

การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al
แบบร่องรูปตัวยู โดยสารละลาย TMAH
The fabrication of Al/n-Si/Al UMSM Photodetectors by TMAH



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย

โดยสารละลาย TMAH

The fabrication of Al/n-Si/Al UMSM Photodetectors by TMAH



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชา

วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย

โดยสารละลาย TMAH

The fabrication of Al/n-Si/Al UMSM Photodetectors by TMAH



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิตสาขาวิชา

วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al
แบบร่องรูปตัวยู โดยสารละลาย TMAH
The fabrication of Al/n-Si/Al UMSM
Photodetectors by TMAH



รายงานเล่มนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ปีการศึกษา 2559

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานวิชาโครงการงาน 2 ภาคเรียนที่ 2 ปีการศึกษา 2559

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

แบบร่องรูปตัวยู โดยสารละลาย TMAH

The fabrication of Al/n-Si/Al UMSM

Photodetectors by TMAH

ผู้จัดทำ

นาย ฐิติกร ภาคะ

รหัสประจำตัว 56010334

นาย ธนพล เผ่าชัย

รหัสประจำตัว 56010526

รายงานนี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการ	การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างAL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยสารละลาย TMAH
นักศึกษา	นาย ฐิติกร ภาคะ รหัสประจำตัว 56010334 นาย ธนพล เผ่าชัย รหัสประจำตัว 56010526
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการ	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการสร้างตัวตรวจวัดแสง AL/n-Si/Al โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ในการกัดแผ่นซิลิคอนให้มีพื้นผิวเรียบโดยทำการสร้างขั้วไฟฟ้าขนาด 1 mm^2 ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า $40 \mu\text{m}$ จากการออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง พบว่า ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่ใช้ความลึกจากการขยายตัวของบริเวณปลอดภัยประมาณ $4 \mu\text{m}$ มีพื้นที่ในการรับแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาสมาถึง 1.7 เท่า จากนั้นทำการทดลอง เพื่อทดสอบความลึกมีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าอย่างไร เมื่อแสงตกกระทบโดยทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในกระบวนการกัดเป็น 8 , 12 และ 16 นาที พบว่าได้ความลึกอยู่ที่ 3.556 , 3.981 และ $8.365 \mu\text{m}$ ตามลำดับ เมื่อทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าขณะไม่มีแสงตกกระทบ พบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูมีกระแสมีอยู่ในช่วง $2-4 \mu\text{A}$ ซึ่งค่ากระแสมีได้ใกล้เคียงกับแบบพลาสมาและเมื่อทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์และความเข้มแสง $25,000 \text{ lux}$ พบว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความลึกมีค่ากระแสแสงมากกว่าแบบพลาสมาใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 1.6 เท่า จากนั้นทำการวัดค่าความจุทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูพบว่ามีความจุไฟฟ้าลดลงเมื่อทำการเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาสมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	The fabrication of Al/n-Si/Al UMSM Photodetectors by TMAH	
Student	Mr. Thitikorn Paka	Student ID 56010334
	Mr.Thanapon Paowchai	Student ID 56010526
Degree	Bachelor of Engineering	
Program	Electronics Engineering	
Year	2016	
Project Advisor	Associate Professor Dr.Surasak Niemcharoen	

Abstract

This project is fabrication process of U-shaped Al/n-Si/Al photodetectors by using Tetramethyl Ammonium Hydroxide (TMAH). Etching silicon wafer cause smooth surface by design electrode is 1 mm^2 , it has distance between electrode is $40 \text{ }\mu\text{m}$. Design structure of photodetectors. its show U-shaped has depth from expanded of Depletion region is $4 \text{ }\mu\text{m}$. It has light area more than planar 1.7 times. Experiment show depth affect to Characteristic when light condition by change etching time to 8,12 and 16 minutes. Measuring depth of photodetectors has 3.556, 3.981 and $8.365 \text{ }\mu\text{m}$. Testing to characteristic of photodetectors when dark condition show U-MSM has dark current at $2\text{-}4 \text{ }\mu\text{A}$ nearby dark current of planar and Testing at voltage bias 10 V and intensity of light 25,000 lux. It shows photocurrent of U-MSM more than planar 1.6 times. Testing capacitance of U-MSM less than planar.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความสำเร็จเสียสละเวลาเป็นที่ปรึกษาของ รศ.ดร.สรุศักดิ์ เนียมเจริญ ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางและความช่วยเหลือทุกด้านให้การศึกษาในครั้งนี้บรรลุเป้าหมายได้

ขอขอบพระคุณ ขอขอบคุณ คุณงามจิต มงคลธนานนท์, คุณวุฒิไกร คำอ่อน และคุณยุทธนา แจ้งอรุณ และ ธนกฤต แสงโสมที่ได้กรุณาให้คำแนะนำตลอดจนชี้แนะและสอนการใช้งานอุปกรณ์

ขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่เอื้อเฟื้อ อุปกรณ์ในการทำการทดลองและเครื่องมือวัดผลการทดลองบางส่วน



รฐติกร ภาคะ
ธนพล เผ่าชัย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	II
กิตติกรรมประกาศ	III
สารบัญ	IV
สารบัญตาราง	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ	6
1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา	3
1.3 สมมติฐานของการศึกษา	3
1.4 ขอบเขตการวิจัย	3
1.5 ขั้นตอนของการศึกษา	4
1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ	6
2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานทางแสง	6
2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง.....	7
2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ	8
2.1.3.1 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล	10
2.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์กึ่งอัตโนมัติ	11
2.2.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์กึ่งอัตโนมัติในสภาวะสมดุล	11
2.2.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์กึ่งอัตโนมัติภายใต้แรงดันไบอัส.....	12
2.2.3 โครงสร้างสองรอยสัมพันธ์กึ่งอัตโนมัติเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบ.....	12
2.3 กระบวนการกัด.....	16
2.2.3 กัดเปียก (wet etching).....	16
2.3.1.1 กัดเปียกแบบไอโซทรอปิก (isotropic).....	16
2.3.1.2 กัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก(anisotropic).....	16
2.2.1.2.1 กระบวนการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก.....	18
2.4 สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก.....	21
2.5 สารละลาย Tetramethyl ammonium Hydroxide (TMAH).....	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง	24
3.1 กระจกต้นแบบตัวตรวจวัดแสง	24
3.2 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน	25
3.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	25
3.4 การเตรียมสารละลาย TMAH	26
3.5 กระบวนการกัด	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง	29
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al	30
4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยการวัดค่าความลึกด้วยเครื่อง Profilometer	32
4.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องไมโครสโคป	33
4.1.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)	35
4.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al	36
4.2.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ	47
4.2.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	38
4.2.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al	38
4.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาสมา ...	39
4.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	41
4.4.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 8 นาที	41
4.4.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 12 นาที	43
4.4.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 16 นาที	45

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5 การเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาเนียร์ กับ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู.....	47
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ.....	51
เอกสารอ้างอิง.....	



สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ	9
2.2 การเปรียบเทียบโดยทั่วไปเป็นกลุ่ม etchants ซิลิคอน.....	21
2.3 เกี่ยวข้องกับซิลิคอน ขึ้นอยู่กับทิศทางของเกาะกั้อัตราองค์ประกอบ อุณหภูมิ เปอร์เซ็นต์ และแนวทาง	22
4.1 แสดงอัตราการกัดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยูในเวลาต่างๆ.....	33
4.2 กระแสแสงที่ความเข้มแสง 25000 lux ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่เปรียบเทียบเป็นจำนวนเท่า	49



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้าง MSM ลักษณะ U-shape (ก) ภาพตัดขวางโครงสร้าง MSM ลักษณะ U-shape (ข) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM ลักษณะ U-shape	2
2.1 ความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ (ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....	7
2.2 รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทริกซิค (ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี	9
2.3 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม	10
2.4 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสอยสัมพันธ์กึ่งในสถานะสมดุลความร้อน	11
2.5 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสอยสัมพันธ์กึ่งเมื่อได้รับแรงดันไบอัส.	12
2.6 แถบพลังงานของโครงสร้างสอยสัมพันธ์กึ่ง เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ ..	13
2.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	14
2.8 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสอยสัมพันธ์กึ่ง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ	15
2.9 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสอยสัมพันธ์กึ่ง ...	15
2.10 เปรียบเทียบการกัด ของ isotropic (ซ้าย) และ anisotropic (ขวา) เป็นฟังก์ชันของเวลา รูปบนสุดเป็นพื้นผิวก่อนที่จะกัด และ รูปด้านล่างมีการกัด isotropic etchant และ anisotropic etchant.....	17
2.11 ด้านซ้ายโครงตาข่ายประกอบ Fcc ของซิลิคอน ด้านขวาเป็นระนาบต่างๆของซิลิคอน.....	18
2.12 แสดงการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic).....	19
2.13 โครงสร้างทางเคมีของสารละลาย TMAH.....	24
3.1 ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ $1 \times 1 \text{ mm}^2$ มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ด้านมีขนาด $40 \text{ }\mu\text{m}$	25
3.2 ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสอยสัมพันธ์กึ่ง	25
3.3 การเตรียมชุดการทดลอง	27
3.4 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM	28
4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดซิลิคอนในเวลาต่างๆ	34
4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ-แรงดันของตัวตรวจ วัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al	36
4.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	37
4.4 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	39

สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.5 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 5000 เท่า ที่บริเวณร่องรูปตัวยู..	40
4.6 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1000 เท่า ที่บริเวณหัว.....	40
4.7 ภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 5000 เท่า	41
4.8 แผนภาพที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	42
4.9 แผนภาพที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	43
4.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	44
4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ขณะได้รับแสงตกกระทบ	45
4.13 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์.....	45
4.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	46
4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ ของการกัดด้วย (TMAH) ต่อน้ำ 1:2 ในเวลาการกัด 8 นาที.....	47
4.16 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 8 นาที.....	48
4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	48
4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ ของการกัดด้วย (TMAH) ต่อน้ำ 1:2 ในเวลาการกัด 12 นาที....	49
4.19 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 12 นาที	50
4.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	50

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ ของการกัดด้วย (TMAH) ต่อน้ำ 1:2 ในเวลาการกัด 16 นาที....	51
4.22 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 16 นาที	52
4.23 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	52
4.24 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มข้นของแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะได้รับแสงตกกระทบ	53
4.25 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al	54



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญของการศึกษา

ในปัจจุบันเทคโนโลยีต่างๆเข้ามามีส่วนร่วมกับการดำเนินไปของชีวิตประจำวันของมนุษย์ทุกคนเป็นอย่างมากไม่ว่าจะเป็นในเรื่องการแพทย์ การก่อสร้าง การสื่อสารรวมไปถึงด้านเทคโนโลยีด้านอาหารซึ่งเห็นได้ว่าทุกอย่างนั้นมีความเกี่ยวข้องกับเทคโนโลยีทั้งสิ้นและหนึ่งเทคโนโลยีที่สำคัญที่สุดในด้านวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์นั้นคือ เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ โดยที่เทคโนโลยีส่วนนี้มีผลอย่างมากด้วยอุปกรณ์ที่มีอยู่รอบตัวเราจะพบว่าหลายอย่างรอบตัวเราล้วนสร้างผลผลิตมาจากสารกึ่งตัวนำมากมาย โดยที่สารกึ่งนำนั้นมีความสามารถและทำให้เกิดผลดีของตัวอุปกรณ์มากมาย เช่น การทำงานที่รวดเร็ว การประหยัดพลังงาน การทำงานที่แม่นยำ เป็นต้น จึงทำให้สารกึ่งตัวนำนั้นมีการเลือกใช้ในการผลิตอุปกรณ์ต่างๆมากมาย ทำให้วิศวกรรมศาสตร์อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์นั้น มีการเปลี่ยนแปลงขึ้นอยู่กับทรัพยากรที่มีใช้ในอุตสาหกรรม โดยการผลิตอุปกรณ์ไอซี (IC) และอุปกรณ์ต่างๆ มีผลมาจากความต้องการที่จะพัฒนาในรูปแบบของวงจรและผลลัพธ์ของวงจรเป็นอย่างมาก เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จำเป็นต้องมีการทดสอบและทดลองอุปกรณ์เพื่อให้เกิดข้อผิดพลาดน้อยที่สุด ปัจจุบันมีหลากหลายวิธีในการตรวจสอบ เช่น โปรแกรมจำลอง (simulate) เครื่องวัดความละเอียดสูง เป็นต้นโดยการนำกระบวนการและเทคโนโลยีเหล่านี้มาใช้กับเทคโนโลยีการสื่อสาร โดยเฉพาะต่อสายขนส่งข้อมูลทำให้มีความเร็วสูงในการใช้รับ – ส่ง ข้อมูลโครงข่ายหรืออินเทอร์เน็ต เฉพาะส่วนการต่อข้อมูลเหล่านี้สัญญาณที่ใช้คือ แสง โดยแสงจะเข้าสู่เครื่องรับสัญญาณแสง ซึ่งในเครื่องรับสัญญาณแสงจะทำการเปลี่ยนสัญญาณแสงแสงให้ผู้รับข้อมูลเห็นเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

