

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM

แบบอินเตอร์ดิจิตัล

THE STUDY OF RESPONSIVITY OF MSM INTERDIGITATED
PHOTODETECTORS



T104247

นายสันต์ภพ พิทักษ์สากุมิ

นายอนุสรณ์ นิลเพชร

นายไกรฤทธิ ชื่นกลิ่นโพธิ์

๑๕๖๘
๑๕๖๘

เลขหมู่.....
เลขทะเบียน.....**104247**
วัน,เดือน,ปี...**๓.๑.๒๕๕๒**

b.....**120 99 132**
i.....

ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM

แบบอินเตอร์ดิจิท

**THE STUDY OF RESPONSIVITY OF MSM INTERDIGITATED
PHOTODETECTORS**



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2551

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปีการศึกษา 2551
ภาควิชา อิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าคุณทหารลาดกระบัง
หัวข้อปริญญานิพนธ์ การศึกษาการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับแสง โครงสร้าง
Al/n-Si/A แบบอินเตอร์ดิจิตเทท
THE STUDY OF RESPONSIVITY OF Al/n-Si/Al
INTERDIGITATED PHOTODETECTORS

นักศึกษาผู้จัดทำ นายสันต์ภพ พิทักษ์สหมณี เลขประจำตัว 49015170
นายอนุสรณ์ นิลเพชร เลขประจำตัว 49015175
นายไกรฤทธิ์ ชื่นกลิ่นโพธิ์ เลขประจำตัว 49015184

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว


ผศ. ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง

โครงสร้าง MSM แบบอินเทอร์ดิจิทัล

นายสันต์ภพ	พิทักษ์สหภูมิ	49015170
นายอนุสรณ์	นิลเพชร	49015175
นายไกรฤทธิ	ชินกลิ่นโพธิ์	49015184
ผศ.ดร. สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2551

บทคัดย่อ

ตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิทัล นับว่าเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างที่น่าสนใจ เนื่องจากเป็นโครงสร้างที่สามารถให้กระแสมืดที่ต่ำและกระแสแสงที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบช่องรับเดี่ยวอีกทั้งประหยัดเนื้อที่บนสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นปริญญาานิพนธ์เล่มนี้จึงได้มุ่งเน้นทำการศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบอินเทอร์ดิจิทัล โดยทำการศึกษาจากขนาดของขั้วไฟฟ้า ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า และชนิดของขั้วไฟฟ้า ได้แก่ ตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง ของโลหะอะลูมิเนียม (Al/n-Si/Al) ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบสั้น รวมถึงตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งใสของอินเดียมทินออกไซด์ (ITO/n-Si/ITO) ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดลองมาทำการเปรียบเทียบและวิเคราะห์ เพื่อหาโครงสร้างที่มีการตอบสนองทางแสงได้ดีที่สุด พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีการไบอัสที่ 5V กระแส 0.5mA และปรากฏว่าระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง ชนิด ITO/n-Si/ITO จะมีค่าการตอบสนองทางแสงดีกว่าแบบ Al/n-Si/Al และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้นเป็นโครงสร้างที่ดีที่สุดเนื่องจากมีประสิทธิภาพการตอบสนองทางแสงสูงสุด 0.16 A/W ที่ความยาวคลื่น 830 nm รวมถึงประสิทธิภาพควอนตัมสูงสุดที่ 24%

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

THE STUDY OF RESPONSIVITY OF MSM INTERDIGITATED PHOTODETECTORS

Mr. Sunpop	Pitaksahapoom	49015170
Mr. Anusorn	Nilphet	49015175
Mr. Kairit	Chankinpho	49015184
Assist. Prof .Dr.Surasak	Niemcharoen	Advisor

Educational Year 2008

ABSTRACT

Metal-semiconductor-metal photodetectors (MSM) are another type of photodetectors that offer an attractive alternative, because of their characteristic such as low dark current. These photodetectors are interdigitated electrodes that can offer a great number of photocurrent more than single slit photodetectors and can also profitable area on semiconductor substrate. So this project is interested in studying on photoresponse of this MSM photodetectors from the structural of electrode that consist of wide electrode, short electrode spacing of opaque metal contact (Al/n-Si/Al) and wide transparent electrode spacing of Indium Tin Oxide (ITO/n-Si/ITO). The result of this project are shown that wide electrode spacing of ITO/n-Si/ITO MSM photodetectors are higher of photoresponse than wide electrode spacing of Al/n-Si/Al and the highest photoresponse of all photodetector in this project are short electrode spacing of Al/n-Si/Al that have photocurrent at 5V bias was 0.5 mA, highest responsivity at 830 nm was 0.16 A/W and quantum efficiency was 24 %

กิตติกรรมประกาศ

ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ผู้ควบคุมปริญญาโท
ผศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ อาจารย์ที่ปรึกษาปริญญาโท ที่ให้ความรู้ แนวความคิด และให้
คำปรึกษาแก้ไขปัญหาในขณะทำการวิจัย มาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณอาจารย์และเจ้าหน้าที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือใน
การใช้เครื่องมือของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ในระหว่างทำการวิจัย ขอขอบคุณ คุณวรเทพ น้อยปรีชา
และคุณกุลวรางค์ นุตะมาน ที่ช่วยเหลือใน กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง และขอบคุณ ทุกคนที่
เป็นกำลังใจให้ปริญญาโทฉบับนี้สำเร็จลงด้วยดี

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ คุณพ่อ และคุณแม่ผู้ให้กำเนิด ให้ความอุปการะ และสนับสนุนทาง
การศึกษามาโดยตลอด

นาย สันต์ภพ พิทักษ์สทภูมิ

นาย อนุสรณ์ นิลเพชร

นาย ไกรฤทธิ ชื่นกลิ่น โปธิ์

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญรูป	VII
สารบัญตาราง	X
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย	1
1.2 ความสำคัญของปัญหา	2
1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตของการศึกษา	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎี	5
2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ	5
2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง	5
2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง	6
2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	8
2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล	8
2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล	9
2.1.3.3 อินเดียมทินออกไซด์	10
2.1.3.4 สมบัติของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์	11
2.2 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ	11
2.2.1 การเกิดรอยสัมผัสเรกติไฟร์ในภาวะสมดุล	12
2.2.2 การทำงานของรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์	14
2.2.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกี	16
2.3 โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	17

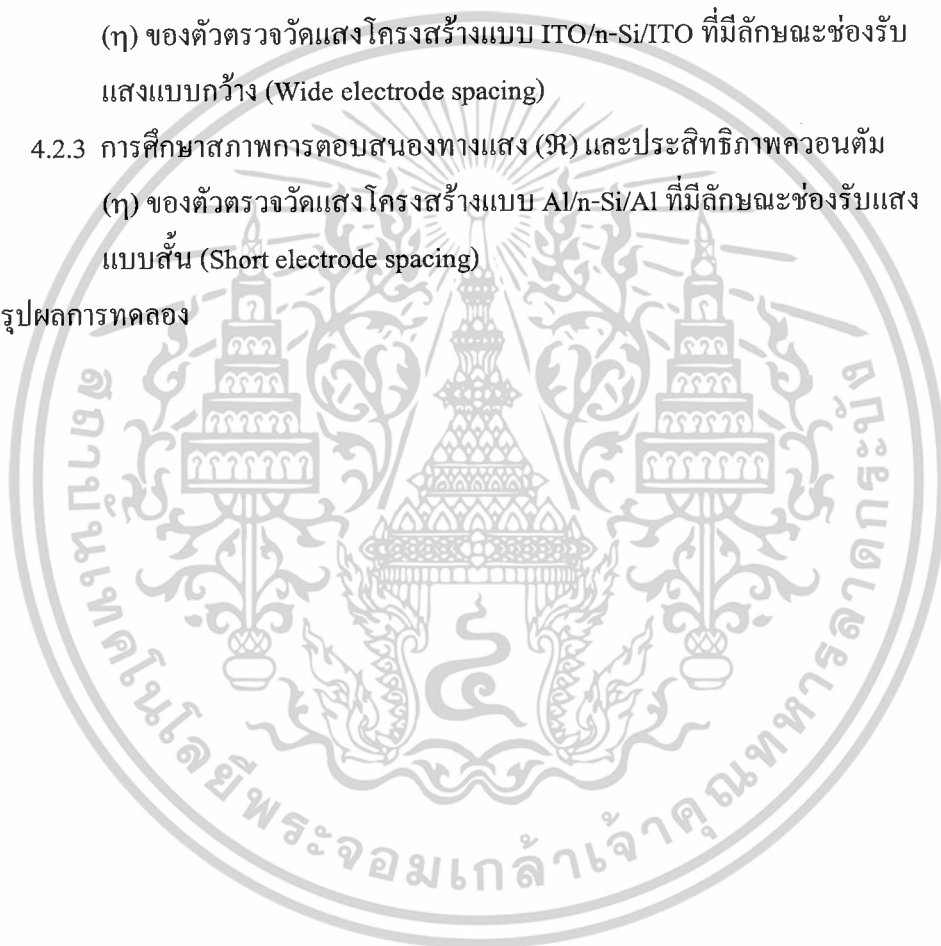
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
IV
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.1 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างในภาวะสมดุลความร้อน	18
2.3.2 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างขณะได้รับแรงดันไบอัส	20
2.3.3 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างขณะได้รับแสงตกกระทบ	24
2.3.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM	25
2.3.5 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นในภาวะสมดุลความร้อน	26
2.3.6 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นขณะได้รับแรงดันไบอัส	27
2.3.7 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นขณะได้รับแสงตกกระทบ	28
2.3.8 ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพการตอบสนอง และผลตอบสนองต่อสเปกตรัม	29
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง	32
3.1 โครงสร้างและการออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al	32
3.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al	33
3.3 โครงสร้างและการออกแบบตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO	38
3.4 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO	38
บทที่ 4 การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	45
4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าต่างๆกัน	45
4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	45
4.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะได้รับแสงตกกระทบ	48
4.2 การศึกษาเทคนิคการวัดสภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม	50

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.2.1 การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (R) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง (Wide electrode spacing)	53
4.2.2 การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (R) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง (Wide electrode spacing)	56
4.2.3 การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (R) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น (Short electrode spacing)	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง	63



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E-K ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ	7
รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	8
รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	9
รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ	10
รูปที่ 2.5 (ก) โลหะที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น (ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง	12
รูปที่ 2.6 ภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์	13
รูปที่ 2.7 (ก) การให้แรงดันไบอัสตรงแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ (ข) แถบพลังงานเมื่อให้แรงดันไบอัสตรงแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์	14
รูปที่ 2.8 (ก) การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ (ข) แถบพลังงานเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์	16
รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น	17
รูปที่ 2.10 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM (ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM	18
รูปที่ 2.11 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน	19
รูปที่ 2.12 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันรัช-ทูลซ์ (VRT)	20
รูปที่ 2.13 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันเฟลต-แบนด์ (VFB)	21
รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสมากกว่าแรงดันเฟลต-แบนด์ (VFB)	21
รูปที่ 2.15 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างเมื่อได้รับแรงดันไบอัส	23
รูปที่ 2.16 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ	24
รูปที่ 2.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	25
รูปที่ 2.18 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น (ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน	26
รูปที่ 2.19 แถบพลังงานภายหลังจากได้รับแรงดันไบอัส	27

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 2.20 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ	28
รูปที่ 2.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	29
รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอน โฟโตไดโอด	30
รูปที่ 3.1 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าโครงสร้าง อินเตอร์ดิจิต	32
รูปที่ 3.2 ตัวแปรกำหนดขนาดของโครงสร้าง อินเตอร์ดิจิต	33
รูปที่ 3.3 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al	37
รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น	38
รูปที่ 3.5 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าโครงสร้าง อินเตอร์ดิจิต ของ ITO	39
รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO	44
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่สร้างขึ้น	44
รูปที่ 4.1 แผนภาพการทดลองเพื่อหาสมบัติกระแส-แรงกับต้นของตัวตรวจวัดแสง	46
รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ	47
รูปที่ 4.3 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองหาสมบัติกระแสแสง-แรงดัน	48
รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันขณะได้รับแสงตกกระทบ	49
รูปที่ 4.5 แผนภาพการทดลองหาประสิทธิภาพควอนตัมทางแสง และสภาพการตอบสนองทางแสง	50
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย (ก) ชุดทดสอบ และ(ข) เครื่อง โมโนโครมาเตอร์	51
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับ ความยาวคลื่น	52
รูปที่ 4.8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM กรณีที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง (Wide electrode spacing)	53
รูปที่ 4.9 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับ ความยาวคลื่นในช่วง 650-950 nm ของ Al/n-Si/Al ที่มีระยะกว้างระหว่างขั้ว (S) =10 μm และ 20 μm	54
รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมกับความยาวคลื่นในช่วง 650-950 nm โครงสร้าง (Al/n-Si/Al) ที่มีระยะกว้างระหว่างขั้ว (S) =10 μm และ 20 μm	55

สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.11 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM กรณีที่มีลักษณะ ช่องรับแสงแบบกว้าง (Wide electrode spacing)	56
รูปที่ 4.12 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับ ความยาวคลื่นใน ช่วง 650-950 nm โครงสร้าง (ITO/n-Si/ITO) ที่มีขนาดขั้ว (W) = 80 μm 60 μm 40 μm และ 20 μm	57
รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมกับ ความยาวคลื่นใน ช่วง 650-950 nm โครงสร้าง (ITO/n-Si/ITO) ที่มีขนาดขั้ว (W) = 80 μm 60 μm 40 μm และ 20 μm	58
รูปที่ 4.14 การเกิดอิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM กรณีที่มีลักษณะ ช่องรับแสงแบบสั้น (Short electrode spacing)	59
รูปที่ 4.15 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับ ความยาวคลื่นใน ช่วง 650-950 nm โครงสร้าง (Al/n-Si/Al) ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 2 μm และ 3 μm	60
รูปที่ 4.16 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมกับ ความยาวคลื่นใน ช่วง 650-950 nm โครงสร้าง (Al/n-Si/Al) ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 2 μm และ 3 μm	61

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 4.1 ผลของสภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจ
วัดแสง

62



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

ปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง ซึ่งมีการนำมาประยุกต์ใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพราะมีคุณสมบัติในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้าซึ่งจะนำไปใช้ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์ และได้มีการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงในรูปแบบต่างๆ ซึ่งแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกัน เช่น กระบวนการสร้าง การตอบสนองทางแสง ความเร็วในการทำงานหรือแม้กระทั่งการนำไปใช้งานจริงเป็นต้น ซึ่งได้มีการพัฒนาอย่างรวดเร็วมาโดยตลอด สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงที่สำคัญๆ ได้แก่ โฟโตดีเทคเตอร์ (Photo detector) หรือตัวตรวจวัดแสง ซึ่งโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metalstructure) หรือโครงสร้าง MSM เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้าน การตรวจวัดแสง มีคุณสมบัติที่เด่นหลายประการ คือ มีกระแสมีดต่ำ สภาพการตอบสนองที่ดี การทำงานด้วยความเร็วสูง สัญญาณรบกวนต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวม ได้ง่ายเนื่องจากมีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ (planar) และกระบวนการสร้างสอดคล้องกับการสร้างเฟต (Field Effect Transistor : FET) จึงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ได้รับความสนใจอย่างมากตัวหนึ่ง และคาดว่าจะมีบทบาทมากในอนาคต

เนื้อหาในบทนี้จะกล่าวถึง ความเป็นมา ความสำคัญของปัญหา จุดมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตของการศึกษา สมมติฐานและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ ของการวิจัยในปริญญานิพนธ์นี้

1.1 ความเป็นมาของงานวิจัย

เนื่องจากสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสงได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสง คุณสมบัติในเรื่องการดูดกลืนแสงและการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้ามีความสำคัญมากจึงได้มีการพัฒนาเรื่อยมา สารเจอร์มาเนียม (Ge), ซิลิคอน (Si), และ แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs) ซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำที่นิยมนำมาสร้างเป็นอุปกรณ์ทางแสงมากที่สุดเพราะตอบสนองความถี่ที่สูงๆ ได้ดีกว่า ซิลิคอน โฟโตไดโอดมีโครงสร้างหลายลักษณะแตกต่างกันไปเช่น พีเอ็นโฟโตไดโอด , พินโฟโตไดโอด , โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM , อะวาลานซ์โฟโตไดโอด ซึ่งในรายงานเล่มนี้เราจะมาทำการศึกษาระสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง โครงสร้าง MSM แบบ Al/n-Si/Al และ ITO/n-Si/ITO ซึ่งเป็นการใช้สารกึ่งตัวนำในการสร้างเป็นซิลิคอน ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายกว่า แกลเลียมอาเซไนด์ และมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายๆอย่าง และได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง

ความเป็นมาของโครงสร้าง MSM เริ่มต้นจากการศึกษาในช่วงต้นของทศวรรษที่ 70 โดยในปี ค.ศ. 1971 Sze, Coleman และ Loya สร้างโครงสร้าง MSM แบบแนวตั้ง (vertical structure) ทำการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ต่อมาโครงสร้าง MSM ถูกสร้างเป็นแบบเชิงราบ ซึ่งเหมาะสมสำหรับนำมาประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจวัดแสง และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ได้ ง่ายด้วย ปี ค.ศ. 1980 มีการศึกษาโครงสร้าง MSM บนอะมอร์ฟัสซิลิคอน (amorphous silicon) และสามารถตอบสนองความเร็วในระดับพิโควินาที จากนั้นได้มีการศึกษาการจำกัดเวลาการส่งผ่าน (transit-time-limited) และการจำกัดเวลาการรวมตัวของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ เช่น แกลเลียมอะเซไนด์ (GaAs) และอะลูมิเนียมแกลเลียมอะเซไนด์/อินเดียมแกลเลียมอะเซไนด์ (AlGaAs/ InGaAs) เป็นต้น หลังจากปี ค.ศ. 1990 เป็นต้นมา จะพบเห็นรายงานการวิจัยที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM อย่างต่อเนื่อง

การสร้างวงจรรวมด้วยซิลิคอนเทคโนโลยีที่มีความก้าวหน้าอย่างมากในขณะนี้ ดังนั้นในงานวิจัยในปริยญาณิพนธ์นี้ จึงเลือกที่จะศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้สารกึ่งตัวนำที่ทำหน้าที่เป็นฐานรองหรือดูดกลืนแสง คือ ซิลิคอน ได้ศึกษาการเกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างต่างๆกัน ซึ่งสามารถควบคุมได้ด้วยความเข้มแสง และแรงดันไฟฟ้า ซึ่งได้ออกแบบแบบอินเตอร์ดิจิทเทด (interdigitated pattern) และเพื่อพัฒนาให้ตัวตรวจแสงมีสมบัติที่ดีขึ้นอีก การออกแบบ การสร้าง และการพัฒนา ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM บนฐานรองซิลิคอน (silicon based metal-semiconductor-metal photodetectors) ที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์เป็นไปอย่างต่อเนื่องตามลำดับ จึงทำให้สามารถเข้าใจถึงกลไกการทำงานภายในตัวตรวจวัดแสง เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์ภายในอุปกรณ์ที่ซับซ้อนมากยิ่งขึ้นซึ่งจะเป็นประโยชน์ ต่อการพัฒนาตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นในโอกาสต่อไป

1.2 ความสำคัญของปัญหา

จากคุณสมบัติที่สำคัญของตัวตรวจวัดแสงคือเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และปัจจุบันนี้มีการนำตัวตรวจวัดแสงไปใช้งานกันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากความสามารถของอุปกรณ์ในการเปลี่ยนสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และมีการพัฒนาให้สามารถจัดการข้อมูลทางแสงได้หลายรูปแบบ ดังนั้นอุปกรณ์เหล่านี้จึงต้องมีการตอบสนองทางแสงที่ดีเพื่อประยุกต์ใช้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

งานในอนาคต และใช้เป็นตัวรับ สัญญาณทางไกลในระบบสื่อสารความเร็วสูง และเป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับการประยุกต์ใช้งานที่เกี่ยวข้องกับระบบคอมพิวเตอร์

