟตอนตกกระทบลงบนผิวของสารกึ่งตัวนำจะถูกดูดกลืนและทำให้เกิดอิเล็กตรอน-โฮลขึ้นทั้งในบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) และบริเวณนิวทรัล (Neutral region) อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะเคลื่อนที่ด้วยสนามไฟฟ้าไปยังอิเล็กโทรด โดยโฮลจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแคโทด อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่เข้าหาขั้วแอโนดซึ่งจะต้องผ่านบริเวณนิวทรัลทำให้อิเล็กตรอนบางส่วนถูกรวมตัวกลับ ส่วนอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณนิวทรัลจะเคลื่อนที่ไปยังอิเล็กโทรดด้วยการแพร่ซึ่งส่วนมากจะเกิดการรวมตัวกลับ จึงพิจารณาได้ว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เกิดในบริเวณปลอดพาหะ

3. การสร้างชิ้นงาน

เริ่มจากนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น สภาพต้านทาน 7-21 Ω-cm ทำการสร้างชั้น SiO_2 (Thermal Oxidation) ความหนา 5,000 Å จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 1 เพื่อสกัด SiO_2 ออกในส่วนที่ต้องการให้เป็นพื้นที่รับแสง แล้วจึงทำการเคลือบด้วยโลหะอลูมิเนียม (Vacuum Evaporator) จากนั้นจึงทำกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีครั้งที่ 2 เพื่อสร้างลวดลายอิเล็กโทรดบนชั้นอลูมิเนียม แล้วจึงนำชิ้นงานไปทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน เพื่อให้เกิดรอยสัมผัสช็อตกีย์ที่สมบูรณ์ทำให้เกิดกระแสรั่วไหลต่ำ [3]

โฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นแสดงในรูปที่ 3 โดยความกว้างของอิเล็กโทรด (Electrode width: W) คงที่ 40 μm ความยาวของอิเล็กโทรด (Electrode length: L) 0.5-2 mm ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (Electrode spacing: S) 40-100 μm จำนวนขั้วอิเล็กโทรด 2-8 ขั้ว



รูปที่ 3 โฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น มีความกว้างของช่องรับแสง 20 μm ความกว้างของขั้วโลหะ 40 μm ความยาวของ ขั้วโลหะ 500 μm

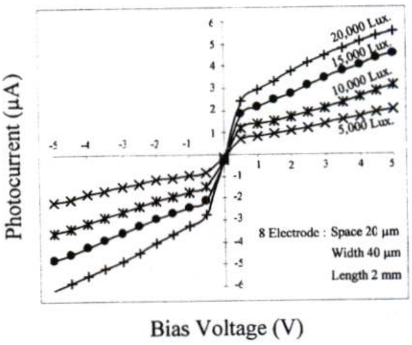
4. การทดลองและผลการทดลอง

4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

ทำการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์กระแสแสง-แรงดันภายใต้การให้แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนซึ่งสามารถปรับความเข้มแสงได้ โดยวัดกระแสมืดและกระแสรวมด้วยเครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061A ค่ากระแสแสงหาได้จากกระแสรวมที่ได้จากการวัดลบด้วยกระแสมืด ดังสมการที่ 1

$$I_{Photo} = I_{Total} - I_{Dark} \qquad (1)$$

4.1.1 ผลกระทบของความเข้มแสงต่อกระแสแสง



รูปที่ 4 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM เมื่อให้แรงดันไบอัส และได้รับความเข้มแสงค่าต่างๆ

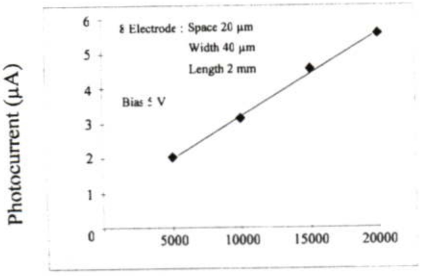
จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดในรูปที่ 4 เป็นลักษณะของช็อตกีย์ไดโอดเมื่อได้รับไบอัสย้อนกลับและมีความสมมาตรกันทั้งด้านบวกและลบ เนื่องจากในโครงสร้าง MSM เป็นรอยสัมผัสแบบช็อตกีย์ 2 รอยสัมผัสต่อแบบหันหลังชนกันเมื่อได้รับการไบอัสจะทำให้ช็อตกีย์ไดโอดตัวใดตัวหนึ่งอยู่ในสภาวะไบอัสย้อนกลับเสมอ โดยค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดจะสูงขึ้นตามแรงดันไบอัส เนื่องจากกระแสแสงของโฟโตไดโอดส่วนใหญ่เกิดจากการดูดกลืน