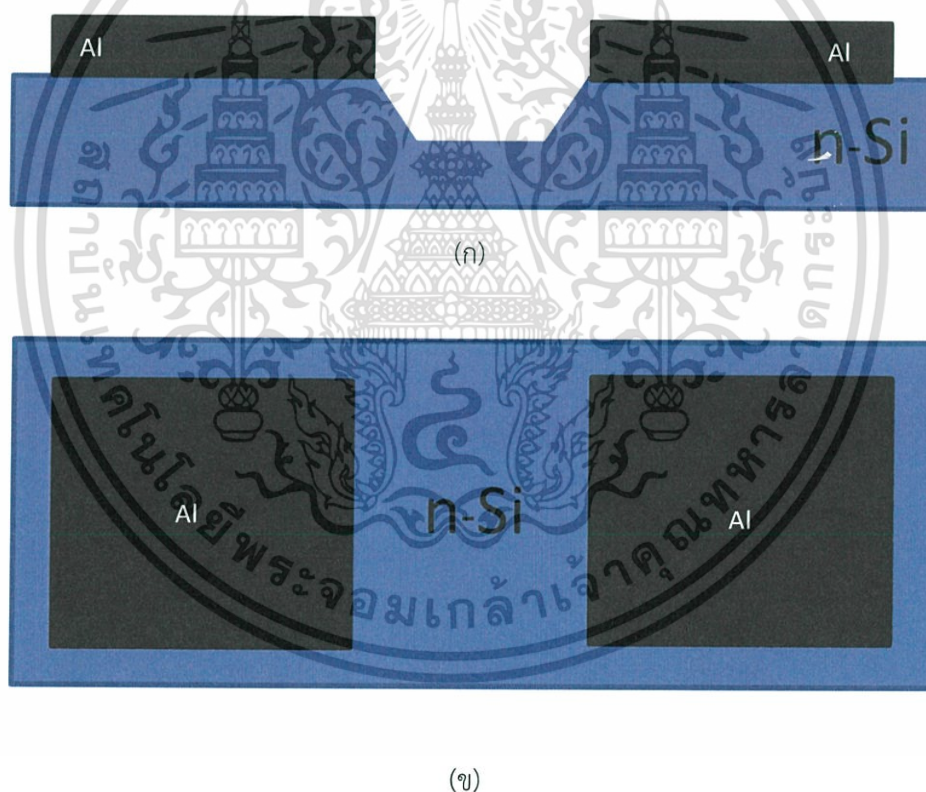
ในการสร้างอุปกรณ์รับข้อมูลทางสัญญาณแสงเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญมากหรืออาจจะเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่เปลี่ยนสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า ก่อนที่จะนำข้อมูลไปสู่ส่วนวงจรขยายต่างๆ ซึ่งโดยปกติสัญญาณแสงที่เครื่องรับปลายทางในระบบสื่อสารทางแสงจะมีขนาดของสัญญาณที่แตกต่างกันมากเมื่อเทียบกับสัญญาณเริ่มต้น และอาจมีการผิดเพี้ยนของสัญญาณเกิดขึ้นได้จากหลายสาเหตุ ดังนั้นในระบบสื่อสารทางแสงจึงต้องการ ตัวตรวจจับแสงที่มีประสิทธิภาพสูงหรือจะพูดอีกนัยหนึ่งคือ ต้องมีความไวในการรับสูงทำให้ผลตอบสนองต่อสัญญาณที่ดี รวดเร็ว โดยตัวตรวจจับมีอยู่หลายชนิดแตกต่างกันตามโครงสร้าง ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น โฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor) และโฟโตไดโอด (Photodiode) ซึ่งโฟโตไดโอดนี้เป็นตัวตรวจจับแสงที่ใช้สารกึ่งตัวนำเป็นส่วนสำคัญในการสร้าง ซึ่งทำให้โฟโตไดโอดมีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้ต่อเทคโนโลยีการสื่อสารด้วย โฟโตไดโอด (Photodiode) มีโครงสร้างที่นิยม

ใช้ในการสร้างวงจรรวม (IC) คือ โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Metal : MSM) เนื่องจากโครงสร้างแบบพลาแนร์ และเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างโฟโตไดโอดแบบพี – เอ็น ทั่วไป โครงสร้างแบบ MSM นั้น มีความได้เปรียบเทียบในหลายๆด้านมากกว่า เช่น ความจุไฟฟ้าที่ต่ำ กระแสมืดต่ำ การทำงานที่ดีกว่า และรวมไปถึงการทำงานที่มีความเร็วสูงอีกด้วย

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบหรือแบบพลาแนร์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อกระบวนการสร้าง ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างแบบพลาแนร์นั้นจะมีพื้นที่รับแสงจำกัดอยู่ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง การศึกษาครั้งนี้จึงมีแนวความคิดในการเพิ่มพื้นที่รับแสงซึ่งอยู่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยการกัดเป็นร่องรูปตัวยูโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งใช้กระบวนการกัดแบบเปียกด้วยสารละลายเตตระเมทิลอามโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือ TMAH ในการกัดบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงให้เป็นร่องรูปตัวยู โดยตั้งสมมติฐานได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่แสงนั้น มีผลต่อการเพิ่มคู่อิเล็กตรอน-โฮลในแถบตัวนำ ทำให้กระแสที่ได้นั้นควรมีค่าสูงขึ้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบพลาแนร์



รูปที่ 1.1 โครงสร้าง MSM ลักษณะ U-shape

(ก) ภาพตัดขวางโครงสร้าง MSM ลักษณะ U-shape

(ข) ภาพด้านบนโครงสร้าง MSM ลักษณะ U-shape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา

ในโครงการเรื่องนี้มีความมุ่งหมายในการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบ U-shape โดยนำข้อมูลสำหรับการทำการทดลองมาจากการศึกษากระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH มาใช้ต่อเพื่อสามารถกำหนดความลึกของแผ่นซิลิคอน แล้วนำอุปกรณ์ที่สร้างมาทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยมีวัตถุประสงค์ดังนี้

- ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-shape
- ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-shape
- ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ
- ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ที่ความเข้มแสงที่ 5,000-25,000 lux
- ศึกษาคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

1.3 สมมุติฐานของการศึกษา

จากการทำโครงการในครั้งนี้ มีความต้องการที่จะศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al แบบ U-shape โดยใช้สารละลาย TMAH โดยทำให้มีการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางกายภาพทำให้มีพื้นที่รับแสงมากขึ้น โดยเมื่อทำการสร้างเสร็จสิ้นจะนำชิ้นงานไปวัดและวิเคราะห์เพื่อมีแนวทางและแนวโน้มต่างๆ เพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงตัวต่อไป โดยมีสมมุติฐานว่าจะมีผลดังนี้

การเลือกใช้สารละลาย TMAH ในการกัดซิลิคอนทำให้ในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบมีกระแสรั่วลดลง เพราะสารละลาย TMAH จะไม่ทิ้งประจุไว้ในแผ่นซิลิคอน

ทำการทดลองลักษณะกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู มีแสงตกกระทบ โดยมีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในช่วง 5,000 – 25,000 lux เพื่อทดสอบการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง กระแสแสงจะเพิ่มมากขึ้น เพราะพื้นที่ให้แสงมาตกกระทบของแบบ U-shape มีพื้นที่ให้แสงมาตกกระทบมากกว่าแบบพลาแนร์ประมาณ 1.5-1.7 เท่า [7]

1.4 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ ต้องสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-shape เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-shape

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และศึกษาผลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยวางขอบเขตงานวิจัยไว้ดังนี้

ทำการศึกษาคำตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู หรือ UMSM หลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น หนา (100) ความหนาของแผ่นซิลิคอน 625 μm และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้จะสร้างลักษณะของขั้วไฟฟ้าขนาด $1\times 1\text{ mm}^2$ มีความหนาของชั้นอลูมิเนียม 2 μm และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า มีขนาด 40 μm โดยใช้กระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก ในกระบวนการกัดร่องรูปตัวยู จะใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl Ammonium Hydroxide:TMAH) กัดแผ่นผลึกซิลิคอน รวมทั้งกระบวนการต่างๆในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบ U-shape

จากนั้นทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาเนอร์ และแบบร่องรูปตัวยู เพื่อการเปรียบเทียบกัน ของระหว่างทั้งสองแบบ แบบพลาเนอร์ เป็นแบบที่ทำกันอยู่แล้ว แต่แบบร่องรูปตัวยูเป็นแบบนำมาเปรียบเทียบเพิ่มพื้นที่แสงตกกระทบหน้า จะทำให้ได้ผลดีกว่าในกระแสที่จะได้ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al มีลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ที่ไม่มีแสงตกกระทบ กับที่มีแสงมาตกกระทบ ที่ให้ความเข้มแสง 5,000-25,000 lux และลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

1.5 ขั้นตอนของการศึกษา

- 1.ศึกษาทฤษฎีตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM
- 2.ศึกษาทฤษฎีกระบวนการสร้างและออกแบบตัวตรวจวัดแสง
- 3.ศึกษาทฤษฎีและเปรียบเทียบตัวตรวจวัดแสงแบบพลาเนอร์ และแบบ U-shape
- 4.ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด AL/n-Si/Al แบบ U-shape
- 5.ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาเนอร์ และแบบ U-shape

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

จากการทดลองและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง AL/n-Si/Al แบบ U-shape นั้นได้ใช้เทคโนโลยีในการสร้างวงจรรวม(IC) และได้ศึกษาเทคโนโลยีแบบใหม่คือ ไมโครเทคโนโลยี (micro-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

electronics-mechanical-system) ได้นำข้อมูลมาใช้ในกระบวนการสร้าง นอกจากนี้ได้ทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง โดยหลักการวัดโดยแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ เมื่ออุปกรณ์ได้รับแสงและเมื่ออุปกรณ์อยู่ในความมืด โดยทางผู้จัดทำโครงการได้ศึกษาและทำให้เกิดประโยชน์ดังนี้

1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
2. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู
3. ความรู้ความเกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบร่องรูปตัวยู

โครงการเล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีตัวตรวจวัดแสง กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่องรูปตัวยู วัตถุประสงค์ สมมุติฐาน ขอบเขตของโครงการ ขั้นตอนของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการทำโครงการในครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง จะกล่าวถึงทฤษฎีตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และขณะได้รับแสงตกกระทบ การกักในรูปแบบต่างๆ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการสร้าง ทฤษฎีเกี่ยวกับการกระบวนการต่างสร้างต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการสร้างให้เป็นร่องรูปตัวยู

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง จะกล่าวถึงการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบ การเลือกเงื่อนไขในงานวิจัย และกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วย ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพ ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลอง และแนวทางในการพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (U-Shape) หรือ UMSM บนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยใช้กระบวนการกัดเปียก (Wet Etching) แบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ในกระบวนการกัดร่องรูปตัวยู จะใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl Ammonium Hydroxide:TMAH) กัดแผ่นผลึกซิลิคอน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อขั้ว รวมทั้งกระบวนการกัดแบบเปียกของแผ่นผลึกซิลิคอน

โครงสร้าง MSM หรือโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มของขั้วต่อขั้วต่อขั้ว โดยมียุทธศาสตร์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสขั้วต่อขั้วต่อขั้ว 2 รอยสัมผัส มีคุณสมบัติเด่น คือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างที่ง่ายต่อกระบวนการสร้าง และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM อย่างหลากหลาย ซึ่งงานวิจัยที่เคยทำมาแล้วส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างแบบพลาเนอร์

2.1 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อสารกึ่งตัวนำได้รับแสงแล้วเกิดกลไกภายในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประกอบไปด้วย การดูดกลืนแสงของพลังงานที่ตกกระทบแล้วทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

2.1.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานทางแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้เรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 390 – 700 nm โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” โดยปรากฏการณ์ที่แสงแสดงลักษณะสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห และการแทรกสอด เป็นต้น แต่ในฟิสิกส์ควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสงดังสมการที่ 2.1 และ 2.2