ดังที่กล่าวไว้ข้างต้นว่าตัวตรวจวัดแสงเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องรับทางแสง (optical receiver) คืออุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งอาจเป็นตัวตรวจวัดแสงเดี่ยวๆ หรือมีตัวตรวจวัดแสงอยู่ร่วมกับส่วนประกอบอื่นๆ เช่น ส่วนขยายสัญญาณ และ/หรือส่วนฟิลเตอร์ เป็นต้น โดยตัวตรวจวัดแสงจะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับแสงหรือพลังงาน โฟตอนของแสงที่ตกกระทบ เพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ในทางอุดมคติตัวตรวจวัดแสงจะต้องตอบสนองการเปลี่ยนสัญญาณที่รับมาให้เร็วที่สุด ซึ่งเป็นคุณสมบัติที่สำคัญมากและต้องไม่เกิดสัญญาณรบกวนขึ้นกับสัญญาณที่รับเข้ามา นอกจากนี้ยังต้องเพิ่มคุณสมบัติที่พึงประสงค์สำหรับตัวตรวจวัดแสงอีกหลายประการ ดังเช่น ขนาดเล็ก น้ำหนักเบา มีความแข็งแรงทนทาน มีอายุการทำงานนาน ความเชื่อถือสูง ราคาต่ำ และระบบสิ่งแวดล้อมภายนอกต้องไม่มีผลกระทบต่อการทำงานด้วย เป็นต้น

สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM มีจุดเด่นอยู่ที่ความจุไฟฟ้ามีค่าต่ำ ทำให้ใช้เวลาในการตอบสนองสัญญาณมีค่าน้อย และมีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์ ซึ่งเหมาะสำหรับสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย นอกจากนี้มีกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนจึงมีราคาถูก อุปกรณ์ตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM จึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่น่าสนใจอีกตัวหนึ่ง โดยเฉพาะการเลือกใช้ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสามารถตอบสนองทางแสงในช่วงของแสงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างมากมาย

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตอบสนองทางแสงที่มีโครงสร้างโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะ (MSM) ในรูปแบบต่างๆ ทั้งแบบระยะของขั้วโลหะแบบกว้าง (Wide electrode spacing) และแบบระยะของขั้วโลหะแบบสั้น (Short electrode spacing) และยังได้ทำการศึกษาโครงสร้างที่มีขั้วไฟฟ้าโปร่งใสและทึบแสง ซึ่งขั้วไฟฟ้าชนิดโปร่งใสมีคุณสมบัติที่ยอมให้แสงผ่านได้ทำให้โฟตอนที่ตกกระทบมีค่ามากกว่าขั้วไฟฟ้าทึบแสง

1.3 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ปริญญานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำ เพื่อหาโครงสร้างที่มีการตอบสนองทางแสงที่ดีที่สุดและได้นำโครงสร้างที่ใช้ขั้วโลหะที่มีคุณสมบัติโปร่งแสง และทึบแสงมาเปรียบเทียบกัน

สรุปโดยรวมแล้วในปริญญานิพนธ์เล่มนี้ จึงมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาไว้ดังนี้ คือ

1. เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดประสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางแสง
2. เพื่อศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (R) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจ

วัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง (Wide electrode Spacing)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เพื่อศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (R) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น (Short electrode Spacing)
4. เพื่อศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (R) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง (Wide electrode Spacing) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของขั้วไฟฟ้า (w)
5. เพื่อทำการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพควอนตัม และการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รูปแบบต่างๆ ที่สร้างขึ้น

1.4 ขอบเขตของการศึกษา

- (1). ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM
- (2). ศึกษาทฤษฎี และวิธีการวัดที่เกี่ยวข้องกับการหาค่าประสิทธิภาพควอนตัม (η) และค่าการตอบสนองทางแสง (R) โดยทำการทดลองเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงในเชิงพาณิชย์ของบริษัท Hamamatsu เบอร์ S1226-8BQ ซึ่งเป็นตัวตรวจวัดแสงชนิด ซิลิคอน โฟโตไดโอด
- (3). ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รูปแบบ Al/n-Si/Al (Wide electrode spacing และ Short electrode Spacing) และ MSM รูปแบบ ITO/n-Si/ITO (Wide electrode Spacing)
- (4). ทำการทดลองโดยนำชิ้นงานที่มีโครงสร้างต่างๆ กันไปทำการวัดหาค่าประสิทธิภาพควอนตัม (η) และค่าการตอบสนองทางแสง (R)
- (5). วิเคราะห์ผลการทดลอง โดยนำผลการทดลองในแต่ละส่วนมาเปรียบเทียบกัน เพื่อหาโครงสร้างที่ดีที่สุดสำหรับตอบสนองทางแสง (R)

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการศึกษาและวิจัยทำให้ได้รู้ว่า ค่าประสิทธิภาพควอนตัม และค่าการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รูปแบบ Al/n-Si/Al (Wide electrode Spacing และ Short electrode Spacing) และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รูปแบบ ITO/n-Si/ITO (Wide electrode Spacing) ที่มีการการให้ไบอัสกลับที่ 5V ซึ่งจะทำให้สามารถหาโครงสร้างที่ดีที่สุดสำหรับตัวตรวจวัดแสง และจะได้นำไปใช้งานในด้านอิเล็กทรอนิกส์ทางแสงต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎี

บทนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ตามลักษณะโครงสร้างที่ได้ทำการทดลองคือ MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดกว้าง และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น โดยโครงสร้างของ MSM ทั้งสองแบบนี้จะมีความแตกต่างกันคือ ในกรณีของ MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่อุปกรณ์จะทำให้บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมพื้นที่รับแสงทั้งหมดโดยจะได้ทำการกล่าวต่อไปในทฤษฎี รวมถึงทฤษฎีบางส่วนที่เกี่ยวข้องกัน และมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องกล่าวถึง เพื่อเป็นแนวทางในการทำความเข้าใจลักษณะสมบัติต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ต่อไป โดยเนื้อหาจะกล่าวถึง (1) กระบวนการทางแสง (2) รอยสัมผัส肖ตทิย และ (3) การวิเคราะห์หาตัวแปรที่สำคัญต่างๆ ของรอยสัมผัส肖ตทิย โดยทั้งสามหัวข้อจะกล่าวไว้โดยสังเขป จากนั้นจึงกล่าวถึงโครงสร้าง MSM และลักษณะสมบัติทั้งทางไฟฟ้า และทางแสง เพื่อนำไปใช้วิเคราะห์ผลการทดลองในบทที่ 4 ต่อไป

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วย การดูดกลืนพลังงานของแสงที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์เรามองเห็นเรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 400-700 นาโนเมตร โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” ปรากฏการณ์ที่แสงแสดงลักษณะสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห การแทรกสอด เป็นต้น แต่ในทางฟิสิกส์แบบควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงโดย

$$E_{\text{photon}} = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{\lambda} \quad (\text{J}) \quad (2.1)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือเปลี่ยนให้อยู่ในหน่วย eV ; $E_{\text{photon}} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{q\lambda} = \frac{1.24}{\lambda}$ (eV) (2.2)

โดยที่ ν คือ ความถี่ (Hz)

λ คือ ความยาวคลื่นแสง (μm)

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-sec

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

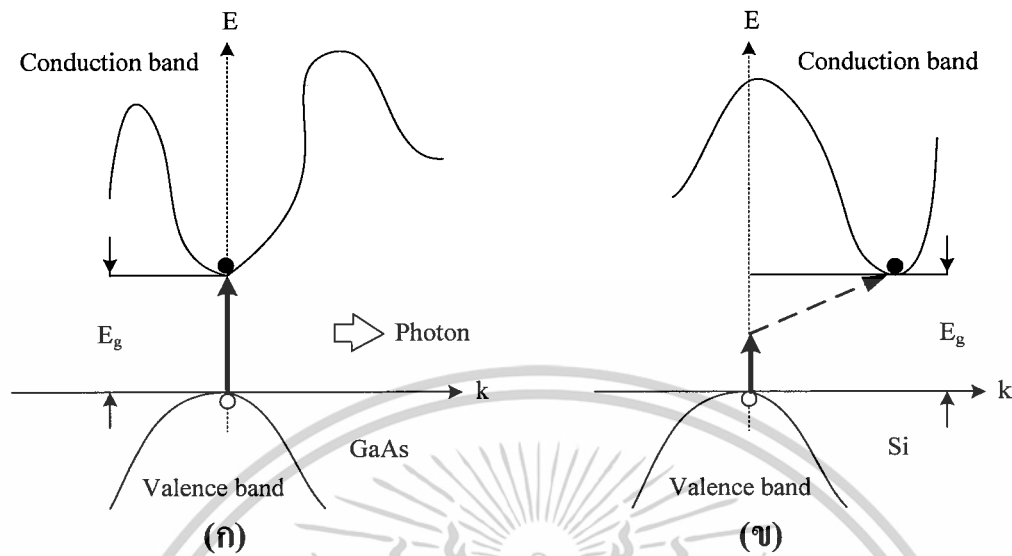
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_{g(\text{semi})}$ การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น

2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง

โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สำคัญ คือ กราฟ E-k diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.1 ซึ่งแสดงตำแหน่งของค่าพลังงานต่ำสุดในแถบนำไฟฟ้าหรือก็คือจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้ากับตำแหน่งของค่าพลังงานสูงสุดในแถบวาเลนซ์หรือจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ โดยพบว่าในสารกึ่งตัวนำบางชนิดตำแหน่งทั้งสองนี้จะอยู่ตรงกัน เช่น แกลเลียมอาร์เซไนด์ หรือสารกึ่งตัวนำประเภทสารประกอบอื่นๆ ดังรูปที่ 2.1 (ก) เรียกลักษณะเช่นนี้ว่า ช่องแถบตรง (direct band gap) และสารกึ่งตัวนำที่มีลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) ส่วนกรณีที่สารกึ่งตัวนำซึ่งตำแหน่งของจุดสำคัญทั้งสองนี้จะอยู่ไม่ตรงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) เช่น ซิลิคอน ลักษณะเช่นนี้ถูกเรียกว่า ช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap) โดยที่สารกึ่งตัวนำในกลุ่มนี้จะถูกเรียกว่า สารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.1 กราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ

(ก) ช่องแถบตรง

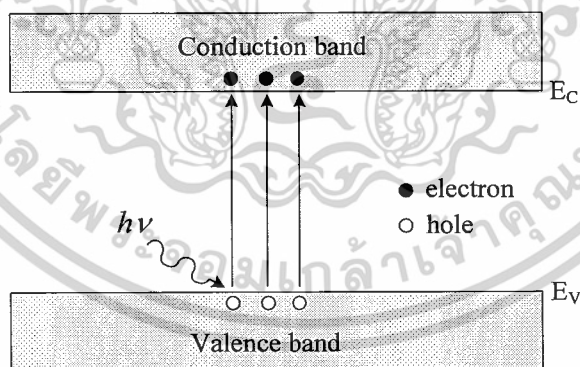
(ข) ช่องแถบไม่ตรง

โดยปกติจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์จะปรากฏอยู่ที่ตำแหน่ง $k=0$ แต่จากรูปที่ 2.1 (ข) จะเห็นว่าจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าจะไม่อยู่ตรงตำแหน่งนี้ หรือก็คือ จุดทั้งสองนี้มีค่า k ที่ต่างกันหรือก็คือมีค่าโมเมนตัมที่ต่างกัน ดังนั้นลักษณะสมบัติบางประการของสารกึ่งตัวนำสองกลุ่มนี้จะแตกต่างกันมาก เช่นลักษณะสมบัติทางด้านแสง (optical property) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงพลังงานของโฟตอนจากแสงสามารถที่จะกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ขึ้นไปอยู่ที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าได้โดยตรง และอิเล็กตรอนที่จุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก็สามารถที่จะตกลงมาโดยตรงยังจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์โดยไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ซึ่งจะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และเนื่องจากการเปลี่ยนระดับพลังงานของอิเล็กตรอนในรูปแบบนี้เกิดได้ง่ายทำให้สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปลดปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดีจึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ด้านแสง (optical devices) เช่น ไดโอดเปล่งแสง และตัวตรวจจับแสง ส่วนกรณีของสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง เช่น ซิลิคอน อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟ้าไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง เพราะจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัม เพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าก่อน แล้วจึงตกลงมาสู่แถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของความร้อน ทำให้สารกึ่งตัวนำในลักษณะนี้ไม่นิยมนำมาทำเป็นอุปกรณ์ทางด้านแสง

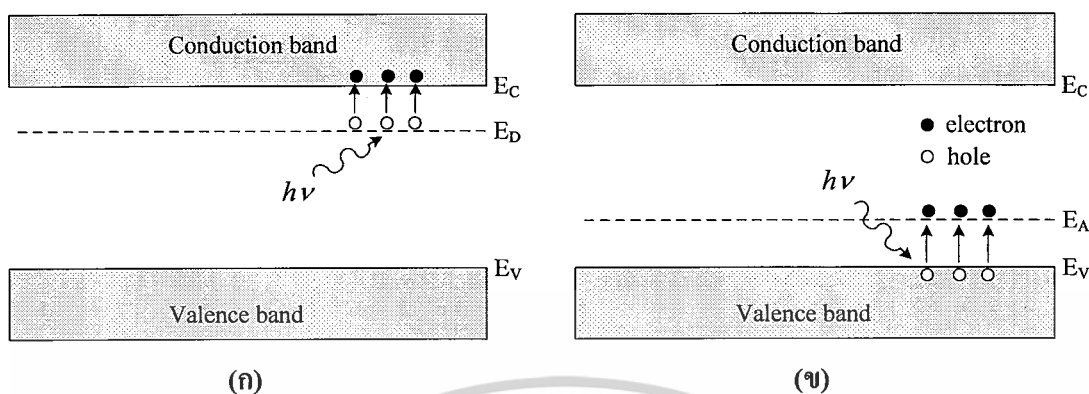
2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

กลไกการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ($> E_g$) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ($E = h\nu$) ที่มีพลังงานมากพอ ($> E_g$) ที่จะทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้นที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิก (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level : E_D) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ในส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level : E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข)



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.3 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

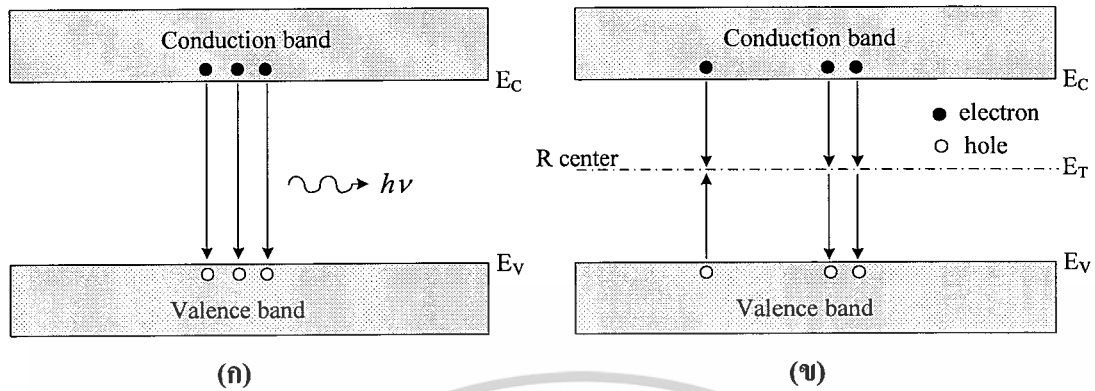
(ก) ชนิดเอ็น

(ข) ชนิดพี

2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะคือ โฮลและอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา โดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

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



รูปที่ 2.4 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ

(ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือหรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมาและอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด

2.1.3.3 อินเดียมทินออกไซด์

สารอินเดียมทินออกไซด์ (ITO) หรือที่มาจากสารอินเดียมเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) ประเภทที่มีช่องว่างแถบพลังงานกว้าง (wide band gap) มีค่าประมาณ 3.5-4.3 eV มีค่าการส่องผ่านสูงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นและค่าการสะท้อนสูงในความยาวคลื่นช่วงอินฟราเรด มีค่าการนำไฟฟ้าสูง ($2500-5000 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$) ดังนั้นจึงถูกนำมาใช้ทำการเคลือบเป็นตัวนำไฟฟ้าโปร่งใสซึ่งเป็นชั้นฟิล์มบางที่สามารถเคลือบได้โดยใช้วิธีการระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอนหรือกระบวนการสปัตเตอร์ริง อุปกรณ์ทั่วไปที่ทำแผ่นรองรับพวกพลาสติกที่เคลือบ ITO ไปใช้งานมีทั้งหน้าจอแบบสัมผัส (touch panel contact) ขั้วไฟฟ้า (electrode) ส่วนสำหรับอุปกรณ์จำพวก LCD และอุปกรณ์แสดงผลแบบอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เล็กโครโครมิก(Electrochromic display) หน้าต่างประหยัดพลังงาน,การเคลือบเพื่อสะท้อนความร้อน,ก๊าซเซินเซอร์ จะเคลือบลงบนแก้วและอื่นๆ

2.1.3.4 สมบัติของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์

สมบัติทางแสงและทางไฟฟ้าของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์มีความเชื่อมโยงอย่างมากกับตัวแปรที่ใช้ในการเคลือบฟิล์มและองค์ประกอบเริ่มต้นของสารที่นำมาเคลือบ ชั้นของฟิล์มต้องมีความหนาแน่นของประจุที่สูงเพื่อนำไฟฟ้าได้ดีโดยเฉพาะพหุอะเหล่านี้คืออิเล็กตรอนอิสระโดยค่าการนำไฟฟ้าที่สูงหรือค่าความต้านทานแบบแผ่นที่ต่ำ (low sheet resistance) คือความสมดุลกันกับความขัดแย้งของค่าการส่องผ่านที่สูงในแสงที่ตามองเห็น เนื่องจากค่าความต้านทานแบบแผ่น (sheet resistance) ที่น้อยกว่า $10 \Omega/\square$ จะมิตค่าการส่องผ่านแสงในช่วงตามองเห็น (visible transmission) $> 80\%$ แต่ถ้าต้องการที่ได้ค่าการส่องผ่านใกล้เคียง 90% จะทำให้ค่าของความต้านทานแบบแผ่นต้องมีค่า $> 100 \Omega/\square$ สมบัติอีกประการหนึ่งของฟิล์มอินเดียมทินออกไซด์คือมีพฤติกรรมแบบโลหะที่ความยาวคลื่นแสงยาว เพราะการมีค่าความยาวคลื่นพาสมาเหนือ $1 \mu\text{m}$ ซึ่งสำหรับที่มีความยาวคลื่นยาวจะทำให้ฟิล์มมีความสามารถในการสะท้อนสูง อีกประการคือการสะท้อนคลื่นความร้อนจะแปรผกผันกับค่าความต้านทานแบบแผ่นของฟิล์มจะคาดได้ว่าความต้านทานแบบแผ่นต้อง $< 30 \Omega/\square$ เพื่อให้ได้ค่าการสะท้อนความร้อน $> 80\%$ ส่วนค่าดัชนีหักเหสำหรับฟิล์มที่โปร่งใสในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็นยังคงมีค่าใกล้เคียง 1.95 และไม่ขึ้นกับตัวแปรในการเคลือบฟิล์ม ตัวแปรดัชนีหักเห โดยทั่วไปจะพิจารณาเป็นอันดับสองสำหรับอุปกรณ์นำไฟฟ้า สารอินเดียมทินออกไซด์มีค่าพื้นฐานต่างๆดังนั้นมีมวลโมเลกุลจะขึ้นกับส่วนประกอบ, จุดหลอมเหลวมีค่าประมาณ 1900 องศาเซลเซียส สีของฟิล์มที่เกิดขึ้นจะมีสีเหลืองสว่าง โดยขึ้นกับระดับการเกิดออกซิเดชันและความหนาแผ่นผลึกประมาณ 7.14 g/cc

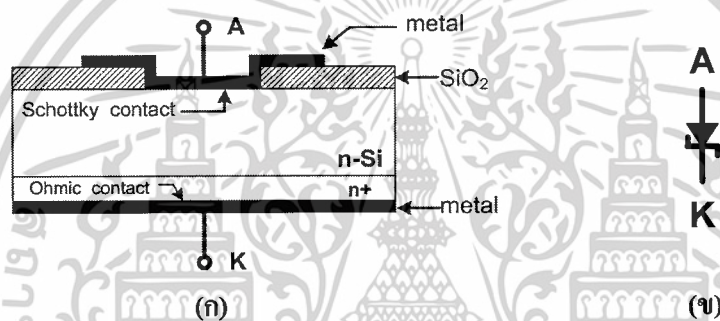
2.2 รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ

เนื่องจากตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่อยู่ในกลุ่มโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ที่ประกอบด้วย รอยสัมผัส肖ตคีย์สองรอยสัมผัสที่เชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน ดังนั้นก่อนที่จะกล่าวถึงโครงสร้าง และหลักการการทำงานของโครงสร้าง MSM ในหัวข้อนี้จึงมีความประสงค์ต้องการให้ทำความเข้าใจในหลักการพื้นฐานของโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ในลักษณะของรอยสัมผัสแบบ肖ตคีย์เสียก่อน จากนั้นจึงจะนำความรู้ที่ได้จากหัวข้อนี้ไปอธิบายเพิ่มเติมกับโครงสร้าง MSM ในหัวข้อถัดไป

รอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (metal-semiconductor contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ (1) รอยสัมผัส肖ตคีย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(schottky con-tact) หรือ เร็คติไฟร์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 และรอยสัมผัสโอห์มิก (ohmic contact) ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์ภายใน และเชื่อมต่ออุปกรณ์เข้ากับขาของตัวเก็บบรรจุ ซึ่งจะต้องมีความต้านทานต่ำมาก สำหรับรอยสัมผัสที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับฟังก์ชันงานของโลหะ (ϕ_M), ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ (ϕ_S) และอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (χ) ของสารกึ่งตัวนำที่มาสร้างเป็นรอยสัมผัส เนื่องจากเป้าหมายของปฏิยานุพันธ์ต้องการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ใช้ฐานรองชนิดคอนซิดเอ็นเท่านั้น และใช้ลูมิเนียมเป็นส่วนหนึ่งของโลหะ ซึ่งจะแสดงพฤติกรรมเป็นรอยสัมผัสช็อคกี ดังนั้นในปฏิยานุพันธ์เล่มนี้จึงจะขอกกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น (Al/n-Si) ที่ทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสแบบเร็คติไฟร์



รูปที่ 2.5 (ก) โลหะที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำ ชนิดเอ็น

(ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของรอยสัมผัสช็อคกี

2.2.1 การเกิดรอยสัมผัสเร็คติไฟร์ในภาวะสมดุล

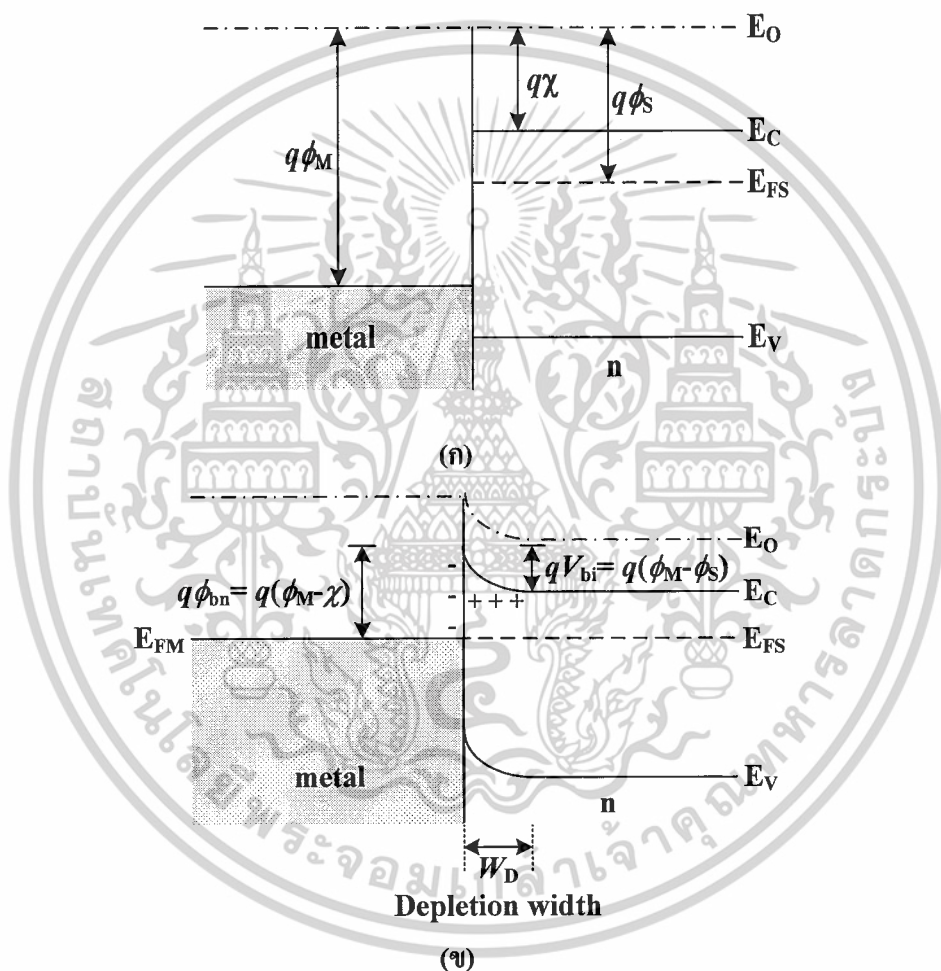
รูปที่ 2.6 แสดงการเกิดเร็คติไฟร์ของรอยสัมผัสช็อคกี โดยในรูปที่ 2.6 (ก) เป็นแถบพลังงานของ โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัส ซึ่งฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ และเมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำดังกล่าวมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล และพบว่าที่ภาวะสมดุลนี้ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ที่ระดับเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งอธิบายได้ว่าอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะ ทำให้เกิดไอออนบวกของสารเจือผู้ให้ขึ้นที่สารกึ่งตัวนำ และเกิดประจุลบขึ้นที่โลหะเป็นผล ให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นที่บริเวณรอยสัมผัส สนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นนี้มีทิศทางต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนและมีค่าเพิ่มขึ้นจนสามารถหยุดยั้งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงได้ชัดเจนจากการโค้งขึ้นของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำบริเวณรอยสัมผัสกับโลหะ ซึ่งคือการเกิดกำแพงศักย์ภายในสารกึ่งตัวนำใกล้กับโลหะ โดยกำแพงศักย์นี้มีค่าเท่ากับ

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \tag{2.3}$$

โดยที่ q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$



รูปที่ 2.6 ภาพแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ (ก) ก่อนสัมผัส (ข) ภายหลังการสัมผัสที่ภาวะสมดุลและในภาวะสมดุลจะไม่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยสัมผัสนี้

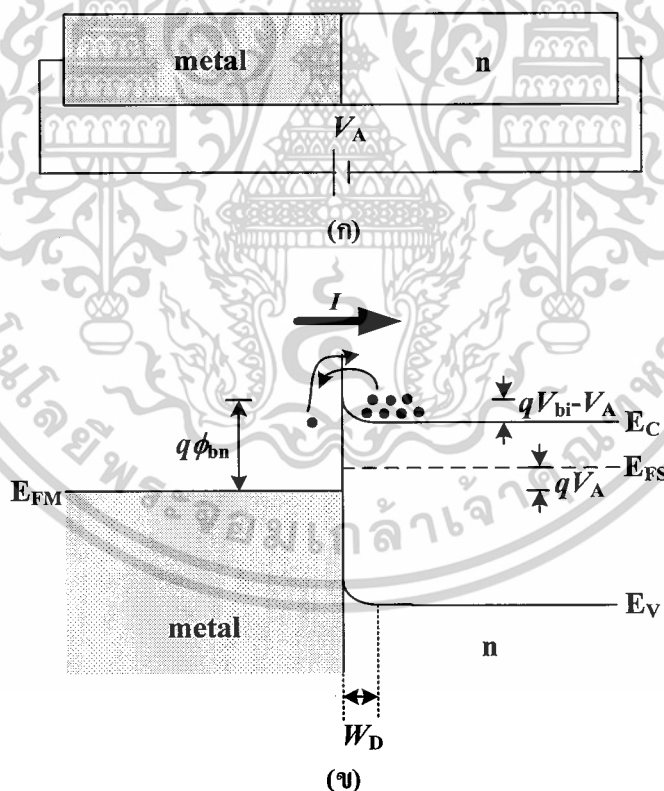
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาความสูงของกำแพงศักย์ (barrier height) ที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำชนิดอื่น จะมีค่าเท่ากับ

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.4)$$

2.2.2 การทำงานของรอยสัมผัสแบบเรกติไฟรี่

การทำงานของรอยสัมผัสแบบเรกติไฟรี่แบ่งออกได้เป็น 2 แบบ คือ การให้แรงดันไบอัสตรง และการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ในรูปที่ 2.7 (ก) เป็นการให้แรงดันไบอัสตรง (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้แรงดันบวกเข้าที่ขั้วอานอดและแรงดันลบเข้าที่ขั้วคาโทด แถบพลังงานเมื่อให้ไบอัสตรงจะทำให้กำแพงศักย์มีค่าลดลงเท่ากับ $(V_{bi} - V_A)$ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) ดังนั้นกระแสที่ได้ (I_F) จากการให้แรงดันไบอัสตรงจะมีค่าเท่ากับ



รูปที่ 2.7 (ก) การให้แรงดันไบอัสตรงแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟรี่

(ข) แถบพลังงานเมื่อให้แรงดันไบอัสตรงแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟรี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$I_F = I_s \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.5)$$

โดยที่ I_s คือ กระแสย้อนกลับอิ่มตัว (A)

และ

$$I_s = AA^{**}T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.6)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)

A^{**} คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (Richardson constant) ของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ $110 \text{ Acm}^{-2} \text{ K}^{-2}$ [22]

k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

ในทางตรงกันข้ามการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (V_R) แก่รอยสัมผัสแบบเร็คติไฟร์ โดยให้แรงดันบวกเข้าที่ขั้วคาโทดและแรงดันลบเข้าที่ขั้วอโนด ดังรูปที่ 2.8 (ก) แลพบพลังงานเมื่อให้ไบอัสกลับจะทำให้ค่าของค่าแพนดักซ์มีค่าเพิ่มขึ้นเท่ากับ $(V_{bi} + V_A)$ ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากแถบพลังงานในรูปที่ 2.8 (ข) ซึ่งการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับทำให้สนามไฟฟ้าในส่วนของสารกึ่งตัวนำใกล้กับโลหะมีค่าสูง และทำหน้าที่ต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามไปได้ แต่จะมีค่าของกระแสส่วนน้อยๆ ที่สามารถไหลได้ที่เรียกว่า กระแสย้อนกลับอิ่มตัว (saturation current : I_s) หรือ กระแสรั่วไหล (leakage current : I_R) และมีค่าตามสมการที่ (2.7) คือ

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.7)$$

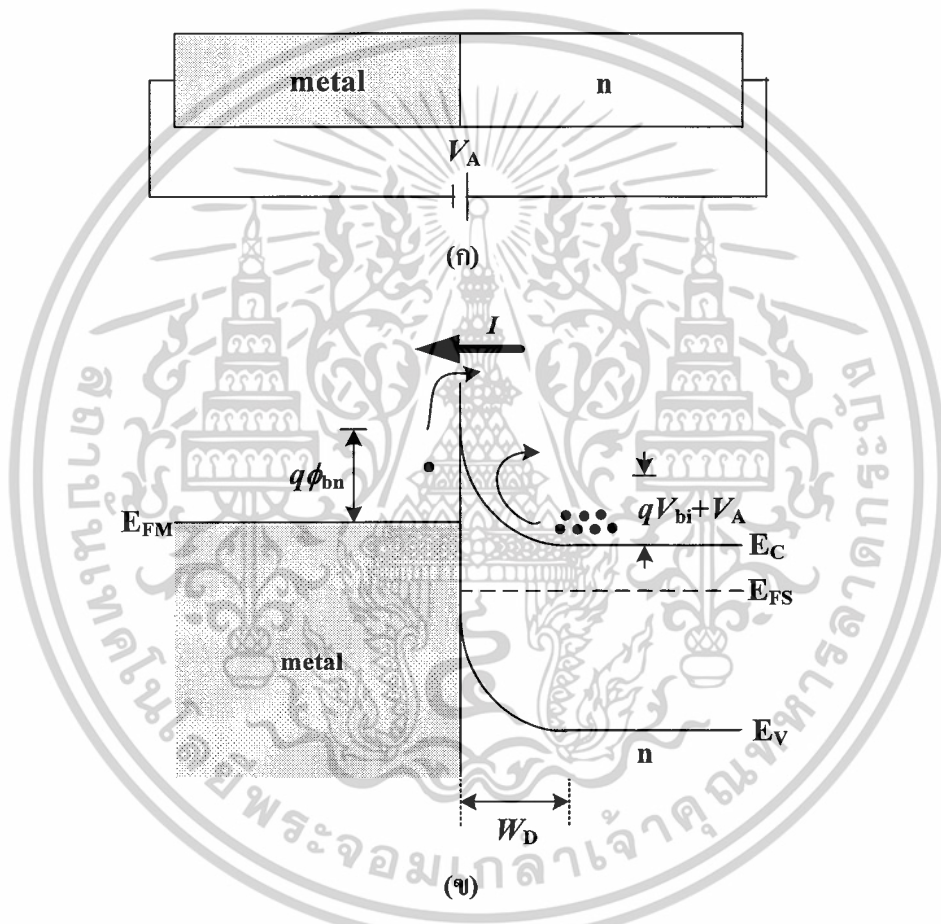
จากการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับนี้จะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น (depletion width : W_p) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2.8) คือ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.8)$$

โดยที่ ϵ_s คือ เปรอร์มิติวิตีของสารกึ่งตัวนำของซิลิคอนมีค่าเท่ากับ $11.8 \epsilon_0$ (F/cm)

ϵ_0 คือ เปรอร์มิติวิตีในสุญญากาศ มีค่าเท่ากับ 8.854×10^{-14} (F/cm)

N_D คือ ความเข้มข้นของอะตอมสารเจือผู้ให้ (cm^{-3})



รูปที่ 2.8 (ก) การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์

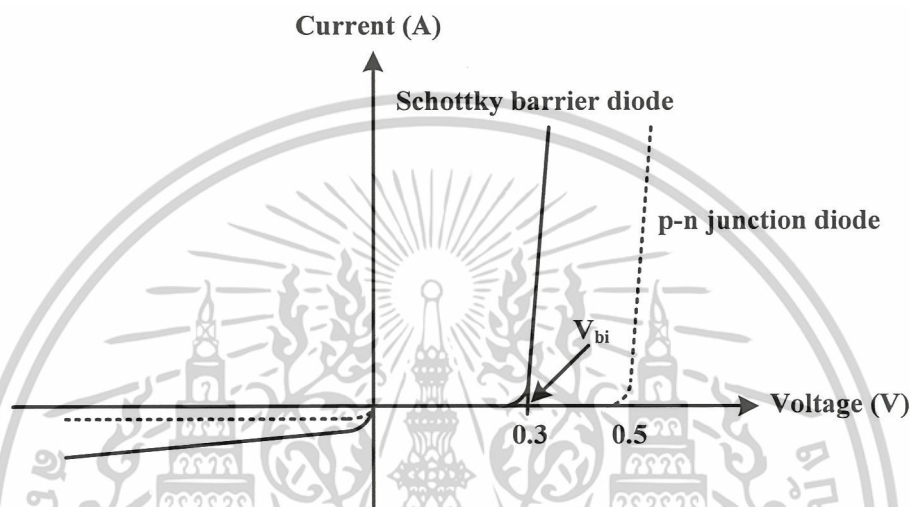
(ข) แถบพลังงานเมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์

2.2.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสแบบเรกติไฟร์ ซึ่งจะคล้ายกับรอยต่อ พี-เอ็น คือ ยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว เมื่อได้รับการให้ไบอัสตรง แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก (กระแสรั่วไหล) ดังแสดงในรูปที่ 2.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พบว่าแรงดันภายใน (built-in voltage : V_{bi}) ของรอยสัมผัสช็อคกีมีค่าต่ำกว่าไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น โดยมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V ส่วนรอยต่อ พี-เอ็น จะมีค่าประมาณ 0.5-0.7 V แต่กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคกีมีค่าสูงกว่ารอยต่อ พี-เอ็น เป็นผลมาจากผิวสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ โดยจะมีค่ากระแสรั่วไหลมากกว่ารอยต่อ พี-เอ็น ประมาณ 10^4 เท่า



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัสช็อคกีและไดโอดแบบรอยต่อ พี-เอ็น

2.3 โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

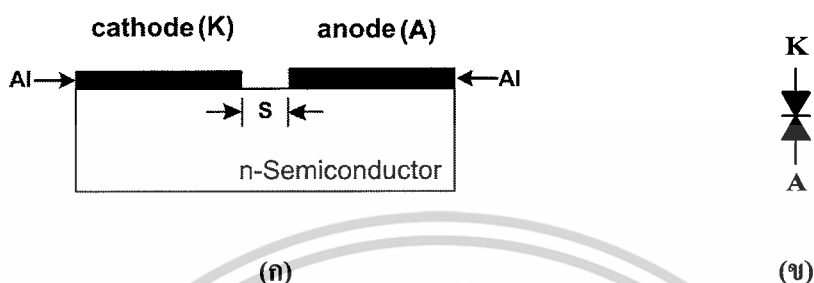
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ ดังแสดงใน รูปที่ 2.10 (ก) จะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำชนิด n โดยมีระยะ S เป็นระยะห่างระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง รอยสัมผัสของโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่เกิดขึ้นจะแสดงสมบัติของรอยสัมผัสช็อคกี จึงอาจกล่าวได้ว่ารอยสัมผัสของขั้วไฟฟ้าทั้งสองเป็นรอยสัมผัสช็อคกี 2 รอยสัมผัสที่ต่อแบบหันหลังชนกัน สำหรับในรูปที่ 2.10 (ข) เป็นสัญลักษณ์ทางไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ ที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ (1) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้า (S) มีขนาดกว้าง และ (2) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้น ซึ่งความหมายของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ โครงสร้าง MSM ที่ได้รับการ

104247

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไบอัสด้วยแรงดันที่เหมาะสมกับการใช้งาน (เช่น ให้ $V_{\text{bias}} = 10 \text{ V}$) แล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้นกับรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ที่ได้รับการต่อแบบไบอัสย้อนกลับ ในขณะเดียวกันยังคงเหลือส่วนบริเวณที่เป็นกลาง



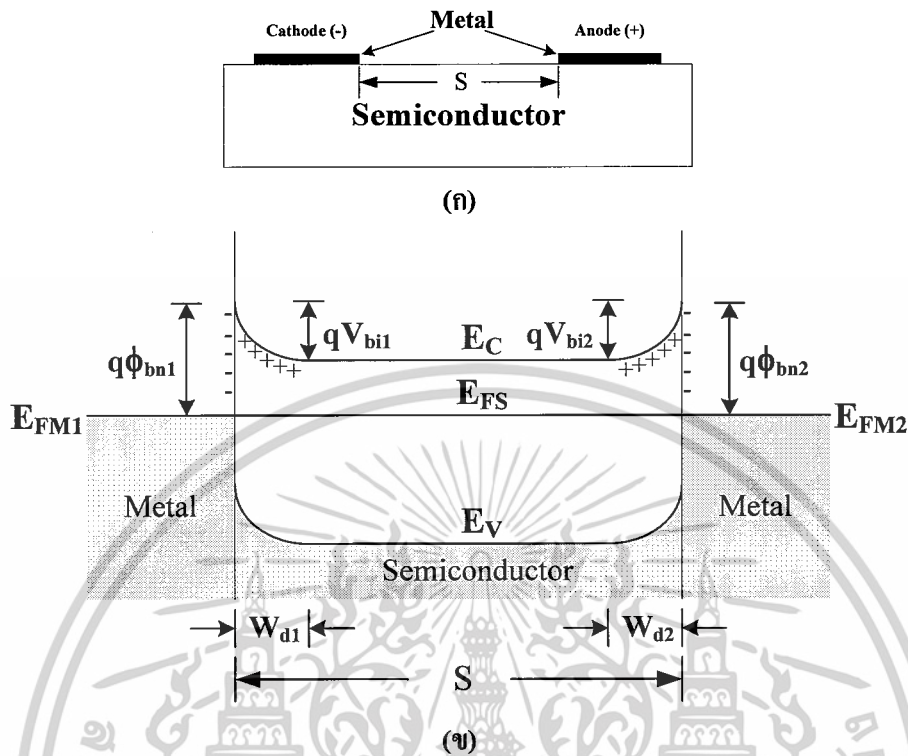
รูปที่ 2.10 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM

(ข) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM

เรียกว่า บริเวณนิวทรัล (neutral region) ระหว่างบริเวณปลอดพาหะกับรอยสัมผัสชนิดกึ่งที่ที่ได้รับการต่อแบบไบอัสตรง จากโครงสร้าง MSM แบบนี้ พบว่ากระแสแสงจะเกิดขึ้นสองส่วนเป็นกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ (I_c) และ กระแสแสงโฟโตไดโอด (I_D) จึงทำให้เกิดจุดเด่น คือ สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน ในทางกลับกันโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นจะหมายถึง โครงสร้าง MSM ที่ได้รับการไบอัสแล้วบริเวณปลอดพาหะจะครอบคลุมช่องรับแสง (ระยะห่าง S) ทั้งหมด (ไม่มีบริเวณนิวทรัล) ซึ่งมีจุดเด่นตรงที่ได้รับความนิยมมากขึ้น ในขณะเดียวกันจะได้รับการตอบสนองความถี่เพิ่มขึ้น ด้วยแต่โครงสร้างแบบนี้จะไม่สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน โดยในส่วนของทฤษฎีจากนี้ไปจะกล่าวถึง โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง และ MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นดังนี้

2.3.1 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ในภาวะสมดุล

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



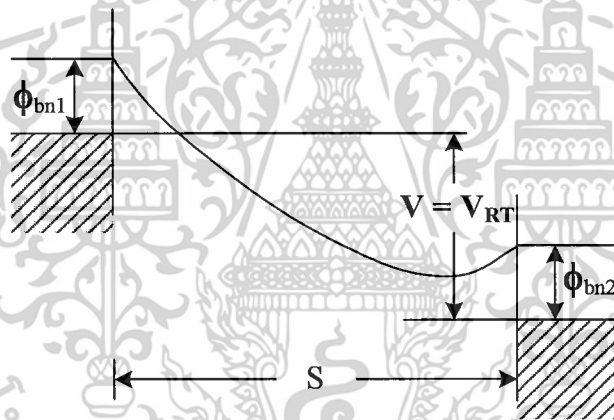
รูปที่ 2.11 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

แถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในสภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.11 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสช็อคติย์คิงที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดมักเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อคติย์ของขั้วแคโทด (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

2.3.2 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างขณะได้รับแรงดันไบอัส

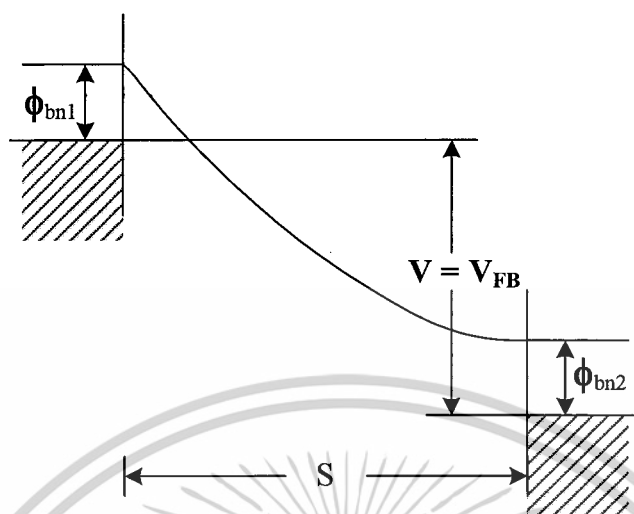
เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่รอยสัมผัสทั้งสอง ในที่นี้จะให้แรงดันไบอัสบวกเข้าที่ขั้วแอโนด และแรงดันไบอัสลบเข้าที่ขั้วแคโทด ดังนั้นรอยสัมผัสด้านแอโนดจึงเป็นลักษณะของการให้ไบอัสตรง ส่วนรอยสัมผัสด้านแคโทดจะเป็นลักษณะของการให้ไบอัสย้อนกลับ สำหรับโครงสร้าง MSM โดยทั่วไปที่มักสร้างให้ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดแคบมากๆ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

ช่วงที่ 1 เป็นช่วงแรงดันต่ำ ($V \leq V_{RT}$) โดยให้แรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะทั้งสองมีค่ากว้างขึ้น จนในที่สุดมาถึงที่แรงดันริช-ทรูธ (reach-through voltage : V_{RT}) ซึ่งบริเวณปลอดพาหะทั้งสองข้างจะสัมผัสกัน ทำให้ผลรวมของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีค่าเท่ากับระยะห่าง S ดังแสดงในรูปที่ 2.12



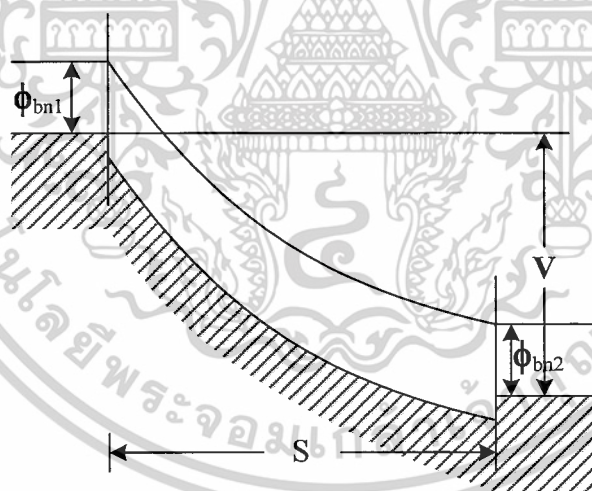
รูปที่ 2.12 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันริช-ทรูธ (V_{RT})

ช่วงที่ 2 เป็นช่วงแรงดันระหว่างแรงดันริช-ทรูธถึงแรงดันแฟลต-แบนด์ ($V_{RT} < V \leq V_{FB}$) โดยให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นอีกจนทำให้สนามไฟฟ้าที่รอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าเป็นศูนย์ ซึ่งทำให้แถบพลังงานที่รอยสัมผัสด้านแอโนดมีลักษณะแบนราบ ซึ่งคือ เงื่อนไขของแฟลต-แบนด์ ที่จุดนี้เรียกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์ (flat-band voltage : V_{FB}) แสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสเท่ากับแรงดันแฟลต-แบนด์ (V_{FB})

ช่วงที่ 3 เป็นช่วงแรงดันที่มากกว่า V_{FB} ($V > V_{FB}$) เมื่อให้แรงดันไบอัสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์พบว่า แถบพลังงานจะโค้งงอมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของ โครงสร้าง MSM เมื่อให้ไบอัสมากกว่าแรงดันแฟลต-แบนด์ (V_{FB})

แต่ใน โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง ซึ่งเป็น โครงสร้างแบบที่ใช้ ในปริยญาณินพจน์นี้ พบว่าโครงสร้าง MSM จะมีการทำงานอยู่ในช่วงที่ 1 เท่านั้นเนื่องจากระยะห่าง ระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง จึงทำให้แรงดันริช-ทรูซมีค่าสูงกว่าแรงดันพังทลายของ โครงสร้าง MSM แรงดันไบอัสที่ป้อนระหว่างขั้วแคโทดและขั้วแอนโนด จะถูกแบ่งตกคร่อมรอยสัมผัสทั้ง 2 ด้าน โดยแรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัสช้อตก็ย์ด้านแคโทดเป็น V_1 ส่วนแรงดันที่ตกคร่อมรอยสัมผัสช้อตก็ย์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านแอโนดเป็น V_2 ที่รอยสัมผัสด้านแคโทดจะเกิดลักษณะไบอัสย้อนกลับ โดยกำแพงศักย์ภายในมีค่าสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ และทำให้บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) ขยายตัวกว้างขึ้นดังสมการที่ 2.9

$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_1)}{qN_D}} \quad (2.9)$$

ส่วนที่รอยสัมผัสด้านแอโนด กำแพงศักย์ภายในมีค่าลดลงเป็น $V_{bi} - V_2$ และบริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด (W_A) มีขนาดแคบลง ดังสมการที่ 2.10

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_2)}{qN_D}} \quad (2.10)$$

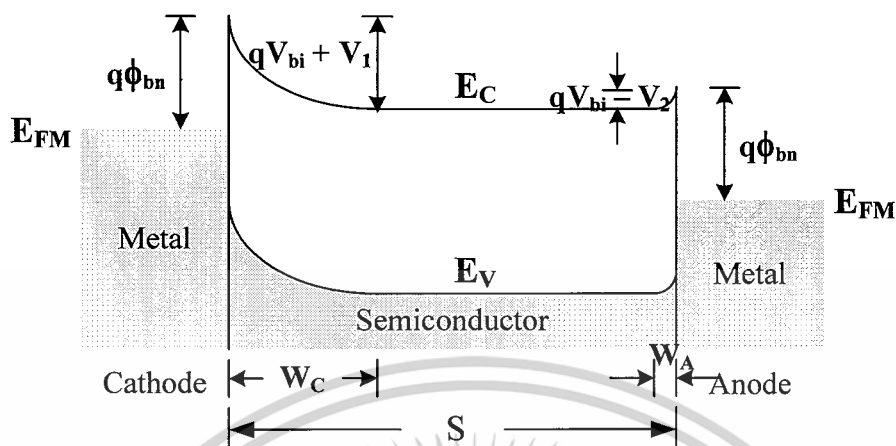
โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มีตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

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 ทำให้แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง มีลักษณะดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้าง เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

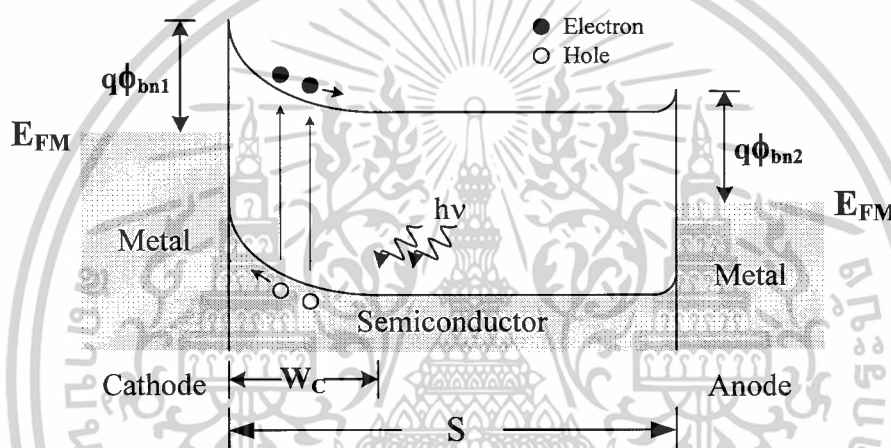
โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.15 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_1)$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์หรือตกไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำจึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโครงสร้าง MSM โดยกระแสมืดของโครงสร้าง MSM จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก

ซึ่งความกว้างบริเวณหลอดพาหะของโครงสร้าง MSM กรณีที่ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดมีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้มีความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณหลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้าน

เดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณปลดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะได้อธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

2.3.3 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ขณะได้รับแสงตกกระทบ

โครงสร้าง MSM สามารถใช้ทำหน้าที่ตรวจจับแสงได้เช่นเดียวกับโฟโตไดโอดชนิดอื่นๆ ซึ่งในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึงกลไกการเกิดกระแสแสงในโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM



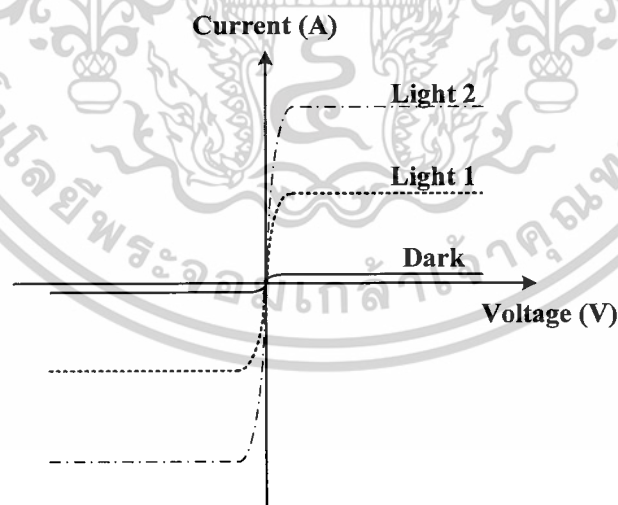
รูปที่ 2.16 แถบพลังงานของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับ โฟตอนและมีแสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรดทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของโฟโตไดโอดภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.16 เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่อิเล็กตรอนนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นเดียวกับในบริเวณปลดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบและมีกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือป

ระจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุด จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล

2.3.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ในรูปที่ 2.17 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ ได้รับ โวลต์ตรงและด้านที่ ได้รับ โวลต์ย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบบมีความเข้มแสงมากขึ้น

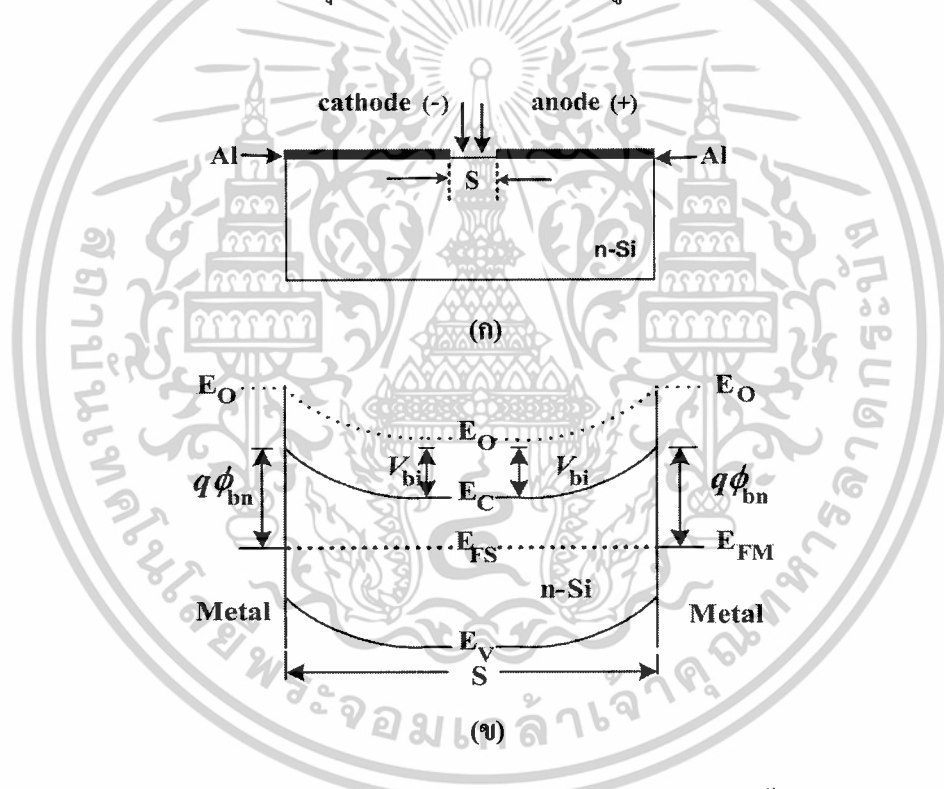


รูปที่ 2.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.5 โครงสร้างของ MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้น ในภาวะสมดุลความร้อน

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้น ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสองรอยสัมผัส โดยมีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง หรือระยะห่างขั้วไฟฟ้า เป็นส่วนแยกรอยสัมผัสทั้งสองของโครงสร้าง MSM โดยที่ระยะระหว่างขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นซิลิคอนจะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าขนาดโดยทั่วไปของระยะห่างขั้วไฟฟ้าแบบสั้น S จะมีค่าน้อยกว่า $4 \mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ก) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในภาวะสมดุลความร้อน จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยมีค่าที่เท่ากันเนื่องจากโครงสร้างเป็นแบบสมมาตร และใช้วัสดุชนิดเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.18 (ข)



รูปที่ 2.18 (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้น
(ข) แถบพลังงานในภาวะสมดุลความร้อน

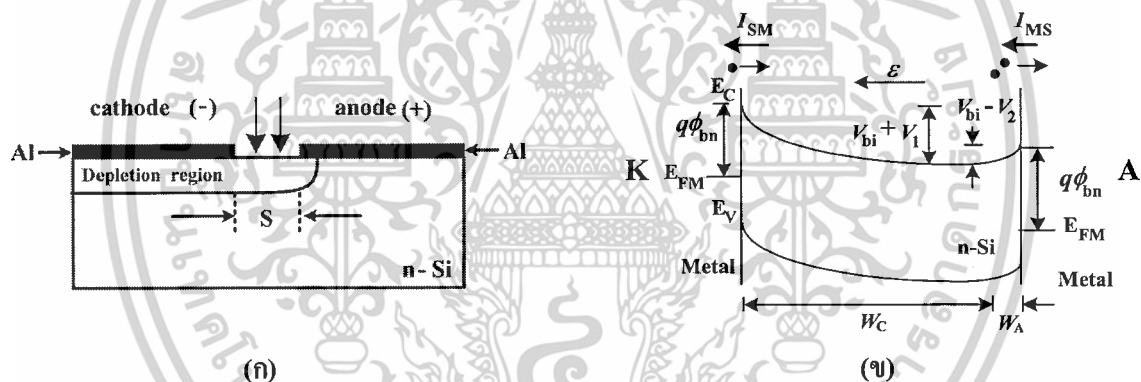
2.3.6 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นขณะได้รับแรงดันไบอัส

โฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับการไบอัส โดยให้แรงดันบวกที่ขั้วแอนอด (A) และแรงดันลบที่ขั้วแคโทด (K) ดังแสดงในรูปที่ 2.19 จะเห็นได้ว่าบริเวณปลอดพาหะของรอยสัมผัสชนิดกึ่งทางด้านแคโทด (W_C) มีขนาดกว้างขึ้น เนื่องจากได้รับการไบอัสย้อนกลับ ในขณะที่บริเวณ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปลดพาหะทางด้านแอนโนด (W_A) กลับมีขนาดลดลงจากการไบอัสตรง สำหรับด้านที่ได้รับไบอัสย้อนกลับจะมีค่าของกำแพงศักย์เพิ่มขึ้นเท่ากับ $V_{bi} + V_A$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เข้าไปในด้านที่เป็นสารกึ่งตัวนำ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ส่วนด้านที่ได้รับการไบอัสตรงจะมีค่าของกำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_A$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงพร้อมที่เคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านคาโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current) ของโครงสร้าง MSM

ถึงแม้ว่าจะให้แรงดันไบอัสสลับกันจากที่อธิบายไว้ข้างต้น แต่ผลลัพธ์ที่ได้ยังคงเหมือนกัน เพราะที่ขั้วแอนโนดจะได้รับไบอัสย้อนกลับ ส่วนที่ขั้วคาโทดจะเป็นไบอัสตรง ซึ่งเป็นข้อดีอีกประการหนึ่งของ



รูปที่ 2.19 แถบพลังงานหลังจากได้รับแรงดันไบอัส

โครงสร้าง MSM จึงง่ายที่จะออกแบบร่วมกับวงจรรวม เพราะไม่ต้องคำนึงถึงเรื่องการให้ไบอัสแก่ขั้วไฟฟ้า ซึ่งต่างจากตัวตรวจจับแสงแบบรอยต่อทั่วไปที่จะต้องมีความระมัดระวัง โดยต้องกำหนดให้การไบอัสที่ขั้วไฟฟ้าเป็นการต่อไบอัสแบบย้อนกลับเสมอ

แต่โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้น เมื่อทำการให้ไบอัสจนทำให้บริเวณปลดพาหะของรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำขั้วคาโทด (ได้รับไบอัสย้อนกลับ) ขยายออกไปจนเต็มบริเวณช่องรับแสง อาจทำให้กระแสสามารถไหลได้เป็นจำนวนมาก