โฟตอนในบริเวณปลอดพาหะซึ่งสามารถคำนวณความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (D) ได้จากสมการที่ 2 เมื่อเพิ่มแรงดันไบอัสจะทำให้บริเวณปลอดพาหะขยายกว้างขึ้น ส่งผลให้กระแสแสงของโฟโตไดโอดสูงขึ้น

$$D = \left\{ \frac{2\varepsilon}{qN_D} \left(V_{bi} \pm V_A \right) \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad (2)$$

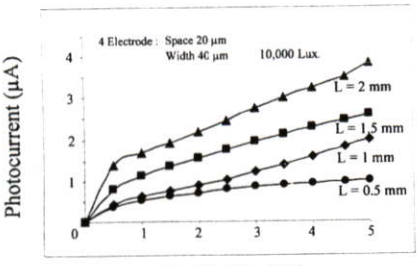
โดย ε คือค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ, q คือประจุอิเล็กตรอน, N_D คือความหนาแน่นอะตอมสารเจือในสารกึ่งตัวนำ, V_{bi} คือกำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ, V_A คือแรงดันไบอัสภายนอก [6]

เมื่อเพิ่มความเข้มแสงที่ตกกระทบลงบนโฟโตไดโอดทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้นเนื่องจากปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงมีมากขึ้น จากการนำข้อมูลสมบัติกระแสแสง-แรงดันมาแสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสง ที่แรงดันไบอัส 5 V ในรูปที่ 5 พบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงต่อการเพิ่มความเข้มแสงเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น ทำให้ใช้เป็นตัวตรวจจับความเข้มแสงได้เป็นอย่างดี



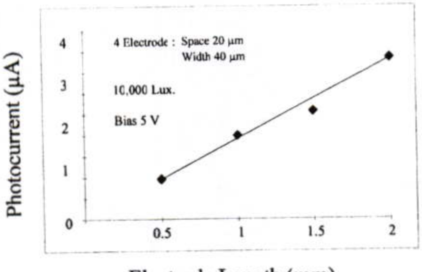
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสง

4.1.2 ผลกระทบของความยาวขั้วโลหะต่อกระแสแสง



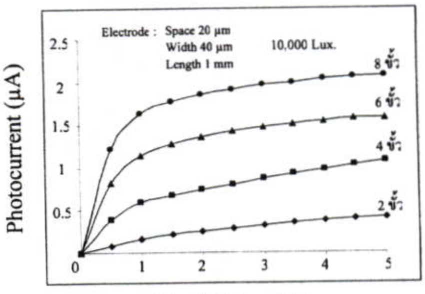
รูปที่ 6 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่มีความยาวของขั้วอิเล็กโทรดค่าต่างๆ

ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอดเมื่อเพิ่มความยาวอิเล็กโทรด ในรูปที่ 6 พบว่าเมื่อเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดทำให้ค่ากระแสแสงสูงขึ้นที่แรงดันไบอัสค่าเดียวกัน เนื่องจากมีพื้นที่ในการรับแสงมากขึ้น จากข้อมูลข้างต้นจึงหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความยาวของอิเล็กโทรดที่แรงดันไบอัส 5 V ในรูปที่ 7 พบว่าการเพิ่มความยาวอิเล็กโทรดทำให้กระแสแสงเพิ่มเป็นฟังก์ชันเชิงเส้น