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

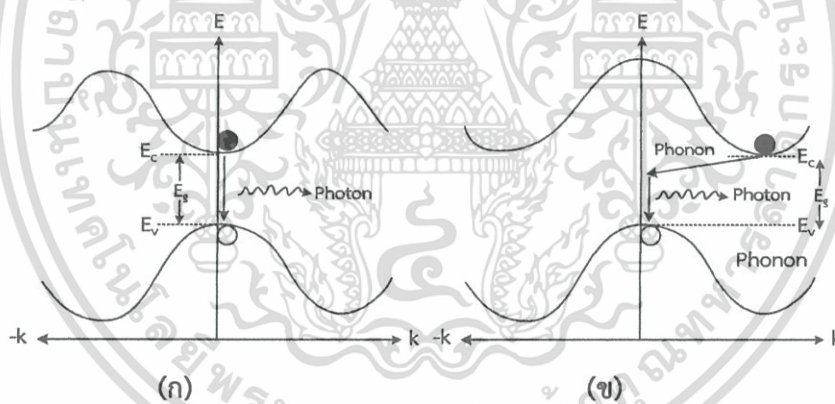
หรือ

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

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 ($E_{\text{photon}} > E_g$ (semi)) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง ส่วนกรณีที่ $E_{\text{photon}} < E_g$ (semi) การดูดกลืนแสงจะไม่เกิดขึ้น

2.1.2 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง



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

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) คือเมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้เป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงผลึก คือไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้คือ แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs), อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs), อินเดียมฟอสไฟต์ (InP) สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านแสง (optical devices) เช่นตัวตรวจจับแสง ไดโอดเปล่งแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เลเซอร์ไดโอดเป็นต้น และสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ไม่ตรงตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรือ อยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากันกับจุดต่ำสุดของแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับ พลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน จึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของ แถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้เป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยจะต้องมีการเปลี่ยนแปลง ค่าโมเมนตัมก่อน ซึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ก่อน แล้วจึงลดลงมายังแถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาใน รูปของความร้อน จึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น ในทำนองเดียวกันพลังงานโฟตอนจากแสงก็ไม่สามารถ กระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดในแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดในแถบนำได้ดั่งง่าย ถึงแม้ว่า พลังงานโฟตอนจะมีค่ามากก็ตาม แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยน สถานะ ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้คือ ซิลิคอน (Si) และ เยอรมันเนียม (Ge) การดูดกลืนหรือ คายพลังงานแสงของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้เกิดขึ้นได้ยากและไม่ดีนัก จึงไม่นิยมนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ ทางด้านแสง แต่ตัวตรวจวัดแสงยังคงมีการใช้งานอยู่โดยเฉพาะซิลิคอน เนื่องจากมีราคาถูก และวัสดุมี จำนวนมาก โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สามารถอธิบายถึงสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง และสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง ได้เป็นอย่างดีคือกราฟ E-k diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.1

2.1.3 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

การทำงานของอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์เกือบทุกชนิดขึ้นอยู่กับพื้นฐานการเกิดและ หายไปของคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลไกการเกิดจะนำไปสู่กระบวนการให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ แล้วทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า ในขณะที่เดียวกันจะเหลือ โฮลไว้ในแถบวาเลนซ์ วิธีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ง่ายที่สุดคือ การให้พลังงานแก่สารกึ่งตัวนำได้แก่ แสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานมากพอ เมื่อพลังงานนี้ตกกระทบสารกึ่งตัวนำและจะถูกดูดกลืนเข้าไปใน สารกึ่งตัวนำ จากนั้นจะมีการถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนจนสามารถกระโดดขึ้นไปยังแถบนำ ไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงถูกเรียกว่า กระบวนการดูดกลืนแสง (absorption process) ในทาง กลับกันถ้าอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าเกิดการสูญเสียพลังงานไป แล้วตกกลับมาที่แถบวาเลนซ์ ทำ ให้อิเล็กตรอน-โฮลหายไป เรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการรวมตัวใหม่ (recombination process)

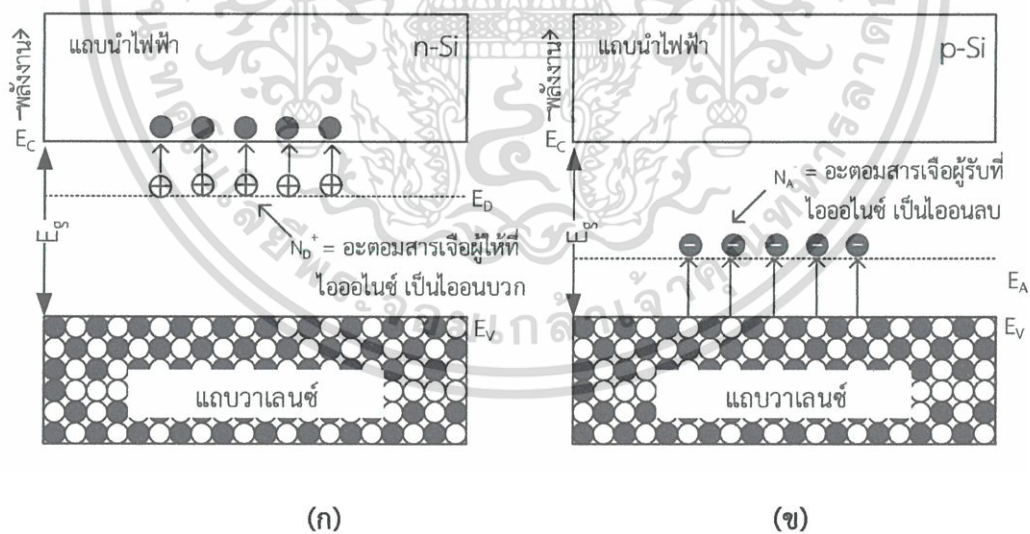
ในกรณีของซิลิคอนแสงจะต้องมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นจากสมการที่ 2.2 ความยาวคลื่นแสงจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1110 nm ดังตารางที่ 2.1 และความยาวคลื่นสูงสุดที่ทำให้ เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (long wavelength cutoff : λ_{max})

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

วัสดุ	ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	ความยาวคลื่นที่ใช้โดยทั่วไป (nm)
Si	1.12	500-900
Ge	0.67	900-1300
GaAs	1.43	750-850

ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการแพร่อะตอมสารเจือเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เช่น สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่มีระดับผู้ให้ (donor level : E_D) เกิดขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ($E_{g, si} = 1.12$ eV) อะตอมสารเจือดังกล่าวจะสามารถให้อิเล็กตรอนเป็นไอออนบวกโดยการให้อิเล็กตรอนแก่แถบนำไฟฟ้า

ในส่วนของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดพี (p-Si) จะเกิดระดับผู้รับ (acceptor level : E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงานจากการเติมอะตอมสารเจือ และเมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอกเพียงเล็กน้อยสามารถขึ้นไปอยู่ที่ระดับ E_A ได้ ส่งผลให้อะตอมสารเจือเกิดการให้อิเล็กตรอนเป็นไอออนลบจากการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ข)



รูปที่ 2.2 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรินซิค
(ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี

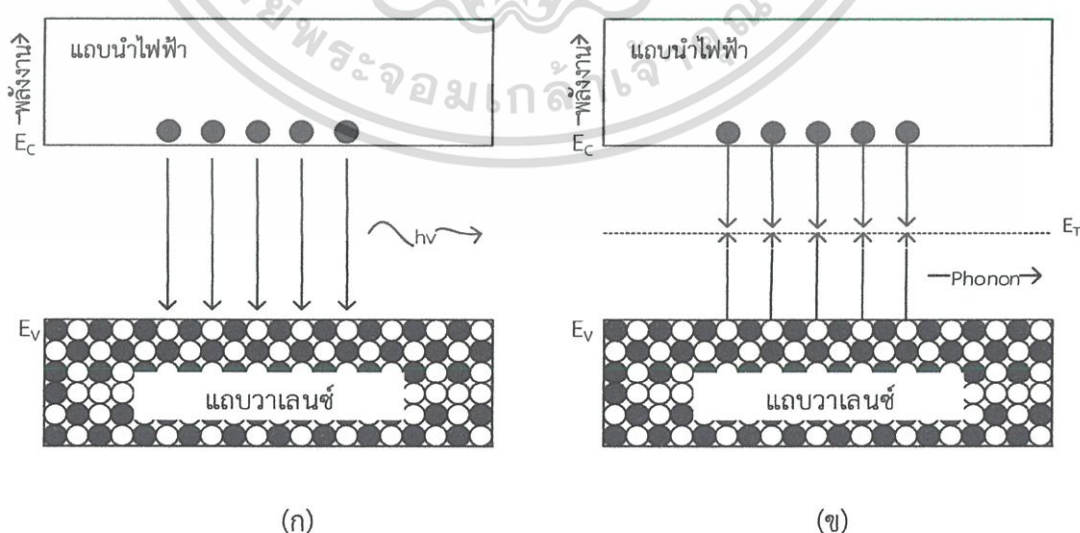
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.3.1 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การรวมตัวใหม่ (recombination) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้พาหะ คือ โฮล และอิเล็กตรอนหายไป เนื่องจากการชนกันกับแลตทิซ (lattice) ในผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่ และการเกิดของพาหะ (recombination and generation process) สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้มีคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้น และมีการรวมตัวอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน โดยทั่วไปกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กระบวนการหลัก คือ

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสง หรือโฟตอนได้ง่าย

(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่เหนือช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.3 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงาน เป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ หรืออะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากโครงสร้างของผลึกเสียหาย โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center) ในกระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้มีการสั่นของแลตทิซได้ และการสั่นของแลตทิซ จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงาน เรียกว่า โฟนอน (phonon) ออกมาในที่สุด



รูปที่ 2.3 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง (ข) แบบโดยอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

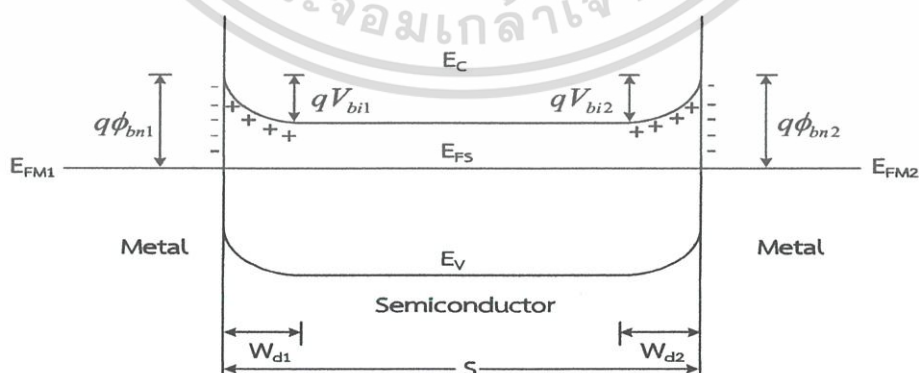
2.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ย

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแสง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในด้านภาพและแสงอย่างกว้างขวาง มักเป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ กล้องถ่ายรูป โทรทัศน์ เครื่องฉาย (Projector) รวมไปถึงระบบสัมผัสต่างๆ นอกจากนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจจับความร้อน (Thermal detector) โดยอาศัยการเปลี่ยนแสงที่มีความยาวคลื่นอินฟราเรดให้กลายเป็นภาพความร้อน (Thermal picture) หรือภาพที่แสดงอุณหภูมิของวัสดุต่างๆ

โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยซึ่งประกอบไปด้วยสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยนั้นมีคุณสมบัติเด่นคือ มีเสถียรภาพที่ดี กระแสมืดต่ำ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาแนร์ กระบวนการสร้างง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถนำไปใช้ทางด้านงานภาพและแสงได้อย่างกว้างขวาง จึงทำให้ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้าง หลักการทำงาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ย

2.2.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยในสภาวะสมดุล

แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ย ในสภาวะสมดุลความร้อน แสดงดังรูปที่ 2.4 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ชนิดซีดตีก็ยของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ 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

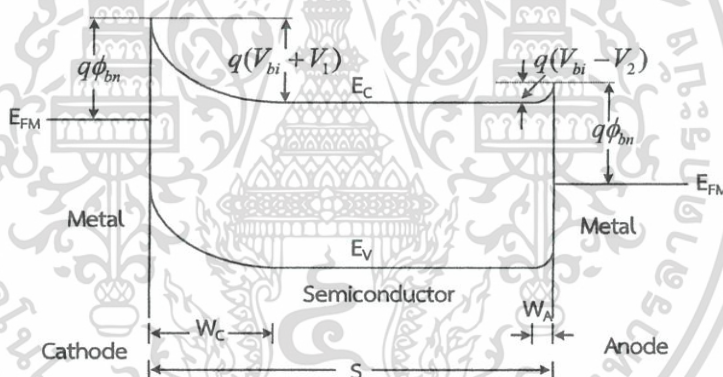


รูปที่ 2.4 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยในสภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.5 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ชนิดกึ่งขั้วไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้ว ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้ว โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้ว จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก

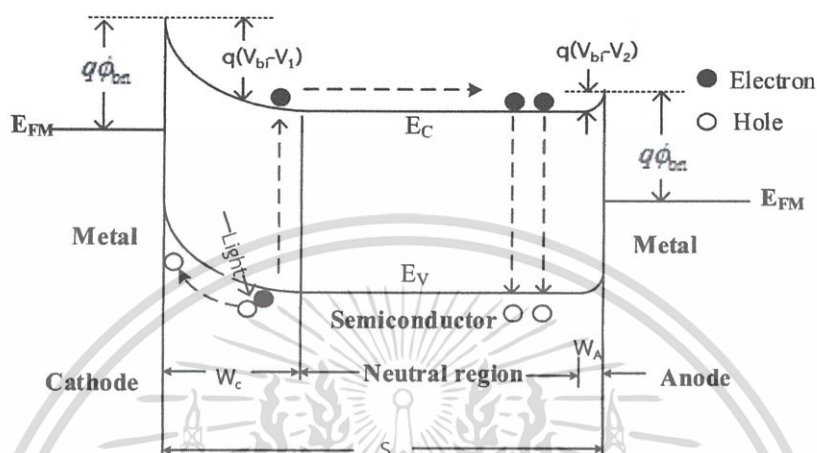


รูปที่ 2.5 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้วเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งขั้ว กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้มีความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณปลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

2.2.3 โครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็นเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบบ

เมื่อโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็นได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบบ

เมื่อแสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล

โดยที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) ของตัวตรวจวัดแสงจะเป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด (W_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านแอนโนด (W_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.3

$$W_T = W_C + W_A \quad (2.3)$$

โดยที่

$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.4)$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.5)$$

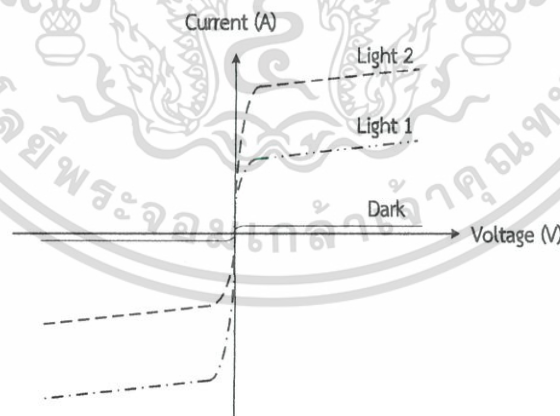
จากสมการ(2.4) และ(2.5)

W_d คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิททิวิตีของสารกึ่งตัวนำ

V_{bi} คือ แรงดันภายใน V_A คือ แรงดันไบอัส

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

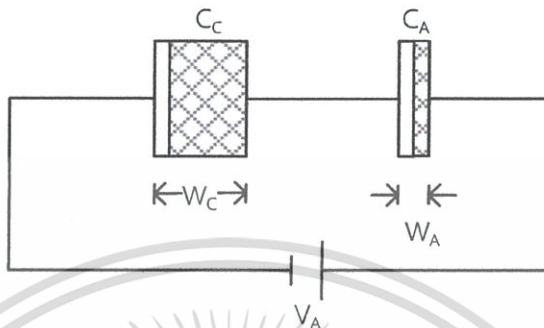
ลักษณะสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่ถูกพิจารณา คือ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และ ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยในรูปที่ 2.7 เป็นลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อกัน เมื่อได้รับความเข้มแสงตกกระทบบมีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อได้รับค่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบ

ส่วนลักษณะสำคัญของค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง คือ ความจุไฟฟ้าที่มีความสมมาตรกัน โดยค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบอัส โดยเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง โดยค่าความจุไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งความจุไฟฟ้า

รวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านคาโทด (C_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านอานอด (C_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.6 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงดันภายในและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตติย เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ

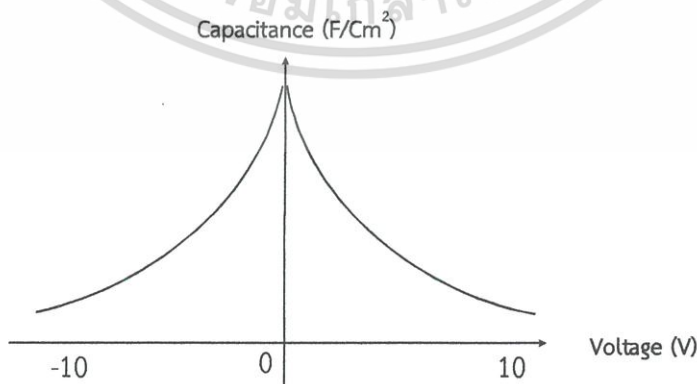
$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \tag{2.6}$$

โดยที่

$$C_C = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \tag{2.7}$$

$$C_A = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \tag{2.8}$$

และในรูปที่ 2.8 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตติยที่มีลักษณะสมมาตรกันและเมื่อได้รับแรงดันไบอัสความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตติย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 กระบวนการกัด

กระบวนการกัดโดยทั่วไปจะเป็นการสร้างลวดลายวงจรในงานอิเล็กทรอนิกส์จะมีกระบวนการกัดมีสองประเภทคือ การกัดแบบเปียก (wet etching) และการกัดแบบแห้ง (dry etching) เมื่อทำการกัดผิวหน้าของวัสดุด้วยสารเคมีหรือก๊าซแล้วนั้นจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุมีลักษณะเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอในทุกทิศทาง หรือแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอในทิศทางของระนาบ การกัดแบบเปียกมักจะมีอัตราการกัดที่เร็วกว่าการกัดแบบแห้งและสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดได้โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันหรือความเข้มข้นของสารขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน

2.3.1 กัดเปียก (wet etching)

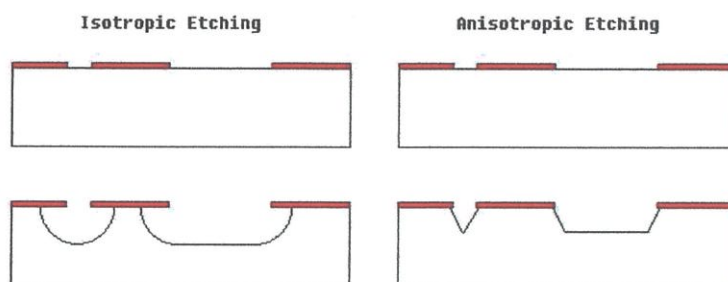
ในการกัดเปียกยังแบ่งได้อีกสองแบบคือ การกัดแบบไอโซทรอปิก (isotropic) และการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic)

2.3.1.1 กัดเปียกแบบไอโซทรอปิก (isotropic)

Isotropic etchants กัด crystallographic ที่อัตราการกัดในระนาบทิศทางเดียว มักจะมีฤทธิ์เป็นกรด เช่น "HNA" เป็นส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (HF), กรดไนตริก (HNO₃), และกรดอะซิติก (CH₃COOH) และนำไปสู่คุณลักษณะของ isotropic จะมีลักษณะโค้งในผลึกซิลิคอนเดี่ยว อัตราการกัดโดยทั่วไปคือหลายไมครอนต่อนาที มันจึงถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการกำจัดพื้นผิวโดยการทำให้พื้นผิวได้รับความเสียหาย จากการกัดและหายไปจากเดิม

2.3.1.2 กัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic)

Anisotropic etchants อัตราการกัดจะเร็วมากในบางระนาบมากกว่าในระนาบอื่นๆ ผลึกของซิลิคอนที่กัดช้าที่สุดเป็นระนาบที่ใช้ระยะเวลาในการกัดมากกว่าปกติ คือระนาบ (111) อัตราการกัดสามารถอธิบายความโครงสร้างผลึกของซิลิคอน อัตราปกติในการกัดเป็น 1 μ m/นาที รูปที่ 2.6 ด้านล่างเป็นโครงร่างสำหรับก่อนทำการกัดและหลังทำการกัดของทั้งแบบ isotropic และ anisotropic



รูปที่ 2.10 เปรียบเทียบการกัด ของ isotropic (ซ้าย) และ anisotropic (ขวา) เป็นฟังก์ชันของเวลา รูปบนสุดเป็นพื้นผิวก่อนที่จะกัด และ รูปด้านล่างมีการกัด isotropic etchant และ anisotropic etchant

โดยทั่วไปสำหรับกัดเปียกแบบ anisotropic etchants สารละลายที่ใช้ในการกัดมีฤทธิ์เป็นต่างไฮดรอกไซด์ เช่น KOH , Ethylene Diamine Pyrochatechol (EDP) และ tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) ลำดับปฏิกิริยาเป็นลำดับต่อไปนี้

เมื่อ $Si(OH)_4$ สามารถหลุดออกมาจากพื้นผิวได้โดยการแพร่แต่ในอเล็กโทรไลต์จะไม่เสถียร เนื่องจากค่าความเป็นกรด - ด่างนั้นมีสูงในสารละลายอธิบายดังสมการที่ 2.9 อิเล็กตรอนในแถบการนำ (Conduction band) สามารถถ่ายโอนไปยังโมเลกุลของน้ำในสมการที่ 2.10 และ 2.11



การเกิดไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) และไฮโดรเจน (H) ในสมการที่ 2.12 ผลมาจากอะตอมของซิลิคอนมีการออกซิไดซ์คือ OH^- หลังจากนั้นจึงอะตอมของซิลิคอนก็จะหลุดออกจากพื้นผิว เป็นผลให้อัตราการกัดซิลิคอนขึ้นกับความเข้มข้นของ OH^- สมการที่ 2.13



สารละลาย TMAH ที่เติมน้ำลงไปทำให้ค่าความเป็นกรด - ด่างลดลง ทำให้อัตราการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนลดลงด้วย ไฮดรอกไซด์ไอออนจำนวนมากในสารละลายอาจจะไม่มีส่วนช่วยในกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนเมื่อเติมน้ำมากเป็น 3, 4 และ 5 เท่าของสารละลาย ไฮดรอกไซด์ไอออนจำเป็นต่อการกัดซิลิคอนมากและน้ำที่ผสมในสารละลายจะช่วยในการแยกตัวของไฮดรอกไซด์ไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

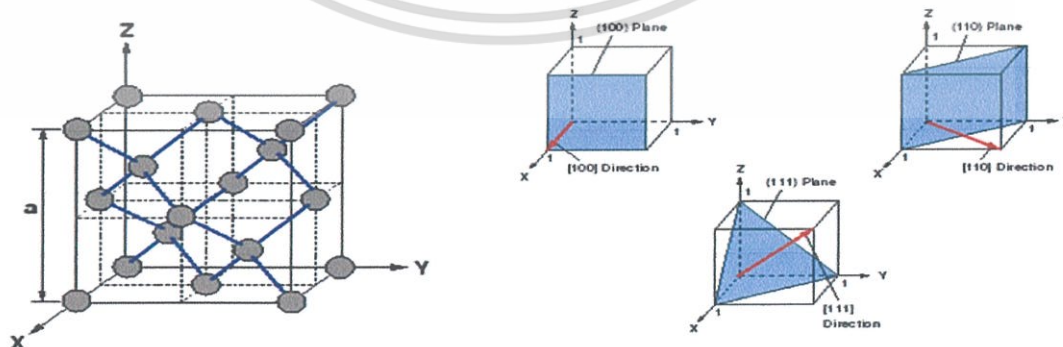
อะตอมของซิลิคอนจะออกซิไดซ์ โดย OH^- แล้วเอาออกจากพื้นผิวที่แสดงผลอัตราการกัดของซิลิคอนขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ OH^- เราสามารถปรับค่า ความเป็นกรด-ด่าง ของสารละลายในการแก้ปัญหาการเปลี่ยนแปลง อัตราการกัดโดยอาศัยของแนวของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ทำให้ผลึกของซิลิคอนโดนกัดเป็นร่องรูปตัวยู

2.2.1.2.1 กระบวนการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic)

การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) ได้กลายเป็นเทคโนโลยีสำคัญในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำจากซิลิคอน กระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) คือ กระบวนการที่สารละลาย (etchant) กัดเนื้อสารซิลิคอนในแต่ละระนาบของผลึกซิลิคอน ไม่เท่ากันหรือกล่าวได้ว่าอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของผลึก ซิลิคอนมีโครงสร้างผลึกแบบเพชร (diamond) ในผลึกแบบเพชรทิศทางการกัดจะตั้งฉากกับระนาบของผลึกเสมอ ซึ่งตำแหน่งและการวางตัวและทิศทางของระนาบ (100) (110) และ (111) การที่มีอัตราการกัดในระนาบหนึ่งของผลึกเร็วกว่าอีกระนาบหนึ่ง เป็นผลมาจากความหนาแน่นของการจัดเรียงอะตอมของผลึกซิลิคอนในระนาบต่างๆ ไม่เท่ากัน

สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ สารละลาย Tetramethyl ammonium Hydroxide และ น้ำปอลดประจุ มีชื่อย่อว่า (TMAH) เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดแบบ anisotropic อัตราการกัดของ (TMAH) ในผลึกซิลิคอนในระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ $(100) > (110) > (111)$

เนื่องจากสารละลาย TMAH เป็นสารละลายที่ทำการกัดแบบ anisotropic โครงสร้างของสารละลาย TMAH ต้องเพิ่มอุณหภูมิช่วยในการกัดระนาบของซิลิคอน เพื่อให้สารละลาย TMAH ทำการกัด ควรรู้ว่าโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือแบบเพชรมีค่าคงที่ของโครงตาข่ายประกอบเท่ากับ 5.43Å เป็นโครงสร้างแบบ Face Centred Cubic (FCC) แต่มีอะตอมสองอะตอมในหน่วยเซลล์ ในรูปที่ 2.11 โครงตาข่ายประกอบอะตอมของซิลิคอนและ ระนาบต่างๆของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.11 ด้านซ้ายโครงตาข่ายประกอบ Fcc ของซิลิคอน ด้านขวาเป็นระนาบต่างๆของซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

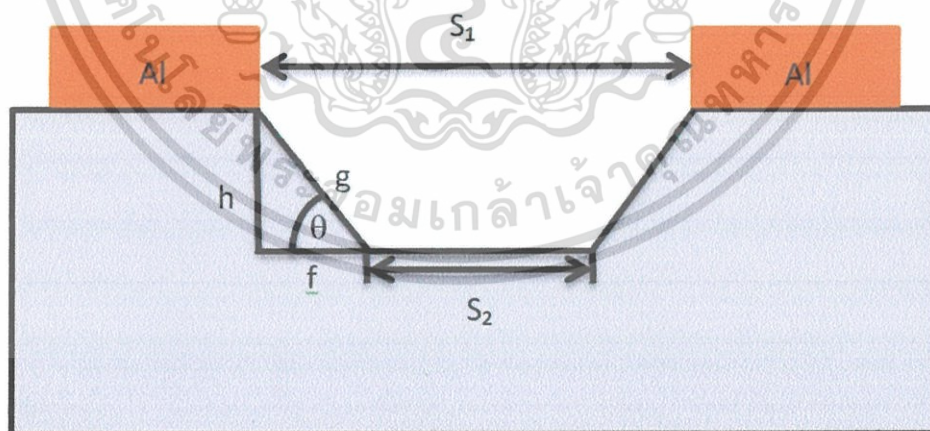
ในระนาบต่างๆของซิลิกอน จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปจำนวนพันธะที่ถูกกัด และจำนวนพันธะที่ถูกดึงออกสู่สารละลายชั้นต่อไปไม่เท่ากันกล่าวคือ

(1) ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ

(2) ระนาบ (111) จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้านี้นี้จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด

ในเชิงพาณิชย์เวเฟอร์ซิลิกอนที่ใช้ได้ในระนาบ (100) และ (110) ขึ้นอยู่กับในการวางแผนของผิวแผ่นเวเฟอร์ งานวิจัยที่ใช้ส่วนใหญ่คือ (100) แผ่นเวเฟอร์ชนิดนี้ มีระนาบคือ (100) ดังนั้นระนาบ (111) ทำมุมเป็น 54.74 องศา กับพื้นผิวของแผ่นเวเฟอร์

หลุมที่เกิดจากการกัดเมื่อเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ไม่เหมือนกัน จะมีความแตกต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการกัดช้าที่สุด สำหรับแผ่นผลึกซิลิกอนระนาบ (100) ถ้าเปิดช่องเลือกกัดเป็นวงกลม หลุมที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังแปดด้าน ผนังสี่ด้านเอียงทำมุม 54.74 องศาขนานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ ระนาบนั้นคือระนาบ (111) และยังมีระนาบ (100) ร่วมกันประกอบเป็นผนัง แต่ถ้าเปิดบริเวณเลือกกัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านทั้งสี่ขนานกับทิศทาง $\langle 110 \rangle$ จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (111) ทั้งหมด พื้นที่หลุมจะเป็นระนาบ (100) โดยความสัมพันธ์ของเลขาคณิตที่แน่นอนของระนาบ (100) และระนาบ (111)



รูปที่ 2.12 แสดงการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$S1 = S2 + \frac{2h}{\tan(54.74^\circ)} \cong d + \sqrt{2}h \quad (2.14)$$

$$h = Rt \quad (2.15)$$

$$\sin(54.74) = \frac{h}{g} \quad \cos(54.74) = \frac{f}{g} \quad \tan(54.74) = \frac{h}{f} \quad (2.16)$$

จากสมการที่ (2.14) , (2.15) และ(2.16)

D คือ ขนาดของความกว้างของปากหลุม d คือ ขนาดของความกว้างในหลุม

h คือ ขนาดความลึกของหลุม R คือ อัตราการกัดในแนวตั้งของซิลิคอน

t คือ เวลา

f คือ ขนาดของด้านซิดมุม 54.74

g คือ ด้านเอียงทำมุม 54.74

2.3.2 กัดแห้ง

กัดแห้งในกระบวนการนี้ สารเคมี หรือส่วนผสมบางซึ่เข้าไปในห้องความดันต่ำในระยที่พลาสมา การตอบสนองแล้วกับตัวอย่างสารเคมี หรือทางกายภาพ รูปแบบการกัดอาจเป็นเหมือนกับแบบไอโซทรอปิก isotropic หรือ ทิศทางการกัด กลไกการกัดและส่วนประกอบของสารเคมี โดยการปรับความดันหรือส่วนประกอบของส่วนผสมในห้อง เราสามารถใช้กัดแห้งการกัดวัสดุต่าง ๆ สามารถควบคุมอัตราการกัดได้ มักจะกัดแห้งโดยใช้มาร์คชั้นบนสุดซึ่งจะใช้เป็นรูปแบบสำหรับรูปแบบการกัดต่อไปนี้ ดังกล่าวข้างต้น เป็นกลไกของการกัดที่ทำให้เกิดอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมี และ แพร่คุณสมบัติอาจแตกต่างกันมาก ดังนั้นมีอยู่หลายวิธีการทำจำนวนมาก micromachining ตารางที่ 2.2 แสดงการเปรียบเทียบ etchants ต่าง ๆ ในแบบทั่วไป เงื่อนไขของคุณสมบัติสำคัญมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบโดยทั่วไปเป็นกลุ่ม etchants ซิลิคอน

	Alkali Base	EDP	TMAH	XeF ₂	DRIE
Etch Type	wet	wet	wet	dry	dry
Anisotropic?	yes	yes	yes	no	yes
Si ER(m/min)	1 to 2	0.02 to 1	1	1	>1
Si Roughness	low	low	variable	high	low
Nitride Etch	low	low	1 to 10 nm/min	-	low
Oxide Etch	1 to 10 nm/min	1 to 80 nm/min	1 nm/min	low	low
Al Selective	no	no	yes	yes	yes
Au Selective	yes	yes	yes	yes	yes
p++ Etch Stop	yes	yes	yes	no	no
Electrochem ical Stop	yes	yes	yes	no	no
IC Compatible	no	yes	yes	yes	yes
Cost	low	moderate	moderate	moderate	high
Safety	moderate	low	high	moderate	high

2.4 สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

สารละลายที่มักใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก คือ KOH , Ethylene Diamine Pyrochatechol (EDP) และ tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) แต่ในการทดลองนี้ใช้สารละลาย TMAH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

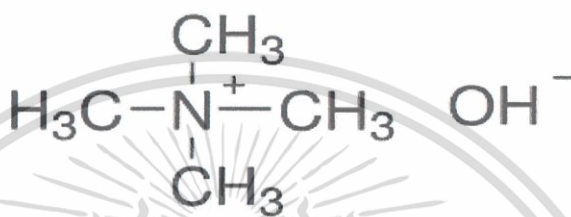
ตารางที่ 2.3 TMAH อัตราการกัดแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ นั้น ขึ้นอยู่กับทิศทางอัตราของสารละลาย TMAH กัดซิลิคอนองค์ประกอบ อุณหภูมิ เปอร์เซ็นต์ของส่วนต่างๆ

Etchant	Temperature (°C)	Direction (plane)	Etchrate ($\mu\text{m min}^{-1}$)	Remarks
5% TMAH : 95% H ₂ O	60	(100)	0.33	
	70		0.48	
	80		0.87	
	90		1.4	
	60	(111)	0.026	
	90		0.034	
10% TMAH : 90% H ₂ O	60	(100)	0.28	
	70		0.41	
	80		0.72	
	90		1.2	
2% TMAH : 98% H ₂ O	80	(100)	0.65	
		(111)	0.41	
5% TMAH : 95% H ₂ O	80	(100)	0.63	
		(111)	0.013	
10% TMAH : 95% H ₂ O	80	(100)	0.57	
		(111)	0.014	
22% TMAH in H ₂ O	90	(100)	0.9	(110) เป็นระนาบที่เร็วที่สุดโดยไม่ต้องการแรงตึงผิว
		(111)	0.018	
22% TMAH in H ₂ O + 0.5% surfactant	90	(100)	0.6	(100) ได้เร็วที่สุดด้วยสารลดแรงตึงผิว
		(110)	0.12	
		(111)	0.01	
22% TMAH in H ₂ O + 1% Surfactant	90	(100)	0.6	ลดแรงตึงผิว
		(110)	0.1	อิมพัลส์
		(111)	0.009	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 สารละลาย Tetramethyl ammonium Hydroxide (TMAH)

การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนให้เป็นรูปร่าง (U-shape) โดยใช้สารละลาย Tetramethyl ammonium Hydroxide (TMAH) เป็น quaternary ammonium salt ด้วยสูตรทางเคมี $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ ถูกใช้งานอย่างแพร่หลายในกระบวนการกัดและกระบวนการขึ้นลวดลายในระดับไมครอนและนาโน สารละลาย TMAH เป็นของเหลวที่มีสีออกฟางซีดๆ และมีกลิ่นของแอมโมเนียอย่างรุนแรง แต่สารละลาย TMAH ที่บริสุทธิ์มากแทบจะไม่มีกลิ่นเลย TMAH จะละลายในน้ำ 100% และมีโครงสร้างทางเคมีดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 โครงสร้างทางเคมีของสารละลาย TMAH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

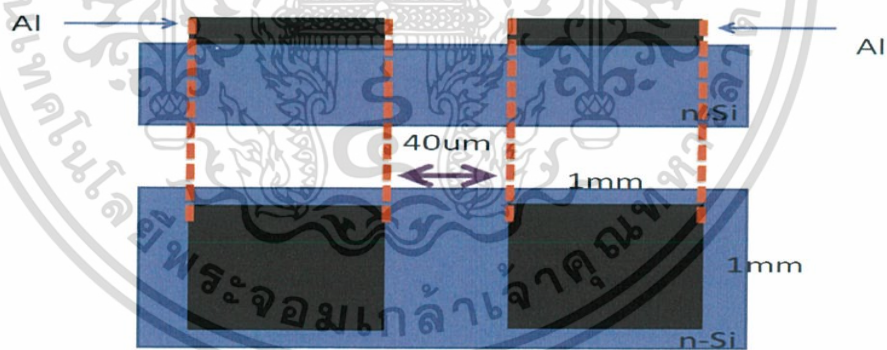
บทที่ 3

การทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด Al/n-Si/Al บนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) ความหนาของแผ่นซิลิคอน 625 μm และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้จะสร้างลักษณะของขั้วไฟฟ้าขนาด $1\times 1\text{ mm}^2$ มีความหนาของชั้นอลูมิเนียม 2 μm และกำหนดให้ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (electrode spacing : S) มีขนาด 40 μm จากนั้นจะนำตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนรีไปกัดร่องลึกด้วยกระบวนการกัดแบบเปียก โดยใช้สารละลาย TMAH มีอัตราส่วนระหว่าง TMAH:H₂O:Si ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ก็จะได้ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-Shape หรือ U-MSM