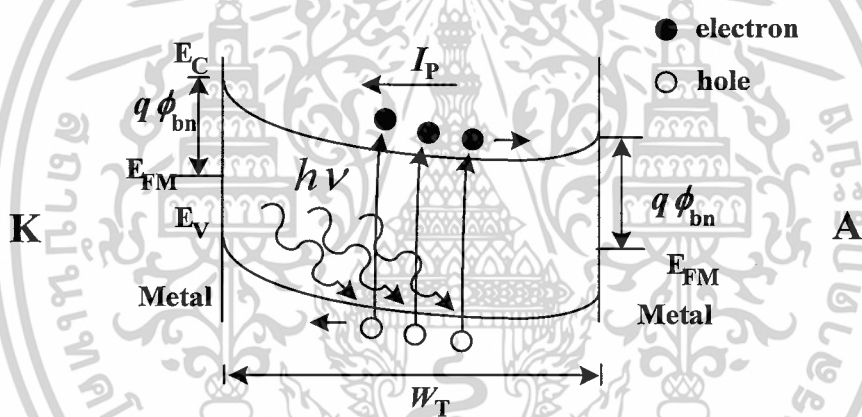
2.3.7 โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้น ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้าง MSM ได้รับแสงแล้ว จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยที่อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ตรงข้ามกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วคาโทด ส่วนโฮลจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกันกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ดังแสดงในรูปที่ 2.20 ส่งผลให้เกิดกระแสไฟฟ้าไหลออกไปภายนอกอุปกรณ์ โดยกระแสแสง (I_p) ของโครงสร้าง MSM มีค่าดังสมการที่ (2.11)

$$I_p = I_{\text{mea}} - I_{\text{dark}} \quad (2.11)$$

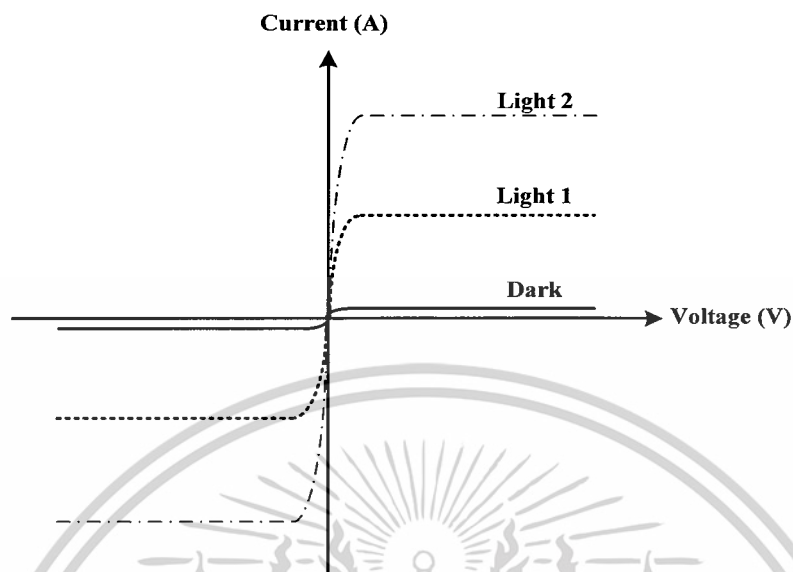
โดยที่ I_{mea} คือ กระแสที่วัดได้จากการทดลอง

I_{dark} คือ กระแสรั่วไหล หรือกระแสมืดของโครงสร้าง MSM



รูปที่ 2.20 แถบพลังงานภายหลังจากที่ได้รับแสงตกกระทบ

ในรูปที่ 2.21 เป็นลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM ที่ได้รับแสงตกกระทบบนช่องรับแสงของโครงสร้าง MSM แบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำที่หันหลังชนกัน ทำให้ลักษณะสมบัติของ MSM มีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับแสงตรงและด้านที่รับแสงย้อนกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบมีความเข้มแสงมากขึ้น



รูปที่ 2.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ โครงสร้าง MSM เมื่อ ได้รับแสงตกกระทบ

2.3.8 ประสิทธิภาพควอนตัม สภาพการตอบสนอง และผลตอบสนองต่อสเปกตรัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency : η) หมายถึง จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบสารกึ่งตัวนำก่อนที่จะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสออกสู่จรรยาภายนอก แบ่งได้เป็น ประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency : η_{inc}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นในชั้นสารกึ่งตัวนำทั้งหมดต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency : η_{ext}) คือ จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นและทำให้เกิดเป็นกระแสแสงต่อจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ ดังนั้นจึงต้องรวมผลของการสะท้อนและค่าคงที่การดูดกลืนของสารกึ่งตัวนำ (α) ด้วย โดยทั่วไปเมื่อกล่าวถึงประสิทธิภาพควอนตัมจะหมายถึงประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2.12) คือ

$$\eta = \frac{I_p/q}{P_{inc}/h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{inc}} \tag{2.12}$$

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

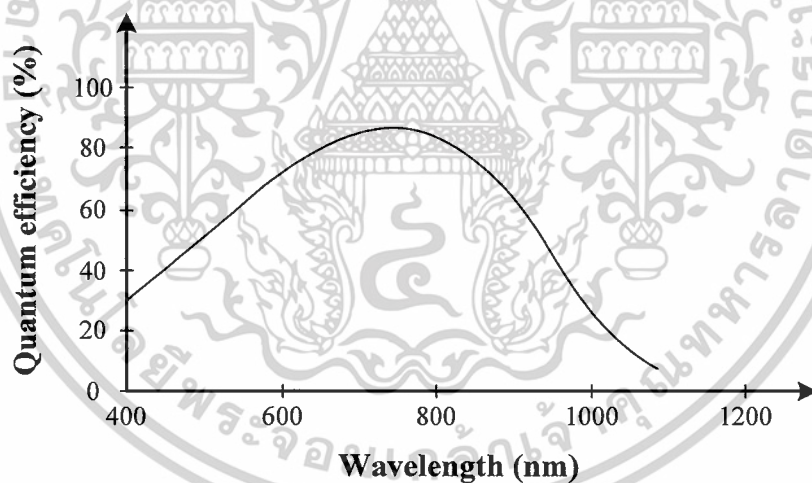
v คือ ความถี่ของคลื่น

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

สภาพการตอบสนอง (responsivity ; \mathcal{R}) หมายถึง กระแสแสงที่เกิดขึ้นต่อกำลังของแสงที่ตกกระทบ ซึ่งมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพควอนตัม สามารถหาได้จากสมการที่ (2.13) คือ

$$\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc} \quad (2.13)$$

จากสมการที่ (2.13) พบว่า ค่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน



รูปที่ 2.22 ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของซิลิคอนโฟโตไดโอด

ผลตอบสนองของสเปกตรัมของแสง หมายถึง คุณสมบัติในการรับหรือดูดกลืนโฟตอนที่ความยาวคลื่นต่างๆ ความยาวคลื่นที่ต่างกันจะทำให้กระแสแสงมีค่าต่างกัน ผลตอบสนองจะลดลงอย่างรวดเร็วเมื่อโฟตอนที่ตกกระทบมีความยาวคลื่นมากขึ้นและมีพลังงานน้อยกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ เนื่องจากโฟตอนมีพลังงานไม่มากพอที่จะทำให้อิเล็กตรอนเปลี่ยนระดับพลังงานจากแถบวาเลนซ์ไปแถบนำไฟฟ้า เมื่อความยาวคลื่นลดลงค่าคงที่ในการดูดกลืนแสงเพิ่มมากขึ้นจึงทำให้เกิดการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คูคกัสนโปกตอนเจพาะบรเวณผวของสารกัองั่ววนำซึ่งจะเกดประกฤการณัรวมตัวที่ผวทำใหผลตอบสนองของโปกโตดีเทคเตอร์ลดลงเมือความยาวคูลนลดลง ผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงในสารกัองั่ววนำแต่ละชนดมีค่าแตกต่างกัน สำหรัโปกโตดีเทคเตอร์ที่สร้างจากซิลิกอนจะมีผลตอบสนองต่อสเปกตรัมของแสงดังรูปที่ 2.22

จากรูปที่ 2.22 จะพบว่าประสิทธิภาพควอนตัมมีการเปลี่ยนแปลง ตามความยาวคูลนโดยมีผลตอบ สนองสูงสุดอยู่ในช่วงใกล้อินฟราเรด (near infrared) และการตอบสนองจะลดลงเมือความยาวคูลนเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากช่องว่างพลังงานของซิลิกอนมีค่าเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นความยาวคูลนสูงสุดที่สารกัองั่ววนำซิลิกอนจะสามารถตอบสนองได้คือ 1110 nm



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

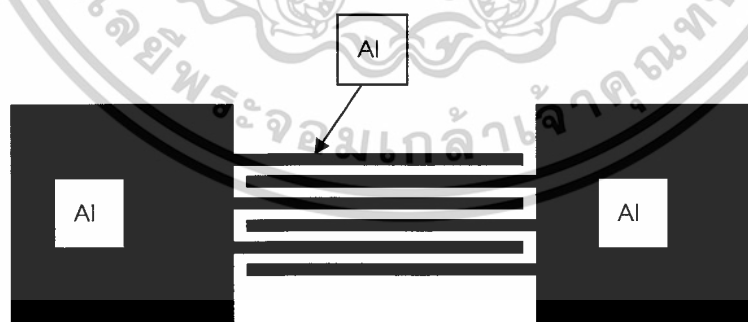
การออกแบบและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง

ในการทดลองนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าที่ต่างชนิดกัน คือขั้วไฟฟ้าที่สร้างจากอลูมิเนียม (Al/n-Si/Al) และ อินเดียมทินออกไซด์ (ITO/n-Si/ITO) ซึ่งในกรณีของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รูปแบบ Al/n-Si/Al นั้นจะสร้างเป็นแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น กับแบบระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง และ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รูปแบบ ITO/n-Si/ITO นั้นจะทำการสร้างให้มีลักษณะมีขั้วไฟฟ้ากว้าง โดยทำการออกแบบให้มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล โดยมีลักษณะโครงสร้างและกระบวนการสร้างดังต่อไปนี้

3.1 โครงสร้างและการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียม-ซิลิคอนจำนวนสองรอยสัมผัส ซึ่งวัสดุทั้งสองหาสามารถได้ง่ายและยังเป็นวัสดุที่สำคัญในการสร้างวงจรรวม โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน (resistivity) 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งเมื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสกับโลหะอลูมิเนียมจะทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบจ็อกกี้

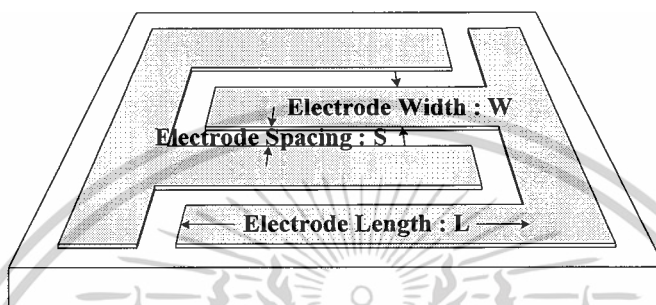
โครงสร้างอินเตอร์ดิจิตัลมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.1 จะเห็นได้ว่าเป็นลักษณะของซี่คล้ายส้อม (fork shape) หรือ นิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้าน



รูปที่ 3.1 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในโครงสร้างอินเทอร์ดิเจิตที่มีตัวแปรกำหนดขนาดที่สำคัญ 3 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (S) ความกว้างขั้ว (W) และความยาวขั้วไฟฟ้า (L) ดังรูปที่ 3.2 โดยในการทดลองนี้จะทำการออกแบบให้มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ 2, 3, 10, 20 μm ความกว้างขั้ว 20 μm ความยาวขั้วไฟฟ้า 1 μm



รูปที่ 3.2 ตัวแปรกำหนดขนาดของโครงสร้างอินเทอร์ดิเจิต

3.2 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเทอร์ดิเจิต จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมซึ่งใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลังจากขั้นตอนการออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบ (mask) แล้วจึงจะเริ่มกระบวนการสร้าง โดยใช้แผ่นผลึกซิลิกอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพต้านทาน 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร มาเข้าสู่กระบวนการสร้าง เริ่มจาก

3.2.1 ทำความสะอาดแผ่นซิลิกอนเบื้องต้น

- อุลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water : DI) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.2.2 กระบวนการออกซิเดชัน

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) ให้ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา 4000 Å โดยให้แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ 1100 °C เสร็จสิ้นและกระบวนการสร้างดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา ครึ่งชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาาที
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา ครึ่งชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100cc/นาาที
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาาที

3.2.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 1

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000รอบ/นาาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 1 ด้วยเครื่องปรับช้อนมาสก์ (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 10 วินาที
- จุ่มลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาจุ่มลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นซิลิโคนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสง โดยการจุ่มใน สารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₃F ในอัตราส่วน 1 : 6) อัตราการสกัดชั้นซิลิโคนไดออกไซด์ 1000 Å/นาที เป็นเวลาประมาณ 5 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.2.4 กระบวนการเคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

เคลือบผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิโคนด้วยฟิล์มโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

3.2.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 2

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 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 โดยจุ่มลงในสารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ ประมาณ 40 °C ใช้เวลาประมาณ 10-20 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกฟิล์มน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน 2 แก้วๆ ละ 1 นาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.2.6 กระบวนการซินเตอร์ริง

กระบวนการซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการทางความร้อนที่ทำให้รอยสัมผัสของอลูมิเนียมและซิลิคอนสมบูรณ์ขึ้น ด้วยการนำชิ้นงานไปไว้ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนที่อุณหภูมิ 500 °C โดยมีอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน 1000 cc/นาที เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งเป็นเงื่อนไขของเวลาที่ทำให้ได้รอยสัมผัสที่ดีและมีกระแสรั่วไหลต่ำ

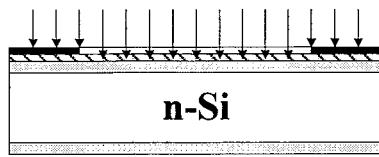
กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al สรุปได้ดังรูปที่ 3.3

n-Si

แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

n-Si

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 1



สัปดาห์ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์



เคลือบโลหะอลูมิเนียม



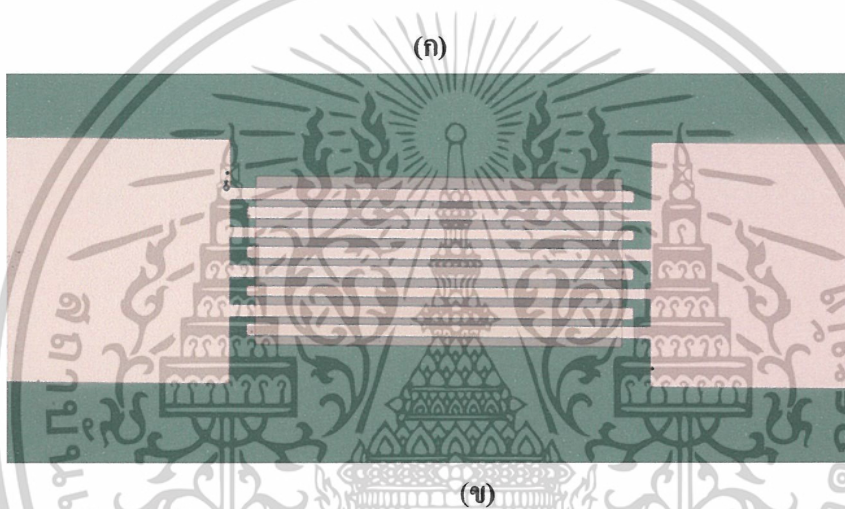
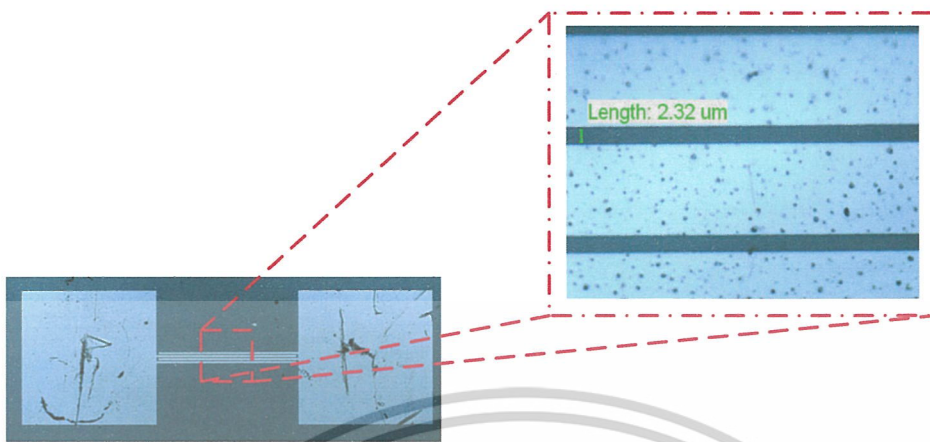
กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 2



สัปดาห์ชั้นอลูมิเนียมและซินเตอร์ริง

รูปที่ 3.3 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้น

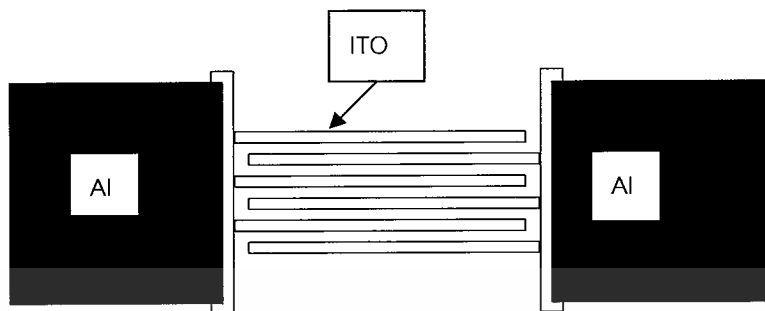
(ก) ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าแบบสั้น

(ข) ตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง

3.3 โครงสร้างและการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด ITO/n-Si/ITO ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่าง ITO/n-Si/ITO จำนวนสองรอยสัมผัส ซึ่ง ITO เป็นวัสดุที่โปร่งใส แสงทะลุผ่านได้ โดยเลือกใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทาน (resistivity) 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร ซึ่งเมื่อสร้างเป็นรอยสัมผัสกับโลหะ ITO จะทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสแบบช็อคกี

โครงสร้างอินเทอร์ดิฟิเคชันมีลักษณะเป็นดังรูปที่ 3.5 จะเห็นได้ว่าเป็นลักษณะของซี่คล้ายส้อม (fork shape) หรือ นิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้าน



รูปที่ 3.5 ลักษณะของขั้วไฟฟ้าโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตของ ITO

ภายในโครงสร้างอินเตอร์ดิจิตมีตัวแปรกำหนดขนาดที่สำคัญ 3 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว (S) ความกว้างขั้ว (W) และความยาวขั้วไฟฟ้า (L) ดังรูปที่ 3.5 โดยในการทดลองนี้จะทำการออกแบบให้มีค่าระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากับ $20\ \mu\text{m}$ ความกว้างขั้ว $20, 40, 60, 80\ \mu\text{m}$ ความยาวขั้วไฟฟ้า $1\ \mu\text{m}$

3.4 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัด โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิจิต จะใช้เทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมซึ่งใช้ในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ โดยหลังจากขั้นตอนการออกแบบและการสร้างกระจกต้นแบบ (mask) แล้วจึงจะเริ่มกระบวนการสร้าง โดยใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็็น ระนาบ (100) สภาพต้านทาน 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร มาเข้าสู่กระบวนการสร้าง เริ่มจาก

3.4.1 ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเบื้องต้น

- อุลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water : DI) เป็นเวลา 5 นาทีเพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- 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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

3.4.2 กระบวนการออกซิเดชัน

สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยวิธีการเทอร์มอลออกซิเดชัน (thermal oxidation) ให้ได้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่มีความหนา $\approx 4000 \text{ \AA}$ โดยให้แผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ในบรรยากาศของก๊าซออกซิเจนที่อุณหภูมิ $1100 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เงื่อนไขและกระบวนการสร้างดังนี้

- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบชื้นเป็นเวลา ครึ่งชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที
- ทำการออกซิเดชันแบบแห้งเป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราการไหลของก๊าซออกซิเจน 1100 cc/นาที

3.4.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี มาร์กที่ 1

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 45 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ ที่ความเร็ว 3000 รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่ 1 ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาสก์ (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 10 วินาที
- ชื่นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาขี้นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อเปิดเป็นพื้นที่รับแสง โดยการจุ่มในสารละลายบัฟเฟอร์ (HF : NH₄F 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

3.4.4 นำมาเข้ากระบวนการโฟโตลิโทกราฟีมาร์กที่ 2 สำหรับกระบวนการลิฟออฟอินเดียมทินออกไซด์ (ITO)

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 45 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (PFI 34 A) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 500 รอบ/นาทีเป็นเวลา 5 วินาทีและ 3000 รอบ/นาทีเป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 45 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่อง Mask aligner เป็นเวลา 30 วินาที
- การจุ่มลวดลาย (develop)
- จุ่มใน developer 2 แก้วเป็นเวลา 40 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.4.5 เคลือบฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์ด้วยวิธีการสปัตเตอร์ให้มีความหนาฟิล์มประมาณ

500 Å

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.6 นำมาลฟออฟฟิล์มบางอินเดียมทินออกไซด์

- จุ่มใน Acetone แก้วที่1 เป็นเวลา 1 นาที
- จุ่มใน Acetone แก้วที่2 เป็นเวลา 1 นาที
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่1
- จุ่มในน้ำบริสุทธิ์แก้วที่2
- ป่าแห้งด้วย N2

4.4.7 เคลือบฟิล์มโลหะอลูมิเนียม

- เคลือบผิวหน้าของแผ่นสไลด์ด้วยโลหะอลูมิเนียม โดยเทคนิคการเคลือบโลหะในสุญญากาศ (vacuum evaporation) ที่ความดันประมาณ 2×10^{-6} Torr

4.4.8 ทำการโฟโตลิโธกราฟีมาร์กที่ 3

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก (AZ P1350) ด้วยเครื่องสปินเนอร์ที่ความเร็ว 3000รอบ/นาที เป็นเวลา 40 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ให้น้ำยาไวแสงแห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ มาร์กที่3 ด้วยเครื่องปรับช้อนมาสก์ (mask aligner) ใช้เวลาในการ ฉายแสง 10 วินาที
- ชื่นลวดลายน้ำยาไวแสงด้วยการจุ่มลงในน้ำยาชื่นลวดลาย (AZ Developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มใน DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ให้ฟิล์มน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 90°C เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นฟิล์มโลหะอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างเป็นขั้วอิเล็กทรอนิกส์ โทรด ใช้สารละลายสกัดชั้นอลูมิเนียม (Al etching) ซึ่งมีส่วนผสมของ $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : 4\text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 โดยจุ่มลงในสารละลายสัปดาห์ชั้นอนุกรมที่
อุณหภูมิประมาณ 40 °C ใช้เวลาประมาณ 10-20 วินาที

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

จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้เข้าสู่ขั้นตอนการวัด และการทดลองต่อไป

กระบวนการสร้าง ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO สรุปได้ดังรูปที่ 3.6

n-Si

แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น

n-Si

สร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์

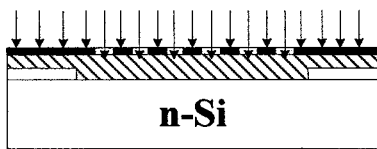
n-Si

กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 1

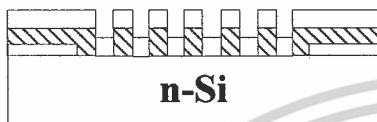
n-Si

สัปดาห์ชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์

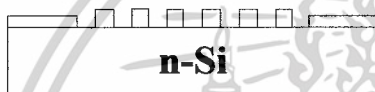
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



กระบวนการโฟโตลิโทกราฟีครั้งที่ 2



เคลือบ ITO ด้วยวิธี อาร์เอฟสปีเตอร์ริง



สกัดชั้น ITO และเคลือบโลหะอลูมิเนียม

รูปที่ 3.6 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO



(ก)

รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่สร้างขึ้น

(ก) ตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO ที่มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

การทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

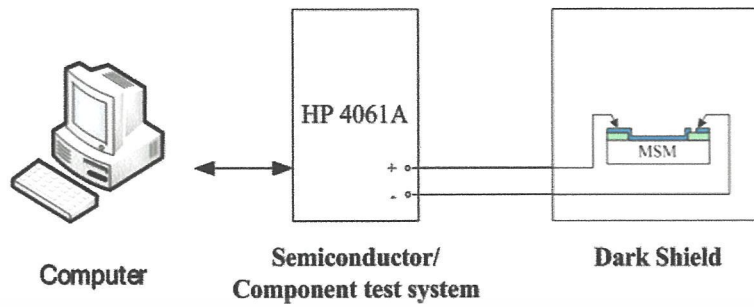
โฟโตดีเทกเตอร์หรือตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความไวต่อรังสีของแสงและสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ โดยคลื่นแสงนั้นถูกพิจารณาว่าเป็นโฟตอน (Photon) และพลังงานของโฟตอนจะแปรกับความยาวคลื่นแสง จึงได้นำหลักการดังกล่าวมาเป็นการทดลองเพื่อหาค่า สภาพการตอบสนองทางแสง (SR) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) การหาค่าต่างๆ เหล่านี้จำเป็นที่จะต้องทราบคุณลักษณะสมบัติพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสงที่สร้าง ดังนั้นปริยญาณิพนธ์ฉบับนี้จึงได้ทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแสแรงดันในขั้นต้นก่อนจะได้ทำการศึกษาการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัมต่อไป

4.1 ศึกษาลักษณะสมบัติกระแสแรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้า ต่างๆกัน

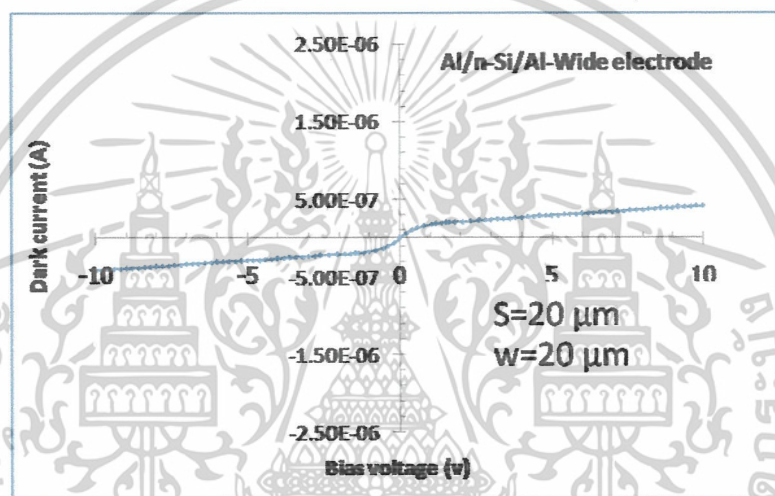
ในหัวข้อนี้จะทำการทดสอบ และวิเคราะห์สมบัติกระแส-แรงดันเกี่ยวกับ ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ที่สร้างขึ้นในห้องปฏิบัติการของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์นี้ เพื่อแสดงว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เป็นตัวตรวจวัดแสงที่ดีเช่น มีกระแสรั่วไหลต่ำ มีความสมมาตรกันของลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันและมีการเปลี่ยนแปลงเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเป็นต้น และนำตัวตรวจวัดแสงนี้ไปวิเคราะห์การตอบสนองทางแสงต่อไป

4.1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

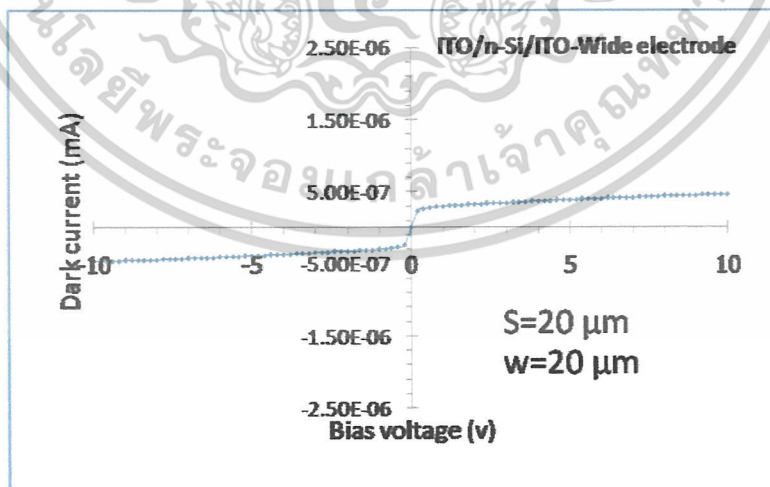
การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ หรือที่เรียกว่ากระแสมืด (I_{dark}) ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM โดยใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A ซึ่งแสดงแผนภาพของเครื่องมือดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 แผนภาพการทดลองเพื่อหาลักษณะสมบัติกระแสกับแรงดันของตัวตรวจวัดแสง

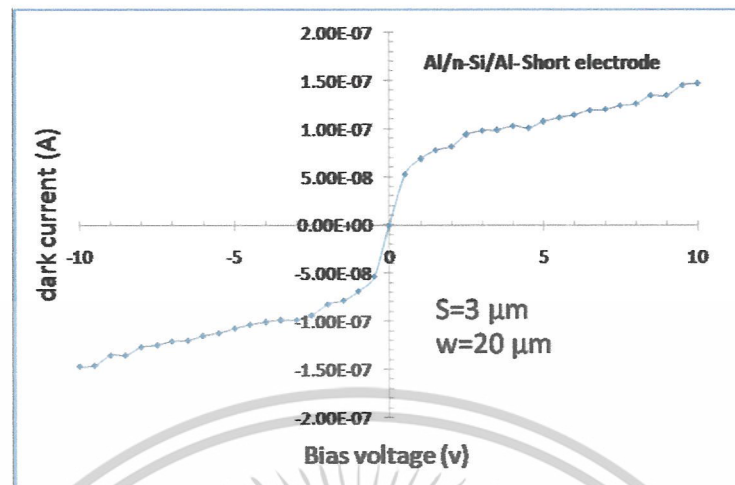


(ก)



(ข)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

- รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันเมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ
- (ก) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง
 - (ข) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/TiO₂ ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง
 - (ค) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น

นำตัวตรวจวัดแสงแบบอินเทอร์ดิเจกทีฟที่มีการเปลี่ยนแปลงชนิดและระยะห่างขั้วไฟฟ้าระยะ S ต่างๆ มาทำการทดลองหาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า โดยต่อวงจรทดสอบ ดังแสดงในแผนภาพรูปที่ 4.1 จะได้ว่าที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 5V ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้างของ ITO, Al คือมีค่ากระแสมืดเท่ากับ $3.1 \times 10^{-7} \text{ A}$, $2.88 \times 10^{-7} \text{ A}$ ตามลำดับ มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากมีพื้นที่ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเท่ากัน ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น กระแสรั่วไหลน้อยกว่ามีค่าเท่ากับ $1.2 \times 10^{-7} \text{ A}$ ก็เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้นมีจำนวนขั้วไฟฟ้าน้อยกว่าเพื่อหากระแสรั่วไหล หรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) สามารถหาได้จาก

$$I_0 = ART^2 e^{\frac{-q\phi_{bn}}{kT}} \quad (4.1)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่รอยสัมผัส

R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ (n-Si)

T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

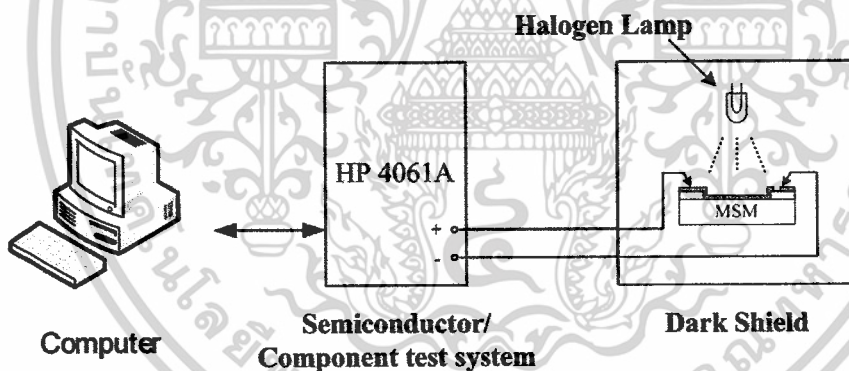
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$

ϕ_{bn} คือ ความสูงกำแพงศักย์หรือคิกย์

k คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$

4.1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบ

ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันในสภาวะแสงกระแสดำรงใช้เครื่องวัดลักษณะสมบัติของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ HP 4061 A โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน แสงดังแผนภาพของเครื่องมือในรูปที่ 4.3



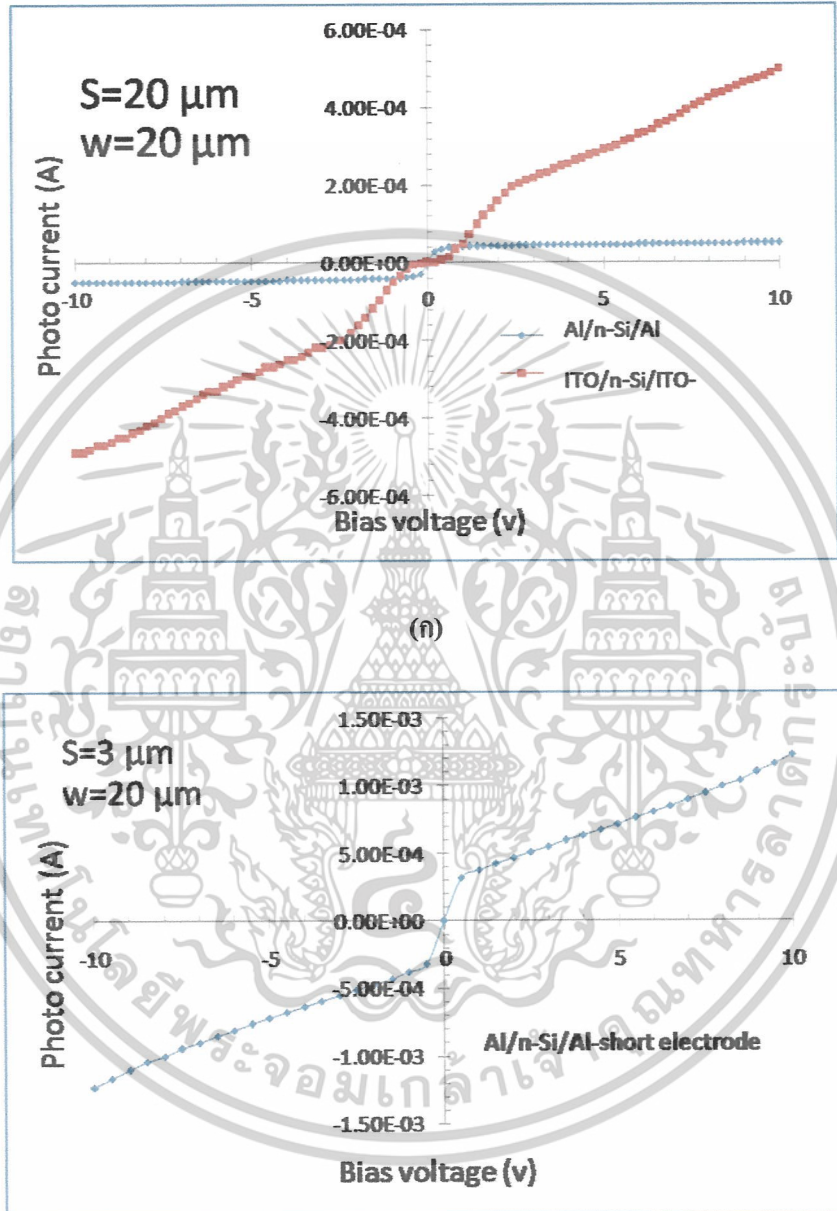
รูปที่ 4.3 แผนภาพเครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลองหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

โดยทำการวัดกระแสมีดในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบ (I_{dark}) และกระแสรวมของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงตกกระทบ (I_{total}) จากนั้นจึงทำการหาค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอด (I_{photo}) จากสมการ

$$I_{\text{photo}} = I_{\text{total}} - I_{\text{dark}}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่ากระแสแสงที่ได้มาแสดงเป็นกราฟลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เพื่อวิเคราะห์สมบัติตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM ต่อไป



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง กระแสกับแรงดันขณะได้รับแสงตกกระทบ

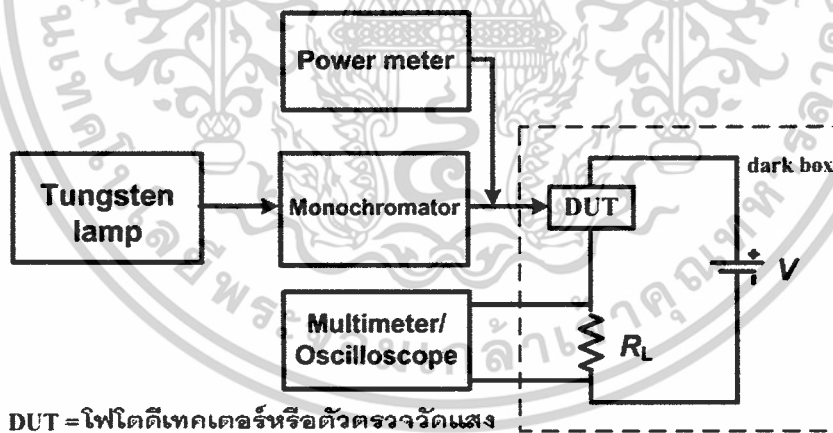
- (ก) ตรวจวัด แสง โครงสร้างที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง
 (ข) ตรวจวัด แสง โครงสร้างที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตัวอย่างของกราฟในรูปที่ 4.4 เป็นคุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสงเบื้องต้น จากการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่ออกแบบให้ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 5 V โดยยังพบว่ากระแสแสงของตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น มีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่ามากกว่าตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง และตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง ประมาณ 2.474 เท่า และ 15.64 เท่าตามลำดับและกระแสแสงของตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/ITO มีค่ามากกว่า โครงสร้างแบบ Al/n-Si/Al ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง อยู่ประมาณ 6.083 เท่า

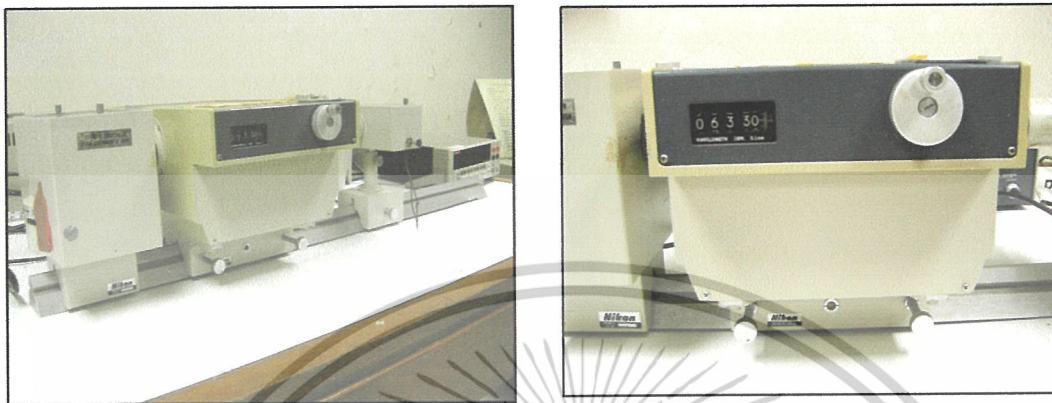
4.2 การศึกษาเทคนิคการวัดสภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม

การทดลองได้นำตัวตรวจวัดแสงไปทดสอบดังรูปที่ 4.5 ซึ่งประกอบไปด้วยแหล่งจ่ายแสงจากหลอดทังสเตน และส่งผ่านไปยังเครื่องโมนโครมาเตอร์ เพื่อให้แสงผ่านไปได้เฉพาะความยาวคลื่นแสงที่กำหนด จากนั้นแสงที่ผ่านจากเครื่องโมนโครมาเตอร์จะถูกวัด พลังงานแสง เพื่อเป็นพลังงานอินพุต (P_{in}) ด้วยเครื่องเพาเวอร์มิเตอร์ และเมื่อการส่งผ่านแสงไปถึงบริเวณรับแสงของตัวตรวจวัดแสง ตัวตรวจวัดแสงก็จะเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นกระแสไฟฟ้าซึ่งกระแสไฟฟ้าจะเป็นพลังงานเอาต์พุต (I_p)



รูปที่ 4.5 แผนภาพการทดลองหาประสิทธิภาพควอนตัมทางแสง และสภาพการตอบสนองทางแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



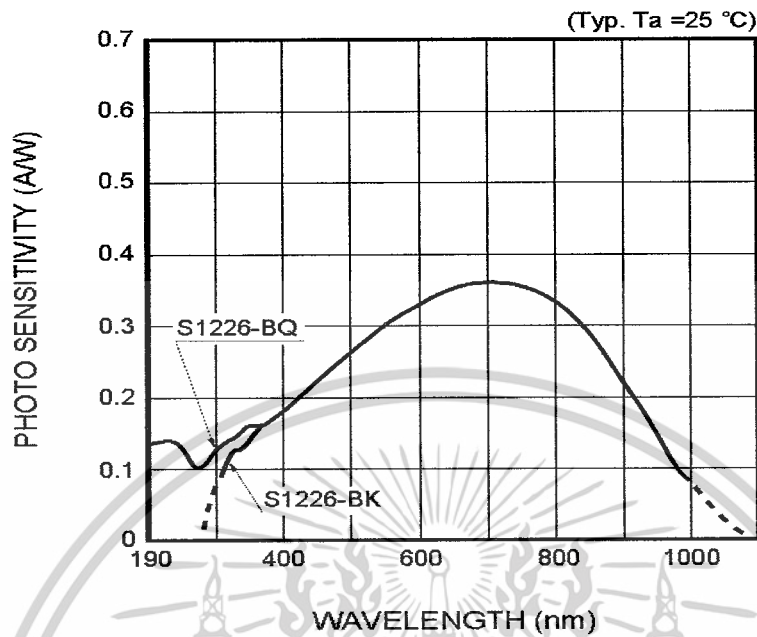
(ก)

(ข)

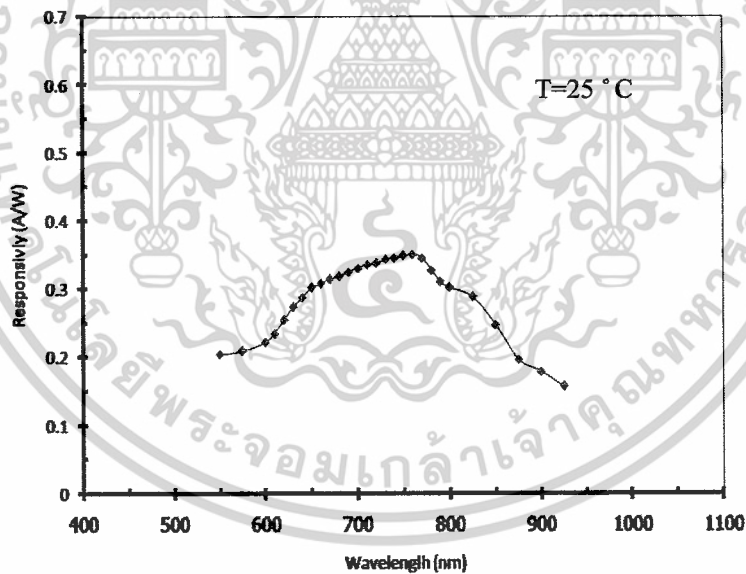
รูปที่ 4.6 ภาพถ่าย (ก) ชุดทดสอบสอบ และ (ข) เครื่องโมโนโครมาเตอร์

การทดลองได้เริ่มทดลองเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงในเชิงพาณิชย์ของบริษัท Hamamatsu เบอร์ S1226-8BQ ซึ่งเป็นตัวตรวจวัดแสงชนิด ซิลิคอน โฟโตไดโอด ที่มีขนาดพื้นที่รับแสง 33 mm^2 ในการทดลองเพื่อหาค่า \mathcal{R} พบว่าค่า \mathcal{R} ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับคู่มือ ดังนี้ข้อมูลจากDatasheet แสดงค่า $\mathcal{R} = 0.34 \text{ A/W}$ ที่ความยาวสูงสุด และ $\eta = 75 \%$ ที่ความยาวคลื่น 200 nm จากการทดลองด้วยชุดทดลองได้ $\mathcal{R} = 0.35 \text{ A/W}$ และ $\eta = 69 \%$ ที่ความยาวคลื่นสูงสุด ในขณะที่ความยาวคลื่นที่มีค่า \mathcal{R} สูงสุด (λ_p) = 740 nm แต่ในDatasheet แสดงค่า $\lambda_p = 720 \text{ nm}$ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันอยู่บ้าง อย่างไรก็ตามในการทดลองเพื่อหาค่า \mathcal{R} พบว่าค่า \mathcal{R} ที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกับDatasheet ซึ่งเป็นการยืนยันให้เห็นว่าชุดทดลอง ให้ผลการทดลองที่ยอมรับได้ในระดับที่ดี จากนั้นจึงนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างเสร็จแล้วมาทำการทดสอบต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับ ความยาวคลื่น

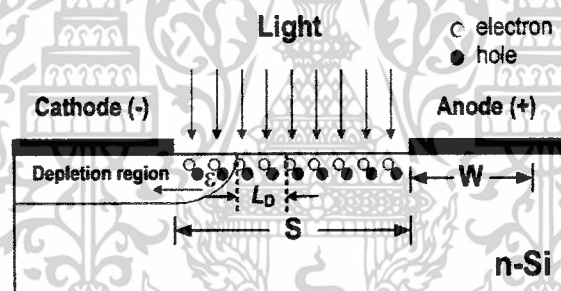
(ก) ข้อมูลจากDatasheet

(ข) จากการทดลองจากชุดทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.1 การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (\mathcal{R}) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัด แสงโครงสร้างแบบ(AI/n-Si/AI) ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง

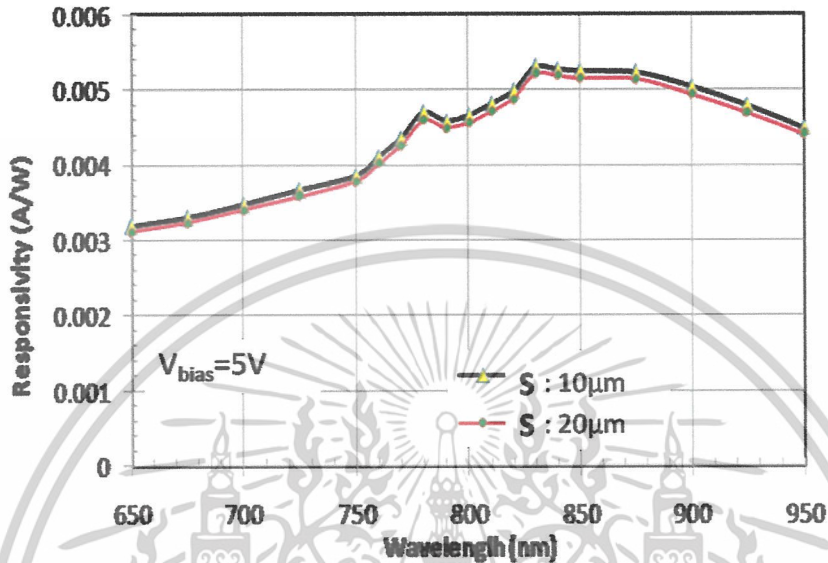
ในรูปที่ 4.8 เป็นการเกิดกระแสแสงของ โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ซึ่งได้เคยนำเสนอไว้ก่อนหน้านี้แล้ว กล่าวคือในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างที่สร้างบนฐานรองเป็นซิลิคอนชนิด n กระแสแสงจะเกิดขึ้นจากโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทดเป็นส่วนใหญ่ โดย (1) เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะที่เรียกว่ากระแสโฟโตไดโอด (I_D) และ (2) เกิดขึ้นในบริเวณนิวทรัลใกล้ ขอบบริเวณปลอดพาหะภายในระยะการแพร่ (L_D) เป็นกระแสการแพร่ที่เรียกว่ากระแสโฟโตคอนดักเตอร์ (I_C) และพบว่าที่แรงดันไบอัสมีค่าคงที่ค่าหนึ่ง และได้รับความเข้มแสงที่เท่ากันจะได้กระแส I_D และกระแส I_C เท่ากัน ไม่ขึ้นกับระยะ S ที่เปลี่ยนแปลงไป



รูปที่ 4.8 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM กรณี ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง

จากแผนภาพการทดลองในรูปที่ 4.5 ทดลองหาค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) เท่ากับ $10\mu\text{m}$, $20\mu\text{m}$ โดยกำหนดความยาวคลื่นแสงหลังจากผ่านเครื่องโมโนโครมาเตอร์ให้อยู่ในช่วง $650\text{--}950\text{ nm}$, ความต้านทานโหลด (R_L) = $500\ \Omega$ และให้ไบอัสแก่ตัวตรวจวัดแสงคงที่ที่ 5 V แล้วหาค่ากระแสแสง จาก นั้นนำไปคำนวณหา สภาพการตอบสนองทางแสงและ ประสิทธิภาพควอนตัม

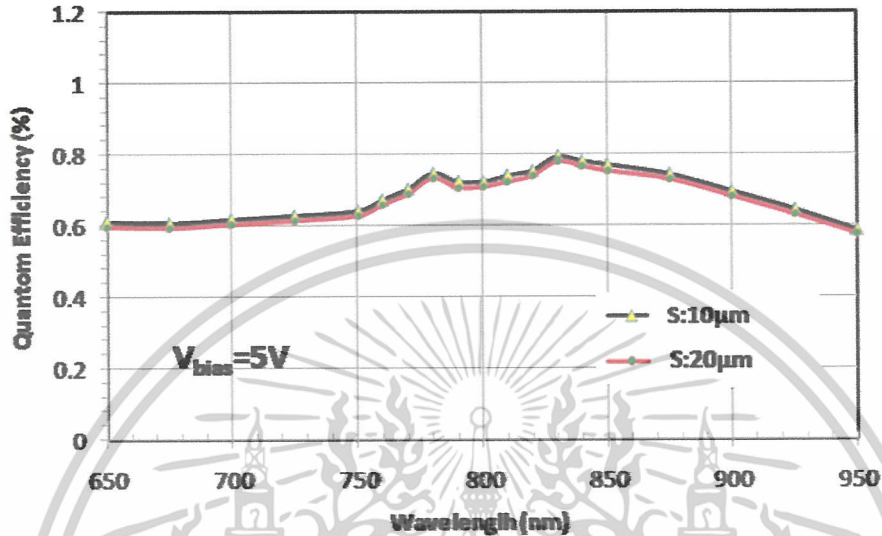
สภาพการตอบสนองทางแสง $\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc}$



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความยาวคลื่นในช่วง 650-950 nm ของ Al/n-Si/Al ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 10 μm และ 20 μm

จากรูปที่ 4.9 จะพบว่าค่าการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจจับแสงที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) ต่างกันนั้นจะให้ค่าการตอบสนองทางที่มีแนวโน้มเดียวกัน และได้ค่าสูงสุดคือ $\mathcal{R} \approx 0.0053$ A/W และ $\mathcal{R} \approx 0.00521$ A/W ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) ที่ค่า 10 μm และ 20 μm ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นค่าเดียวกันที่ (λ_p) = 830 nm

$$\text{ประสิทธิภาพควอนตัม } \eta = \frac{I_p / q}{P_{\text{inc}} / h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{\text{inc}}}$$

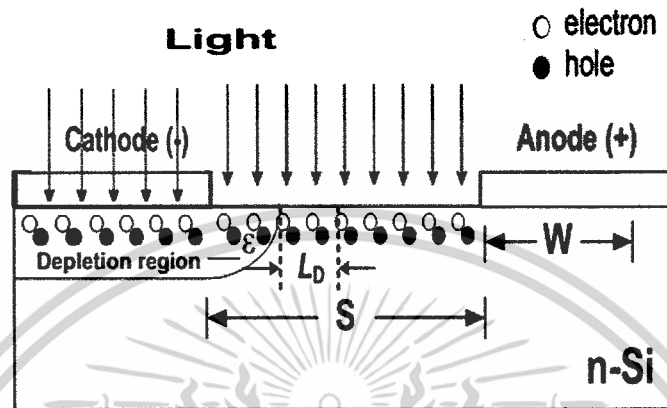


รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมกับความยาวคลื่นในช่วง 650-950 nm โครงสร้าง (Al/n-Si/Al) ที่มีระยะความกว้างระหว่างนิ้ว (S) = 10 µm และ 20 µm

จากรูปที่ 4.10 จะพบว่าค่าประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะความกว้างระหว่างนิ้ว (S) เท่ากับ 10µm ,20µm นั้นจะให้ประสิทธิภาพควอนตัมที่มีแนวโน้มเดียวกัน และได้ค่าสูงสุดคือ $\eta = 0.79\%$ และ $\eta = 0.78\%$ ที่มีระยะความกว้างระหว่างนิ้ว (S) ที่ค่า 10 µm และ 20 µm ตามลำดับและที่ความยาวคลื่นค่าเดียวกันที่ (λ_p) = 830 nm สำหรับสาเหตุที่ การตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม (η) ที่ความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า 830 nm มีค่าลดลงเนื่องจาก สัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นมีค่าลดลง เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่า ต่ำลงจึงทำให้ปริมาณกระแส แสง ที่ได้มีค่าลดลง และเมื่อความยาวคลื่นแสงมีความยาวคลื่นมากกว่า 830 nm พลังงานของแสง มีค่าลดลงตามความสัมพันธ์ของ $E=h\nu$ ทำให้การดูดกลืนคลื่นแสงมีค่าน้อยลง ซึ่งส่งผลให้จำนวน คู่อิเล็กตรอนโฮลที่เกิดขึ้นมีจำนวนลดลงเป็นผลให้กระแสแสงที่ได้มีค่าลดต่ำลง จากสาเหตุทั้งสองนี้จึงส่ง ผลกระทบทำให้ η และ \mathcal{R} มีค่าลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

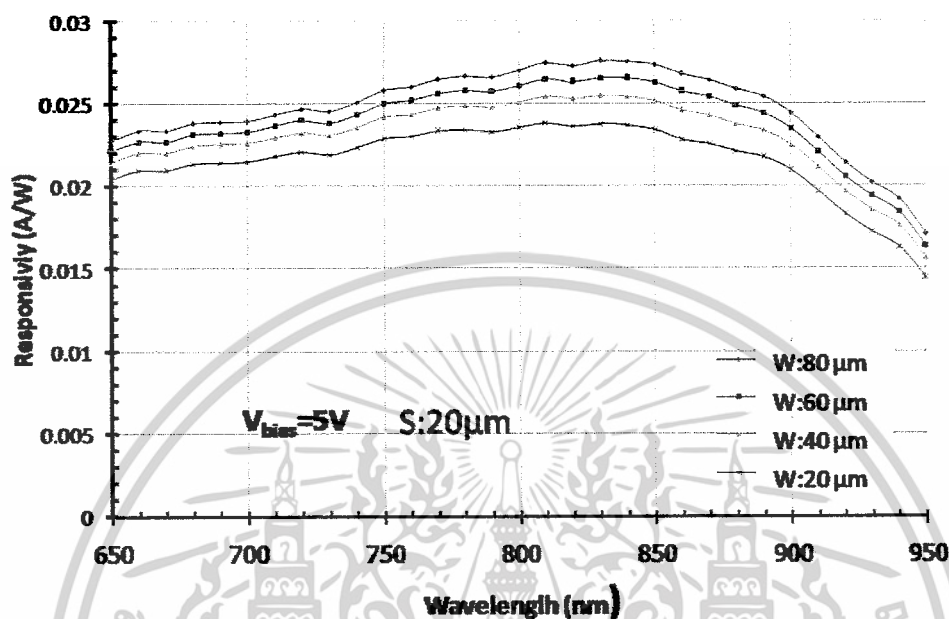
4.2.2 การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (R) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัด แสงโครงสร้างแบบ (ITO/n-Si/ITO) ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง



รูปที่ 4.11 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM กรณีที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง

เป็นการเกิดกระแสแสงของโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง ของตัวตรวจวัดแสง ITO/n-Si/ITO นั้นซึ่งจะคล้ายกับกรณีของ โครงสร้าง Al/n-Si/Al โดย (1) เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะที่เรียกว่ากระแสโฟโตไดโอด (I_D) และ (2) เกิดขึ้นในบริเวณนิวทรัลโกลด์ ขอบบริเวณปลอดพาหะภายในระยะการแพร่ (L_D) เป็นกระแสการแพร่ที่เรียกว่ากระแสโฟโตคอนดักเตอร์ (I_C) และพบว่าที่แรงดันไบอัสมีค่าหนึ่งที่ค่าหนึ่ง และได้รับความเข้มแสงที่เท่ากันจะได้กระแส I_D และกระแส I_C เท่ากันไม่ขึ้นกับระยะ S ที่เปลี่ยนแปลงไป แต่จะต่างกันที่แสงที่ตกทบบนตัวตรวจวัดแสงนั้นจะสามารถทะลุผ่านขั้วไฟฟ้าของ ITO ได้เนื่องจาก ITO วัสดุโปร่งใสจึงทำให้บริเวณโฟตอนตกกระทบบริเวณปลอดพาหะได้เพิ่มขึ้นซึ่งได้ส่งผลทำให้ได้ค่ากระแสสูงกว่าแบบ โครงสร้างที่ใช้ขั้วไฟฟ้าแบบทึบแสง

สภาพการตอบสนองทางแสง $\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc}$

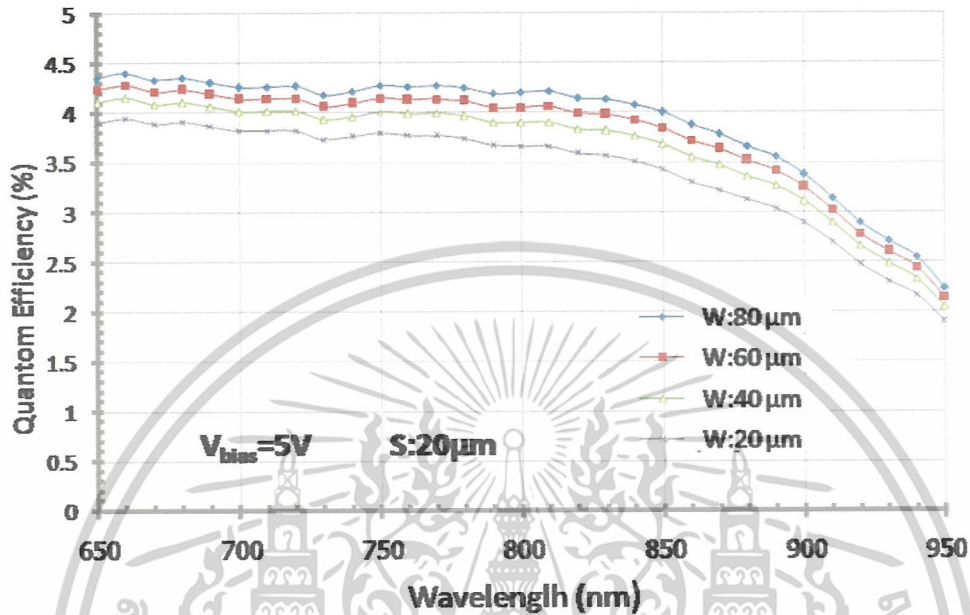


รูปที่ 4.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความยาวคลื่นในช่วง 650-950 nm