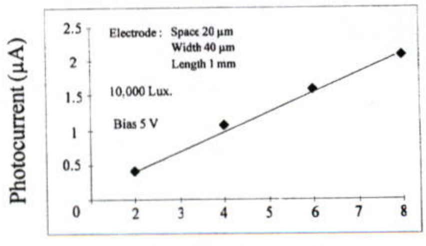
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความยาวของอิเล็กโทรด

4.1.3 ผลกระทบของจำนวนขั้วโลหะต่อกระแสแสง



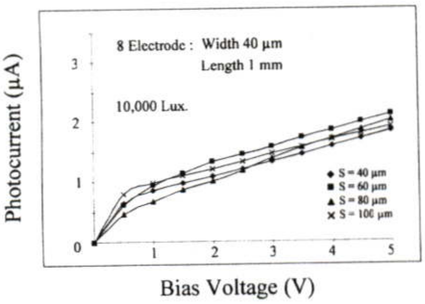
รูปที่ 8 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่มีจำนวนขั้วอิเล็กโทรดค่าต่างๆ

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดในรูปที่ 8 เปรียบเทียบกระแสแสงที่ได้จากอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยว (2 ขั้ว) น้อยกว่าแบบอินเตอร์ดิจิเตทอย่างเห็นได้ชัดเจน ซึ่งเป็นข้อดีของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตทที่สามารถเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดเพื่อให้กระแสแสงสูงขึ้น ต่างจากอิเล็กโทรดแบบช่องรับแสงเดี่ยวที่ต้องใช้วิธีการเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดเพียงอย่างเดียวซึ่งอาจไม่เหมาะสมกับการออกแบบวงจรรวม เมื่อนำข้อมูลจากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน แสดงเป็นความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและจำนวนอิเล็กโทรด ที่แรงดันไบอัส 5 V ในรูปที่ 9 พบว่าการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงเมื่อเพิ่มจำนวนอิเล็กโทรดเป็นการเพิ่มแบบฟังก์ชันเชิงเส้น



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและจำนวนขั้วอิเล็กโทรด

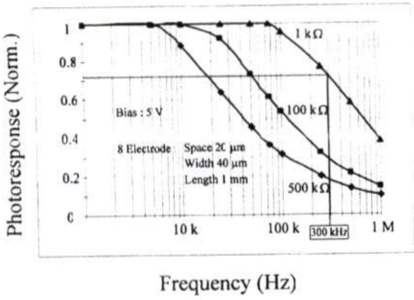
4.1.4 ผลกระทบของระยะห่างระหว่างขั้วโลหะต่อกระแสแสง



รูปที่ 10 ลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรดค่าต่างๆ

จากลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันในรูปที่ 10 พบว่าการเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดไม่มีผลต่อค่ากระแสแสง โดยจากกราฟจะเห็นได้ว่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดมีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่แรงดันไบอัส 5 V กระแสแสงมีค่าประมาณ 2 µA ในกรณีของโฟโตไดโอด MSM ที่ความกว้างบริเวณปลอดพาหะไม่ครอบคลุมระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด การเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดให้มากขึ้นไม่มีผลทำให้ค่ากระแสแสงสูงขึ้นเนื่องจากกระแสแสงส่วนใหญ่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะซึ่งขึ้นกับแรงดันไบอัส การเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดจะทำให้บริเวณนิวทรัลกว้างมากขึ้นจึงไม่มีผลต่อค่ากระแสแสง [4]