3.1 กระจัดต้นแบบตัวตรวจวัดแสง

ลวดลายกระจัดต้นแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตัดก็ยโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสขั้วต่อตัดก็ย 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ $1\times 1\text{ mm}^2$ มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านมีขนาด 40 μm ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงลวดลายกระจัดต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตัดก็ย



รูปที่ 3.1 ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ $1\times 1\text{ mm}^2$

มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านมีขนาด 40 μm



รูปที่ 3.2 ลวดลายกระจัดต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตัดก็ย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาด เพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะทำการเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด และถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาด อาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลงได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อัลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization:DI) เป็นเวลา 5 นาที เพื่อกำจัด ฝุ่นละออง

- จุ่มใน DI แก้ว 1
- เป่าแห้งด้วยก๊าซเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน (N₂)
- ต้มในกรดปิรันย่า (3H₂SO₄+H₂O₂) เพื่อกำจัดเศษโลหะ
- เปิดน้ำ DI ไหลผ่าน 5 นาที
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มไนไตรโคโลเอทรีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกคราบ

ไขมัน

- Ultrasonic ในอะซิโตน (Acetone) 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

3.3 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงานเพื่อสร้าง ลวดลายขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระจกต้นแบบ ที่เรียกว่า โฟโตมาสก์ (photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็น ลวดลายบนฟิล์มกระจก ที่ได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์จะสามารถทะลุ ผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้น ของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้นจะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่น ผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้น ของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวอะลูมิเนียม จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นอะลูมิเนียมบริเวณนี้ถูกกัด ออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นอะลูมิเนียมขึ้นตามลวดลายที่เรา ออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปิน
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (mask aligner) ใช้เวลาในการฉาย

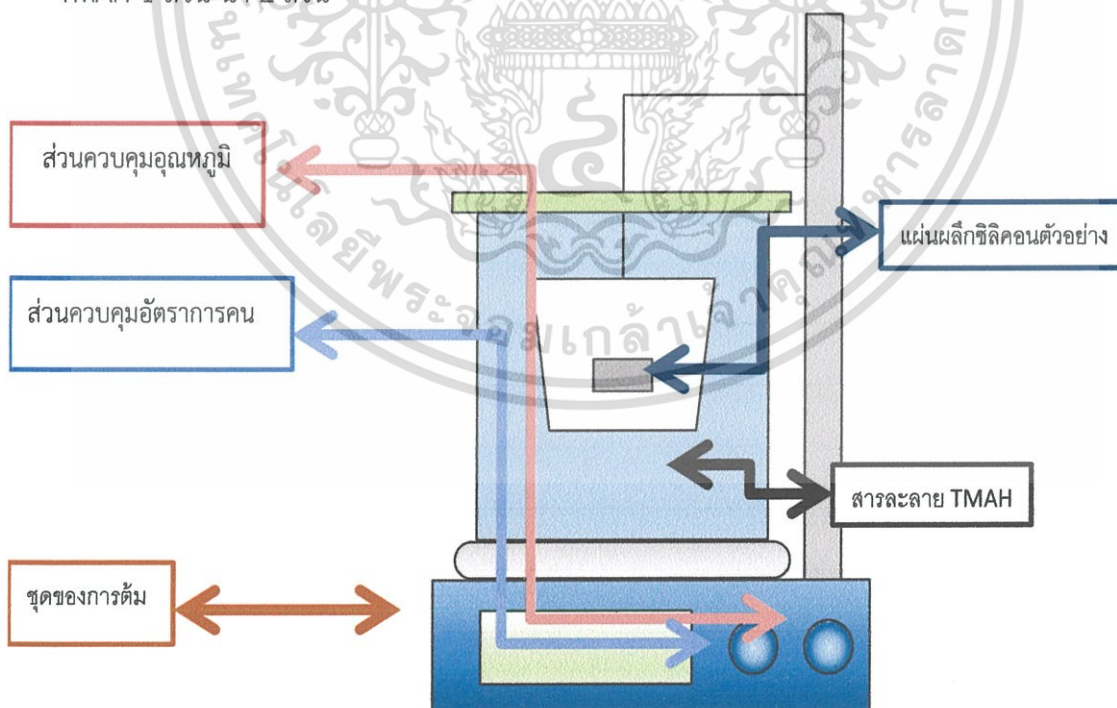
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง 25 วินาที

- ชั้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer)
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- กัดชั้นออกไซด์ส่วนที่ไม่ได้ใช้ออก
- กัดชั้นอลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม โดยใช้สารละลายกัดชั้นอลูมิเนียม ($H_3PO_4:HNO_3:CH_3COOH:DI$) ในอัตราส่วน (80:5:5:10) ตามลำดับ
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในอะซิโตนเพื่อลบน้ำยาไวแสงที่เหลือออก
- จุ่มในน้ำ DI

3.4 การเตรียมสารละลาย TMAH

ในการทดลองนี้ได้ใช้สารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 8.3 % จากการเตรียมสารละลาย TMAH 25 % โดยการใช้ในอัตราส่วนที่ TMAH ผสมกับน้ำ ในอัตราส่วน TMAH 1 ส่วน น้ำ 2 ส่วน



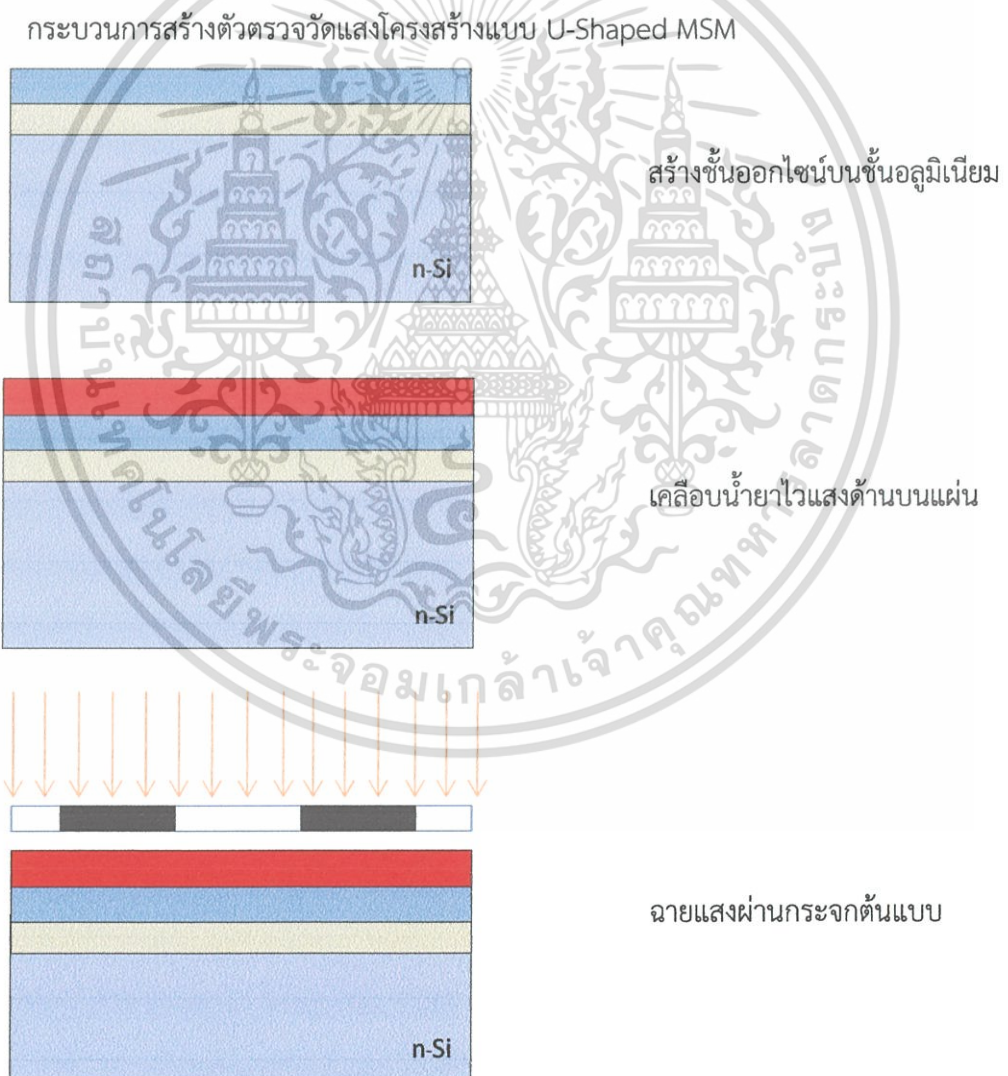
รูปที่ 3.3 การเตรียมชุดการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 กระบวนการกัด

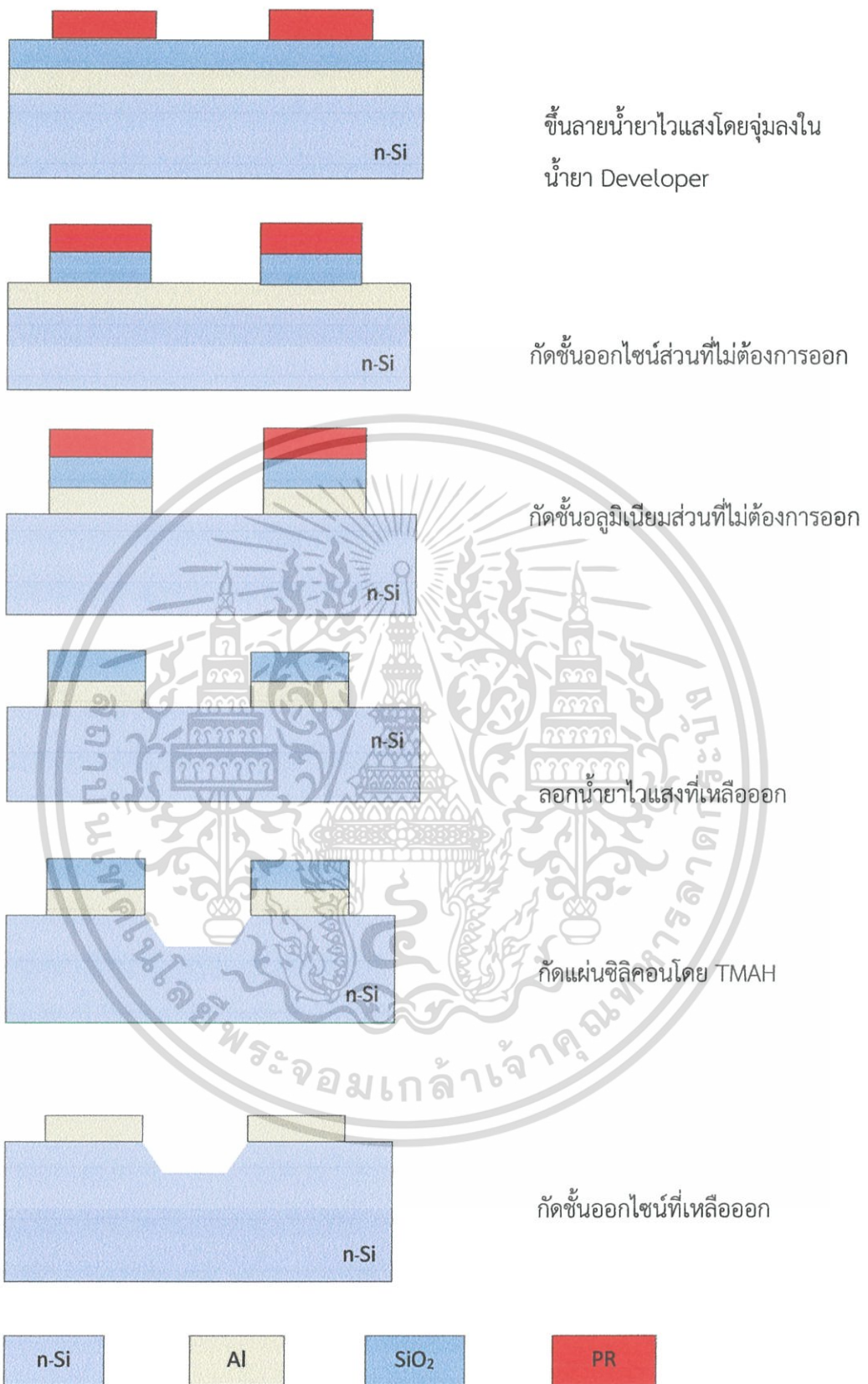
การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนสารละลายที่ใช้ นั่นคือ เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl ammonium Hydroxide : TMAH) โดยมีความเข้มข้น 25 wt% ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 2 เท่า และผสมกับผงซิลิคอนตามอัตราส่วนข้างต้น เพื่อใช้ในกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนให้มีลักษณะโครงสร้าง U-shape