โครงสร้าง (ITO/n-Si/ITO) ที่มีขนาดขั้ว (W) = 80 μm 60 μm 40 μm และ 20 μm

จากรูปที่ 4.12 จะพบว่าค่าการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) ต่างกันนั้นจะให้ค่าการตอบสนองทางแสงที่มีแนวโน้มเดียวกัน และได้ค่าสูงสุดคือ $\mathcal{R} \approx 0.0275$ A/W, 0.0265 A/W, 0.0254 A/W, 0.023 A/W ที่มีขนาดขั้ว (W) ที่ค่า 80 μm, 60 μm, 40 μm และ 20 μm ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นค่าเดียวกันที่ (λ_p) = 830 nm จะเห็นได้ว่าค่าการตอบสนองทางแสงสำหรับตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/ITO มีค่าการตอบสนองทางแสงดีกว่าโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 10 μm และ 20 μm ซึ่งเป็นผลมาจากพื้นที่รับแสงภายใต้บริเวณปลอดพาหะมีค่ามากกว่าจึงทำให้ได้กระแสแสงมากขึ้น ส่งผลให้มีสภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัมดีขึ้น

ประสิทธิภาพควอนตัม $\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{inc}}$



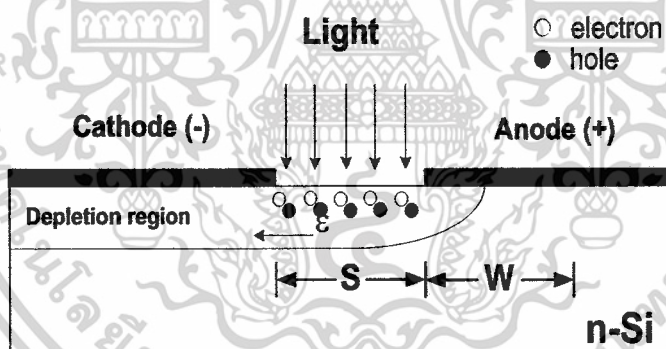
รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมกับความยาวคลื่นในช่วง 650-950 nm โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO ที่มีขนาดขั้ว (W) = 80 μm 60 μm 40 μm และ 20 μm

จากรูปที่ 4.13 จะพบว่าค่าประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสงที่มีขนาดขั้ว (W) ต่างกัน นั้นจะให้ประสิทธิภาพควอนตัมที่มีแนวโน้มเดียวกัน และได้ค่าสูงสุดคือ $\eta = 4.403(\%)$ $4.282(\%)$ $4.152(\%)$ และ $\eta = 3.951(\%)$ ที่มีขนาดขั้ว (W) ที่ค่า 80 μm 60 μm 40 μm และ 20 μm ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นค่าเดียวกันที่ (λ_p) = 660 nm สำหรับสาเหตุที่การตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม (η) ที่ความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า 660 nm และ 830 nm มีค่าลดลงเนื่องจากสัมประสิทธิ์การดูดกลืนคลื่นมีค่าลดลง เมื่อความยาวคลื่นแสงมีค่า ต่ำลงจึงทำให้ปริมาณกระแสแสงที่ได้มีค่าลดลง และเมื่อความยาวคลื่นแสงมีความยาวคลื่นมากกว่า 830 nm พลังงานของแสงมีค่าลดลงตามความสัมพันธ์ของ $E = h\nu$ ทำให้การดูดกลืนคลื่นแสงมีค่าน้อยลง ซึ่ง ส่งผลให้จำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นมีจำนวนลดลง เป็นผลให้กระแสแสงที่ได้มีค่าลดลง จาก สาเหตุทั้งสองนี้จึงส่งผลกระทบทำให้และมีค่าลดลงตามไปด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

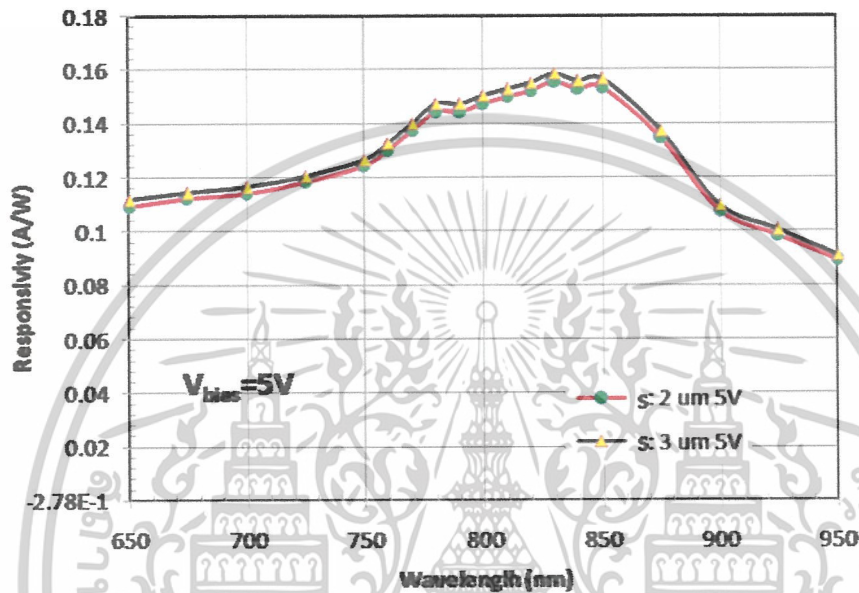
4.2.3 การศึกษาสภาพการตอบสนองทางแสง (PR) และประสิทธิภาพควอนตัม (η) ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ (Al/n-Si/Al) ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น

การเกิดกระแสแสงของ โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14 บริเวณหลอดพาหะครอบคลุมระยะ S ทั้งหมดทำให้กระแสแสงที่เกิดขึ้นเป็นกระแสโฟโตไดโอดเพียงอย่างเดียว และเกิดขึ้นจากการเคลื่อนที่ของทั้งอิเล็กตรอนและโฮล โดยโฮลเคลื่อนที่ไปยังขั้วคาโทด ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังขั้วแอโนด จึงได้รับกระแสแสงมากกว่ากรณี โครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้างถ้าระยะ S มีค่าน้อยลงเท่าใดกระแสแสงที่ได้รับจะมีค่ามากยิ่งขึ้น นอกจากนี้ปริมาณของกระแสแสงที่ได้รับยังขึ้นกับ (1) ขนาดทางเรขาคณิตของ หลอดหลาย (2) สนามไฟฟ้า (3) ความเข้มแสง (4) ความยาวคลื่นแสง และ (5) ระยะเวลาในการเคลื่อนที่ของพาหะผ่านระยะ S (transit time)



รูปที่ 4.14 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM กรณีที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น

สภาพการตอบสนองทางแสง $\mathcal{R} = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta q \lambda}{hc}$

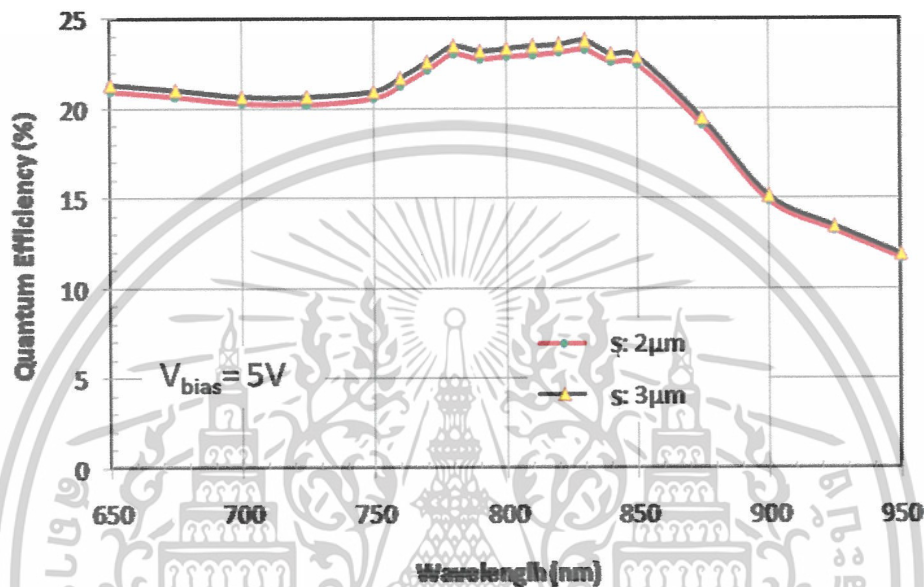


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างการตอบสนองทางแสงกับความยาวคลื่นในช่วง 650–950 nm โครงสร้าง (Al/n-Si/Al) ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 2 μm และ 3 μm

จากรูปที่ 4.15 จะพบว่าค่าการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) ต่างกันนั้นจะให้ค่าการตอบสนองทางที่มีแนวโน้มเดียวกัน และได้ค่าสูงสุดคือ $\mathcal{R} \approx 0.155 \text{ A/W}$ และ $\mathcal{R} \approx 0.159 \text{ A/W}$ ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) ที่ค่า = 2 μm และ = 3 μm ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นค่าเดียวกันที่ (λ_p) = 830 แต่มีข้อสังเกตว่าที่ระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 3 μm มีการตอบสนองทางแสงได้ดีกว่าที่ระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 2 μm ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพื้นที่รับแสงภายใต้บริเวณหลอดพาหะมีค่ามากกว่าจึงทำให้ได้กระแสมากขึ้น และมีผลมากกว่าเวลาในการเคลื่อน ของพาหะและอาจถือได้ว่าระยะ S = 3 μm เป็นระยะห่างที่ดีที่สุด ในการศึกษาของเราที่การตอบสนองทางแสง ได้ดีที่สุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{ประสิทธิภาพควอนตัม } \eta = \frac{I_p/q}{P_{\text{inc}}/h\nu} = \frac{I_p}{q} \cdot \frac{h\nu}{P_{\text{inc}}}$$



รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพควอนตัมกับความยาวคลื่นในช่วง 650–950 nm โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 2 μm และ 3 μm

จากรูปที่ 4.16 จะพบว่าค่าประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) ต่างกันนั้นจะให้ประสิทธิภาพควอนตัมที่มีแนวโน้มเดียวกัน และได้ค่าสูงสุดคือ $\eta = 23.27(\%)$ และ $\eta = 23.74(\%)$ ที่มีระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) ที่ค่า 2 μm และ 3 μm ตามลำดับ และที่ความยาวคลื่นค่าเดียวกันที่ (λ_p) = 830 nm สำหรับสาเหตุที่การตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ที่ความยาวคลื่นแสงน้อยกว่า 830 nm มีค่าลดลงเนื่องจากผลตอบสนองต่อสเปกตรัมแสงทำให้ความสามารถในการการดูดกลืนลดลง จะเห็นได้ว่าการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัมสำหรับตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างตัวตรวจวัดแบบสั้น จะสูงกว่าโครงสร้างตัวตรวจวัดแบบกว้าง และที่ระยะความกว้างระหว่างขั้ว (S) = 3 μm มีประสิทธิภาพควอนตัมได้ดีกว่าที่ระยะความกว้าง

ระหว่างขั้ว (S) = 2 μm ซึ่งอาจเป็นผลเดียวกับค่าการตอบสนองทางแสงและอาจถือได้ว่าระยะ $S = 3$ μm เป็นระยะห่างที่ดีที่สุด ในการศึกษาของเราที่ประสิทธิภาพควอนตัมได้ดีที่สุด

ตารางที่ 4.1 ผลของสภาพการตอบสนองทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสง

spectral response $\lambda(\text{nm})$	ชนิดของโครงสร้าง	ลักษณะขั้วไฟฟ้า	สภาพการตอบสนองทางแสง (A/W)	ประสิทธิภาพควอนตัม (%)	$\lambda_{\text{peak}} (\text{nm})$
650-950	Wide electrode	Al/n-Si/Al	0.00521	0.779	830
		ITO/n-Si/ITO	0.0238	3.951	830
	Short electrode	Al/n-Si/Al	0.155	23.74	830

จากการทดสอบและนำค่าที่ได้มาเปรียบเทียบกันมีลักษณะค่าการตอบสนองทางแสงที่ดีที่สุดสำหรับโครงสร้างแบบ MSM นั้นคือโครงสร้างที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น มีค่าที่ดีกว่าแบบโครงสร้างที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง ประมาณ 6.68 และ 30 เท่า สำหรับขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสและทึบแสงตามลำดับ ที่ความยาวคลื่น (λ) 830 nm ส่วนค่าประสิทธิภาพควอนตัมพบว่าที่ดีที่สุดคือโครงสร้างที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น มีค่าที่ดีกว่าโครงสร้างที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้างประมาณ 6 และ 30 เท่าสำหรับขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสและทึบแสงตามลำดับ

สำหรับค่า η และ R ยังพบอีกว่าที่ระยะ $S = 3$ μm จะได้ค่าที่สูงกว่าที่ $S = 2$ μm ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพื้นที่รับแสงภายใต้บริเวณปลอดพาหะมีค่ามากกว่าจึงทำให้ได้กระแสมากขึ้น และมีผลมากกว่าเวลาในการเคลื่อน ของพาหะและอาจถือได้ว่าระยะ $S = 3$ μm เป็นระยะห่างที่ดีที่สุด ในการศึกษาของเราที่มีประสิทธิภาพ ในการเปลี่ยนแสงเป็นกระแสไฟฟ้าได้ดีที่สุดที่มีการให้ไบอัสที่ค่า 5V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการศึกษาผลตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบอินเทอร์ดิจิทัล โดยแบ่งออกเป็น 3 ส่วน

ส่วนแรกศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยสารกึ่งตัวนำที่ใช้เป็นชนิดซิลิกอน และขั้วไฟฟ้าที่ใช้ขั้วไฟฟ้าทึบแสง (AI) ที่มีลักษณะระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นแบบสั้นและแบบกว้าง สำหรับขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (ITO) นั้นมีลักษณะระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเป็นแบบกว้าง ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่คล้ายกัน ต่างกันที่การเคลือบสารที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า โดยที่ขั้วไฟฟ้าโปร่งใส (ITO) ใช้วิธี RF สเป็คเตอรริง ส่วนขั้วไฟฟ้าทึบแสง (AI) ใช้วิธีเคลือบโลหะในสุญญากาศ

ส่วนที่สองศึกษาและทดสอบคุณสมบัติกระแสไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้า เพื่อวิเคราะห์ คุณสมบัติของตัวตรวจวัดแสง (MSM) ที่กว้างขึ้น โดยพบว่ากระแสแสงของตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ AI/n-Si/AI ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น มีค่ามากที่สุดซึ่งมีค่ามากกว่าตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/ITO ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง และตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ AI/n-Si/AI ที่มีลักษณะช่องรับแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแบบกว้าง ประมาณ 2 เท่า และ 15 เท่าตามลำดับและกระแสแสงของตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ ITO/n-Si/ITO ค่ามากกว่า โครงสร้างแบบ AI/n-Si/AI ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้างอยู่ ประมาณ 6 เท่า แสดงว่าเมื่อมีการเพิ่มบริเวณรับแสง 20 μm ทำให้ค่ากระแสแสงเพิ่ม 6 เท่าหรือเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 30 % และจะได้นำไปทดสอบการตอบสนองทางแสงต่อไป

ส่วนที่สามคือศึกษาและทดสอบการตอบสนองทางแสงและค่าประสิทธิภาพควอนตัมได้ทำการสร้างชุดทดลองเพื่อหาคุณสมบัติของการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนไปตามตัวแปรต่างๆ และได้ทำการวัดโดยใช้โฟโตไดโอดในโครงสร้างแบบ p-i-n และได้ผลการวัดที่ได้มีค่าใกล้เคียง เมื่อเปรียบเทียบกับ ข้อมูลจากคู่มือแสดงค่า $\mathcal{R} = 0.34 \text{ A/W}$ ที่ความยาวคลื่น 633 nm และ $\eta = 75 \%$ ที่ความยาวคลื่น 200 nm จากการทดลองด้วยชุดทดลอง ได้ $\mathcal{R} = 0.35 \text{ A/W}$ และ $\eta = 69 \%$ ที่ความยาวคลื่น 633 nm ในขณะที่ความยาวคลื่นที่มีค่า \mathcal{R} สูงสุด (λ_p) = 770 nm แต่ในคู่มือแสดงค่า $\lambda_p = 720 \text{ nm}$ ซึ่งมีค่าที่แตกต่างกันอยู่บ้างและได้นำเทคนิคการวัดนี้ นำไปวัดตัวตรวจวัดแสงที่ได้สร้างขึ้น โดยมีโครงสร้างแบบอินเทอร์ดิจิทัล ที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบกว้าง และมีลักษณะช่องรับแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแบบสั้นและทั้งที่มีขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสกับทึบแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบการตอบสนองทางแสงและค่าประสิทธิภาพควอนตัมของตัวตรวจวัดแสงที่มีสภาพแวดล้อมเหมือนกัน เช่น การที่ได้รับ โป้อส 5V พลังงานของแสงที่ตกกระทบ ได้พบว่า โครงสร้างที่มีลักษณะช่องรับแสงแบบสั้น มีค่าการตอบสนองทางแสงและค่าประสิทธิภาพควอนตัมดีที่สุดและโดยที่ค่าการตอบสนองทางแสงมากกว่าช่องรับแสงที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแบบกว้าง ประมาณ 7-30 เท่า สำหรับขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสและทึบแสงตามลำดับ ที่ความยาวคลื่น(λ) 830 nm ส่วนค่าประสิทธิภาพควอนตัมพบว่า โครงสร้างที่ดีก็คือ โครงสร้างที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแบบสั้นมีค่าที่ดีกว่า โครงสร้างที่มีระยะห่างระหว่างขั้วแบบกว้าง ประมาณ 6-30 เท่า สำหรับขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสและทึบแสงตามลำดับ และความแตกต่างในการเปลี่ยนแปลงชนิดของขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใสและทึบแสงพบว่า ตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะห่างของขั้วไฟฟ้า (S) หนาของขั้วไฟฟ้า(W) ที่เท่ากันค่าการตอบสนองทางแสงและค่าประสิทธิภาพควอนตัมของขั้วไฟฟ้าแบบโปร่งใส จะมีค่ามากกว่าประมาณ 4.5 เท่า แสดงว่า เมื่อมีการเพิ่มบริเวณรับแสง 20 μm ทำให้ค่าการตอบสนองทางแสงและค่าประสิทธิภาพควอนตัม 4.5 เท่าหรือเพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 22 %



บรรณานุกรม

1. รศ.ดร. สมเกียรติ ศุภเดช . **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.พ.ศ.2542
2. ดุสิต เครื่องาม. **สิ่งประดิษฐ์ ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ : ฟิสิกส์เทคโนโลยีและการใช้งาน**. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542
3. สรายุทธ วิศวแสวงสุข และคณะ. “ การศึกษาค่าความสูงของกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสแบบขอตติ์กี . การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 23 พ.ศ. 2543.
4. Desmarais Louis. **Applied Electro- optics**. Upper Saddle River,NJ: Prentice Hall PTR.1998.
5. Sze S.M.**Physics of Semiconductor Device**2nd Edition.1981.
6. Rhoderick E.H. William R. H. **Metal- Semiconductor Contacts** 2nd Edition Oxford University Press. New York. 1998.
7. Sze S M. Coleman D.J.JR. and Loya A “ Current Transport in Metal- Semiconductor Metal(MSM) Structures.” Solid-State Electronics. 1971. Vol.14 ,pp. 1209-1248
8. Takano H, Kimura M,Ando T, Niemcharoen S, Yasamura Y, and Sato K. “ Optical Response of Planar Mo/n-Si/Mo Structure With Long Neutral Region and Schottky Barriers at Both Ends.”, Solid-State Electronics 44(2000), pp.2161-2164.
9. Solymar L, Walsh D, **Lecture on the electrical properties of material**. 5th ed, Oxford: Oxford University Press, 1993.
10. Gerikd W, Neudeck. **The PN Junction diode**. 2nd ed. Reading MA: Addison- Wesle. 1989.
11. C.-S.Lin, R.-H.Yeh, C.-H.Liao and J.-W.Hong, “Improving characteristics of Si-based trenchelectrode metal-semiconductor-Metal photodetectors using self-aligned process” IEE Proc.-Optoelectron., 2001.
12. T. Masui, S. Khunkhao, K. Kobayashi, S. Niemcharoen, S. Supadech, K. Sato, “Photosensing properties of interdigitated metal-semiconductor-metal structures with undepleted region”, Solid-State Electronic, 2003

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้