4.2 ผลตอบสนองทางความถี่



รูปที่ 11 การตอบสนองสัญญาณทางแสงของโฟโตไดโอด MSM ที่ความต้านทานโหลดค่าต่างๆ

จากการวัดผลตอบสนองทางความถี่เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความยาวของอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด และจำนวนขั้วของอิเล็กโทรด พบว่าตัวแปรข้างต้นไม่มีผลต่อความถี่คัทออฟของโฟโตไดโอด เนื่องจากเมื่อทำการคำนวนเปรียบเทียบค่าความจุไฟฟ้าบริเวณปลอดพาหะเปรียบเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าบริเวณขั้วไฟฟ้าที่ต่อออกสู่วงจรภายนอกพบว่าที่ขั้วไฟฟ้าที่ต่อออกสู่วงจรภายนอกมีค่าความจุไฟฟ้าสูงกว่าบริเวณปลอดพาหะมากค่าความจุไฟฟ้ารวมของโฟโตไดโอดแต่ละตัวมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 260 pF เพราะขนาดขั้วไฟฟ้าที่ต่อออกสู่วงจรภายนอกมีค่าเท่ากัน จากผลการทดลองที่ได้พบว่าความถี่คัทออฟจะขึ้นกับความต้านทานโหลดที่เปลี่ยนแปลงเป็นหลัก ดังในรูปที่ 11 โดยมีความถี่คัทออฟ 300 kHz ที่ความต้านทานโหลด 1 kΩ และเมื่อเพิ่มความต้านทานโหลดให้มีค่าสูงขึ้นจะทำให้ความถี่คัทออฟลดลง

5. สรุป

การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด MSM ที่มีขั้วอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตททำได้โดยการเพิ่มความยาวของอิเล็กโทรดและจำนวนขั้วอิเล็กโทรดให้เหมาะสมกับข้อจำกัดของพื้นที่บนชิ้นสารกึ่งตัวนำหรือในวงจรรวม โดยให้มีความยาวและจำนวนมากพอคลอบคลุมบริเวณที่แสงตกกระทบให้มากที่สุด ซึ่งในกรณีของโฟโตไดโอด MSM ที่ความกว้างบริเวณปลอดพาหะไม่ครอบคลุมระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด การเพิ่มระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดให้มากขึ้นไม่มีผลทำให้ค่ากระแสแสงสูงขึ้น ดังนั้นในการออกแบบขั้วอิเล็กโทรดเพื่อใช้งานจริงควรออกแบบให้ความกว้างและระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดน้อยที่สุดที่เป็นไปได้เพื่อให้บริเวณปลอดพาหะขยายคลอบคลุมระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 ด้าน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่านที่ให้ความรู้ รวมถึงคำแนะนำที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย ขอบคุณคุณธเนศ โซะเหม ที่ให้ความช่วยเหลือและมีส่วนร่วมในงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] P. R. Berger, "MSM Photodiodes," IEEE Potentials, Vol. 15, No 2, pp. 25-29, 1996

[2] S.V. Averine, Y.C. Chan, Y.L. Lam, "Optimization of high-speed MSM-photodiode structures," IEEE CNF, pp. 515-518, 2000

[3] ธเนศ โซะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, สรายุทธ์ วิศวแสวงสุข, "ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์," วิศวสารลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3, กันยายน, หน้า 14-19, 2547.

[4] ธเนศ โซะเหม, มานิตา ด้วงแสง, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง," รอการตีพิมพ์ในวิศวสารลาดกระบัง

[5] T. Masui, S. Khunkhao, K. Kobayahsi, S. Niemcharoen, S. Supadech, "Photosensing properties of interdigitated metal-semiconductor-metal structures with undepleted region," Solid-stated Electronic, Vol. 47, pp. 1385-1390, 2003

[6] รศ.ดร.สมเกียรติ ศุภเดช, "สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ" คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ.2540

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวมานิตา ด้วงแสง
วัน เดือน ปีเกิด	13 พฤศจิกายน 2524
สถานที่เกิด	กรุงเทพมหานคร
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2545 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2.) เครื่องมือวัดอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารในวิทยานิพนธ์นี้

[1] ธเนศ โชะเหม, **มานิตา ด้วงแสง** และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเกิดกระแสแสงของโฟโต-ไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลานาร์ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง", วิศวสาร ลาดกระบัง, ปีที่ 22, ฉบับที่ 1, มีนาคม 2548, หน้า 13-18.

[2] **มานิตา ด้วงแสง**, วรเทพ น้อยปรีชา และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การเพิ่มกระแสแสงของโฟโต-ไดโอด Al/n-Si/Al โดยการเปลี่ยนแปลงขนาดของอิเล็กโทรดแบบอินเตอร์ดิจิเตท", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า, ครั้งที่ 28, ตุลาคม 2548, หน้า 1105-1108.