- ผสมสารละลาย TMAH ตามอัตราส่วนที่กำหนด
- ต้มสารละลาย TMAH ที่ผสมน้ำแล้ว ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส
- นำแผ่นผลึกซิลิคอนไปกัดในสารละลาย TMAH ที่ผสมน้ำแล้ว
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน



รูปที่ 3.4 ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 (ต่อ)ภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM

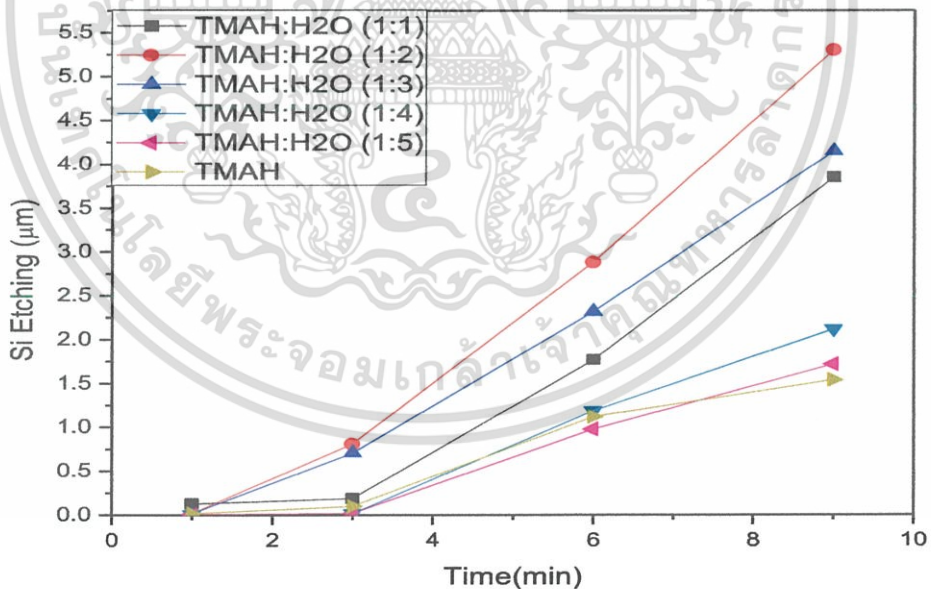
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (U-Shape) หรือ UMSM ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงบนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) ความหนาของแผ่นซิลิคอน 625 μm และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 10 $\Omega\cdot\text{cm}$ ตั้งในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ผ่านมา ในการเตรียมสารละลายได้ทำการศึกษาค่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยใช้กระบวนการกัดเปียก (Wet Etching) แบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ในกระบวนการกัดร่องรูปตัวยู ใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl Ammonium Hydroxide:TMAH) กัดแผ่นผลึกซิลิคอน ผลการกัดแผ่นผลึกซิลิคอน โดยแสดงผลเป็นระยะความลึกของการกัดต่ออัตราส่วนของสารละลายการกัดซิลิคอนจะใช้เวลาในกระบวนการกัดอยู่ในช่วง 1 – 9 นาทีและอุณหภูมิที่ 80°C คงที่ โดยมีเงื่อนไขดังนี้

- สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25 wt%
- อัตราส่วนของสารละลายเมื่อผสมน้ำ TMAH : H₂O (1:1, 1:2, 1:3, 1:4, 1:5)



รูปที่ 4.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดซิลิคอนในเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย TMAH มีค่าความลึกที่กัดได้นั้นอยู่ระหว่าง 0.019~1.54 μm เมื่อเติมน้ำ (DI water) ในสารละลาย TMAH โดยมีอัตราส่วนเป็น 1:1 (TMAH:H₂O) ค่าความลึกที่ได้จากการกัดคือ 0.13~3.85 μm ที่อัตราส่วน 1:2 ค่าความลึกที่กัดได้คือ 0.02~5.3 μm ที่อัตราส่วน 1:3 ค่าความลึกที่กัดได้คือ 0.02~4.15 μm ที่อัตราส่วน 1:4 ค่าความลึกที่กัดได้คือ 0.01~2.12 μm และที่อัตราส่วน 1:5 ค่าความลึกที่กัดได้คือ 0.01~1.72 μm ในเวลา 1 นาทีจะมีความลึกของการกัดน้อยมากในแต่ละเงื่อนไข แต่ในเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนเป็น 1:1 และอัตราส่วน 1:2 จะมีค่าความลึกของการกัดมากกว่าอัตราส่วนอื่นๆ และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นว่าเงื่อนไขที่มีอัตราส่วนเป็น 1:2 มีการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนมากที่สุด จึงนำมาใช้ในการทดลองนี้ หลังจากที่ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูแล้ว ได้ทำการศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ต่อมาเป็นการเปรียบเทียบกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาเนอร์ กับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นซึ่งขณะนี้ยังไม่ได้มีการฉายแสงและเมื่อมีการฉายแสงด้วยความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสง นำมาเปรียบเทียบกันว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูได้กระแสแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาเนอร์หรือไม่

4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al

ในหัวข้อนี้เริ่มจากการวิเคราะห์ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ในการออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงจะคำนึงถึงระยะบริเวณปลอดพาหะ (Depletion Region) เป็นปัจจัยในการสร้าง ซึ่งกระแสแสงจะมีความสัมพันธ์กับบริเวณปลอดพาหะตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มมากขึ้นและสามารถคำนวณหาค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะจากได้สมการที่ 4.1 พบว่าที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V ค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะอยู่ที่ 3.96 μm และ 5.48 μm ตามลำดับ ดังรูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al

$$W_d = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi}-V_A)}{qN_D}} \quad (4.1)$$

W_d คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

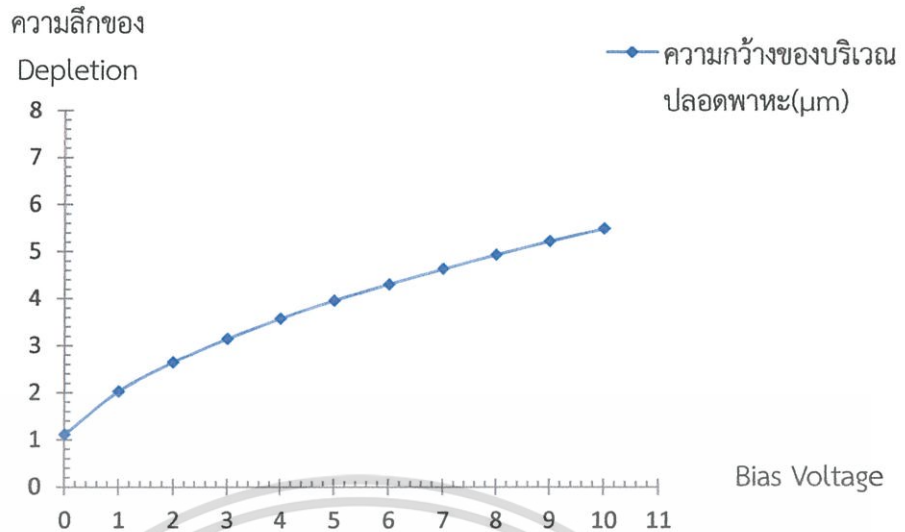
ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

V_{bi} คือ แรงดันภายใน

V_A คือ แรงดันไบอัส

q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

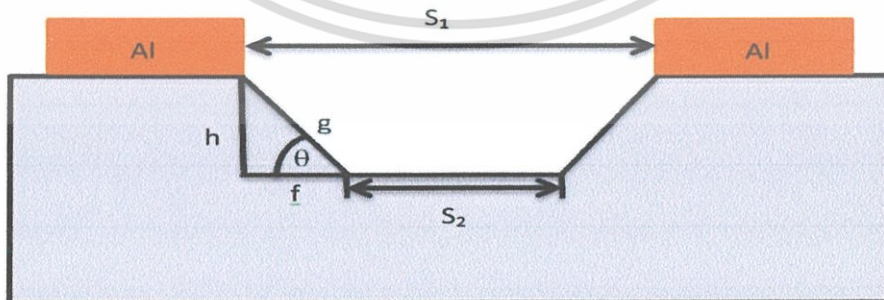
N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ



รูปที่ 4.2 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ-แรงดันของ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

จากการคำนวณค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะทำให้เรากำหนดความลึกในการกัดให้เป็นร่องรูปตัวยูได้ให้อยู่ประมาณ $5.48 \mu\text{m}$ ในบทนี้ได้นำเทคนิคการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ที่ใช้กันมากในกระบวนการสร้าง MSM มาประยุกต์ใช้ และทำการคำนวณหาพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้น(ด้าน g) โดยใช้การคำนวณทางตรีโกณมิติจากสมการที่ 4.2 และใช้ความลึก (h) จากค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะประมาณ $4 \mu\text{m}$ โดยใช้มุม 54.7 (เป็นมุมในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก) พบว่าโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (ด้าน g) มีพื้นที่รับแสงมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบ (ด้าน f) ถึง 1.73 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยที่ คือ ความลึกในการกัด คือ พื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบซึ่งเป็นพื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ดังรูปที่ 4.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

$$\sin(54.74) = \frac{h}{g} \quad \cos(54.74) = \frac{f}{g} \quad \tan(54.74) = \frac{h}{f} \quad (4.2)$$



รูปที่ 4.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นจากการทดลองในกระบวนการสร้างจะเป็นตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์มาก่อน จากนั้นจะนำตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ที่สร้างขึ้นไปกัดร่องลึกด้วยกระบวนการกัดเปียกแอนไอโซทรอปิก ที่ซึ่งซิลิคอนถูกกัดในทิศทางของระนาบ (100) มากที่สุด อะตอมของซิลิคอนที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ ส่วนซิลิคอนในระนาบของ (111) จะถูกกัดน้อย เนื่องจากระนาบนี้จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้านั้นจึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุดทำให้เกิดเป็นลักษณะของร่องรูปตัวยูขึ้นหรือ U-shape โดยใช้สารละลาย TMAH ต่อ น้ำ 1:2 ซึ่งสารละลายนี้จะทำปฏิกิริยากัดกับแผ่นผลึกซิลิคอนทำให้ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูตรงบริเวณพื้นที่รับแสงแสงหรือบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองนั่นเอง เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการให้แสงมาตกกระทบ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$ แบบร่องรูปตัวยูแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$

(ก) ภาพถ่ายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$ แบบพลาแนร์

(ข) ภาพถ่ายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$ แบบร่องรูปตัวยู

จากรูปที่ 4.3 (ก) แสดงถึงภาพตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$ แบบพลาแนร์ ที่ได้สร้างขึ้นโดยใช้มาสก์ที่มีขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu m$ จากรูปที่ 4.3 (ข) ภาพถ่ายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$ แบบร่องรูปตัวยู แสดงให้เห็นลักษณะของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ที่ได้สร้างขึ้นโดยใช้มาสก์ที่มีขนาดของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu m$ แล้วนำมากัดร่องรูปตัวยูโดยใช้สารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วนต่อ น้ำเป็น 1:2 โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการกัด 8 , 12 และ 16 นาที

4.1.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู ด้วยการวัดค่าความลึกด้วยเครื่อง Profilometer

หลังจากผ่านกระบวนการกัดเพื่อใช้สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู ได้ทำการวัดค่าความลึกด้วยเครื่อง Profilometer ซึ่งได้ความลึกในการกัดของสารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วน 1:2 (TMAH : H₂O) เป็นอัตราการกัดที่ดีที่สุดนำมากัด นำแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ที่เป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาสมากรัดให้เป็นร่องรูปตัวยูด้วยสารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วน 1:2 (TMAH : H₂O) ในอุณหภูมิที่คงที่ 80°C และ เวลาที่กำหนดคือ 8 , 12 และ 16 นาที ความลึกในการกัดของร่องรูปตัวยู เวลา 8 นาที มีค่าเท่ากับ 3.556 μm ความลึกในการกัดของร่องรูปตัวยู เวลา 12 นาที มีค่าเท่ากับ 3.981 μm ความลึกในการกัดของร่องรูปตัวยู เวลา 16 นาที มีค่าเท่ากับ 8.365 μm แสดงเป็นดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงอัตราการกัดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยูในเวลาต่างๆ

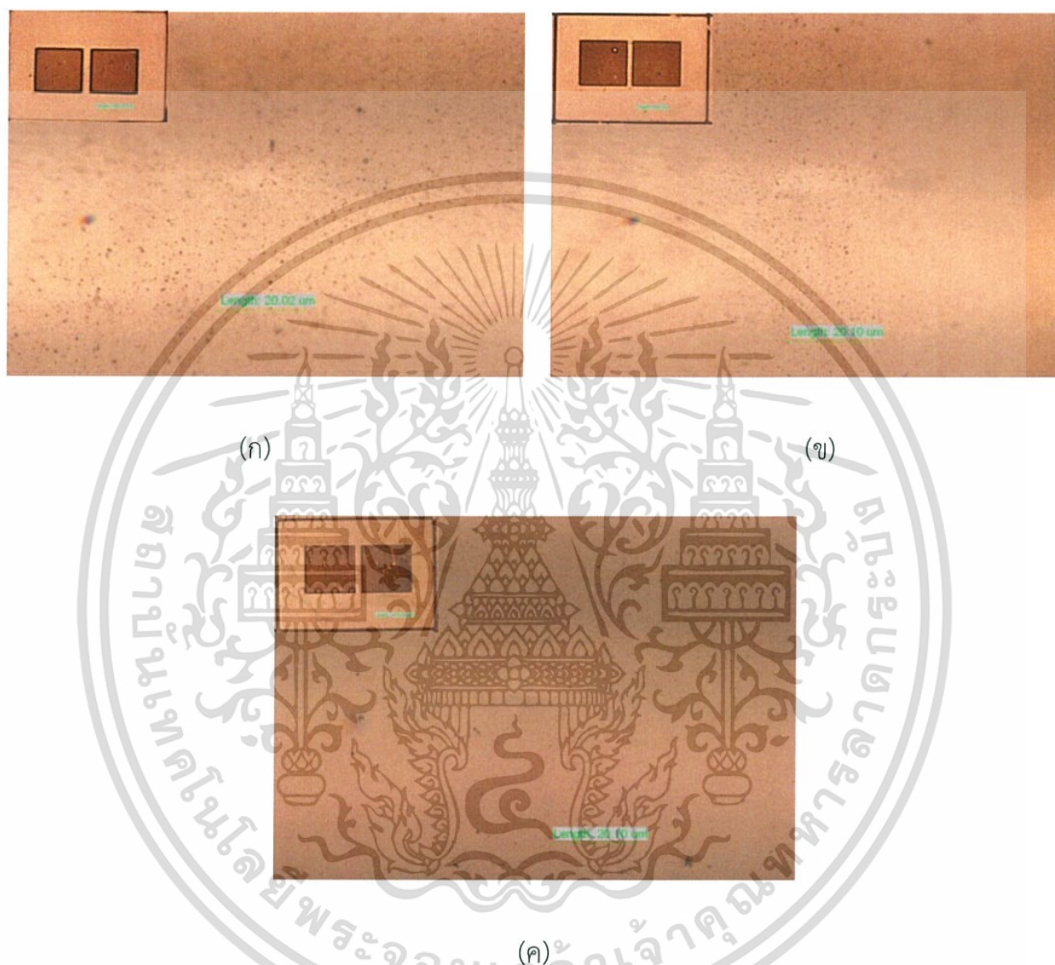
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	ความลึกของการกัด (μm)
เวลาในการกัด 8 นาที	3.556
เวลาในการกัด 12 นาที	3.981
เวลาในการกัด 16 นาที	8.365

จากตารางที่ 4.1 แสดงให้เห็นว่าความลึกของการกัดของสารละลาย TMAH กัดได้อยู่ในช่วงความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ในขณะที่ให้แรงดัน 10 v อยู่ที่ 5.48 μm ในเวลาการกัด 8 และ 12 นาที ส่วนเวลาในการกัด 16 นาทีเลยออกไป ความลึกของอัตราการกัดควรอยู่ในช่วงสี่เนี่ย แต่ในเวลาการกัด 12 นาที ยังน้อยไปคาดว่าตอนกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH มีออกไซด์บางๆเกาะอยู่บนแผ่นซิลิคอนจึงทำให้กัดไม่ได้เท่าที่ควร

4.1.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องไมโครสโคป

หลังจากผ่านกระบวนการกัดเพื่อใช้สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู โดยใช้กล้องไมโครสโคปที่มีกำลังขยาย 50 เท่า และ 1500 เท่า เพื่อศึกษาร่องความลึกของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยการกัดด้วยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) จากการนำตัวตรวจวัดแสงที่ได้ผ่านกระบวนการสร้างมาแล้วไปส่องดูด้วยกล้องไมโครสโคปที่มีกำลังขยาย 50 เท่า พบว่าเห็นเป็นขั้วสองขั้วอย่างชัดเจนโดยมีร่องความลึกระหว่างขั้วทั้งสองขั้ว ด้วยในการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก ให้เป็นร่องรูปตัวยูที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 40 μm กัดร่องรูปตัวยูโดยใช้สารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วนต่อน้ำเป็น 1:2 โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการกัด 8 , 12 และ 16 นาที และนำตัว

ตรวจวัดแสงไปส่องดูด้วยกล้องไมโครสโคปที่มีกำลังขยาย 1500 เท่า บริเวณที่เป็นร่องรูปตัวยูที่อยู่ระหว่างขั้วทั้งสองขั้วของตัวตรวจวัดแสง ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ $40\ \mu\text{m}$ ก็ต้องรูปตัวยูโดยใช้สารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วนต่อน้ำเป็น 1:2 โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และใช้เวลาการกัด 8 , 12 และ 16 นาที พบว่ายิ่งใช้เวลาในการกัดมากเท่าไรพื้นผิวบริเวณของร่องรูปตัวยูก็จะยิ่งเรียบขึ้น ดังรูปต่อไปนี้ตั้งแต่รูปที่ 4.4 (ก) ถึง รูปที่ 4.4 (ค)



รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
 (ก) เวลาการกัด 8 นาที ภาพเล็กถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 50 เท่า
 ภาพใหญ่ถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 1500 เท่า
 (ข) เวลาการกัด 12 นาที ภาพเล็กถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 50 เท่า
 ภาพใหญ่ถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 1500 เท่า
 (ค) เวลาการกัด 16 นาที ภาพเล็กถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 50 เท่า
 ภาพใหญ่ถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคปกำลังขยาย 1500 เท่า

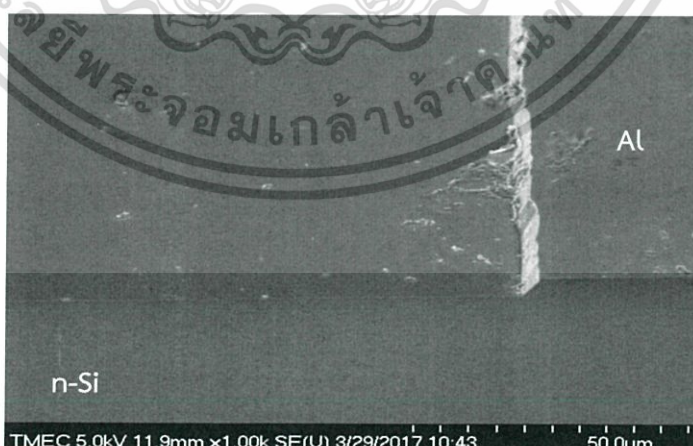
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

หลังจากถ่ายภาพด้วยกล้องไมโครสโคปแล้ว นำตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู ในบางชิ้นส่วนมาดูพื้นผิวของชิ้นงาน ดังรูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 5000 เท่า ที่บริเวณร่องรูปตัวยูเพื่อดูพื้นผิวของชิ้นงานระหว่างขั้วทั้งสองขั้ว ซึ่งพื้นผิวชิ้นงานมีความ เรียบในระดับหนึ่งแต่ยังมีพื้นผิวเพียงเล็กน้อยที่ยังเป็นรอยขรุขระ ต่อมาเป็นจากรูปที่ 4.6 ภาพถ่าย ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบ ส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1000 เท่า ที่บริเวณขั้วของตัวตรวจวัดแสง เห็นขั้วอลูมิเนียมแยกบน แผ่นซิลิคอนได้อย่างชัดเจน

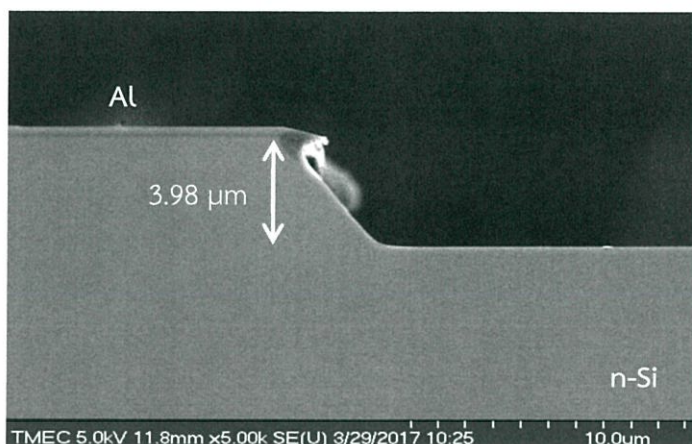


รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 5000 เท่า ที่บริเวณร่องรูปตัวยู



รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้อง จุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1000 เท่า ที่บริเวณขั้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.7 ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 5000 เท่า

จากรูปที่ 4.7 เป็นภาพตัดขวางที่ถ่ายจาก SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าลักษณะการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนมีลักษณะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งมีลักษณะกัดทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางหนึ่ง จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าผลึกซิลิคอนระนาบ (111) และ (100) ถูกกัดออกไป โดยที่ระนาบ (100) จะถูกกัดออกไปมากที่สุด เนื่องจากอะตอมของซิลิคอนที่ถูกกัดจะมีอยู่สองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่อะตอมที่ผิวหน้าถูกดึงออกไปจะต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะด้วยกัน ส่วนผลึกซิลิคอนระนาบ (111) จะถูกกัดน้อยกว่า เนื่องจากในระนาบ (111) นี้จะมีอะตอมสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า จึงทำให้เป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุดที่ทำให้เกิดร่องลึกขึ้น จากปฏิกิริยาดังกล่าวไว้ข้างต้นทำให้ได้เป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัดร่องลึก หรือลักษณะแบบ UMMSM ตามวัตถุประสงค์ของงานวิจัยที่กำหนดไว้ข้างต้น

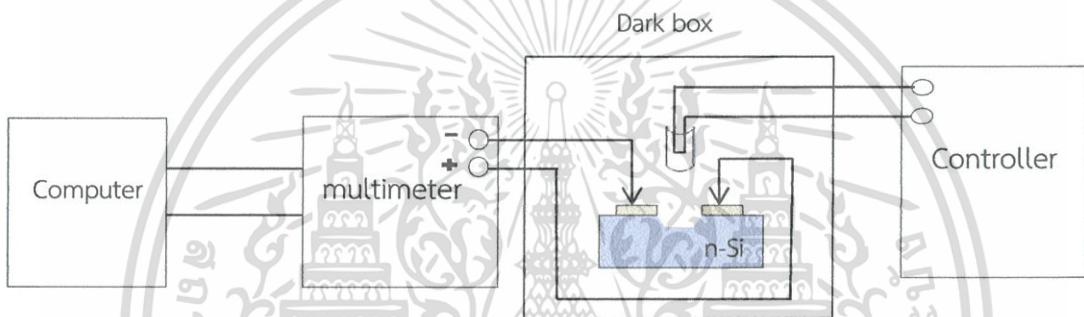
4.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

หลังจากได้ทำตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูในบทที่ผ่านมา กระบวนการกัดเพื่อใช้สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้กล้องไมโครสโคปเพื่อศึกษาความลึกของการกัดด้วยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ด้วยเงื่อนไขการผสมสารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:2 หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง จากการวัดคุณลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า คุณสมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณแสงแบบกระแสตรงที่มีความเข้มแสงคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงเป็นต้น ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง โดยศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่สร้างขึ้นทั้งขณะไม่ได้รับการฉายแสง และเมื่อฉายแสงด้วยความเข้มแสงในค่าต่างๆ โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสง การทดลองได้แบ่งเป็น 2

ส่วน ด่วนกัน ส่วนแรกเป็นการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาสมาเพื่อนำไปใช้เปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย (UMSM) ในส่วนที่สองเป็นการวัดค่าลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าในแต่ละค่าความเข้มแสงเป็นลักษณะอย่างไร

4.2.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ

หลังจากสร้างชิ้นงานเสร็จเรียบร้อยแล้ว นำชิ้นงานมาวัดหาความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบในกล่องปิด โดยทดลองดังรูปที่ 4.8 โดยป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ -10 ถึง 10 V เพื่อหากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงแล้วนำไปคำนวณหากระแสแสง

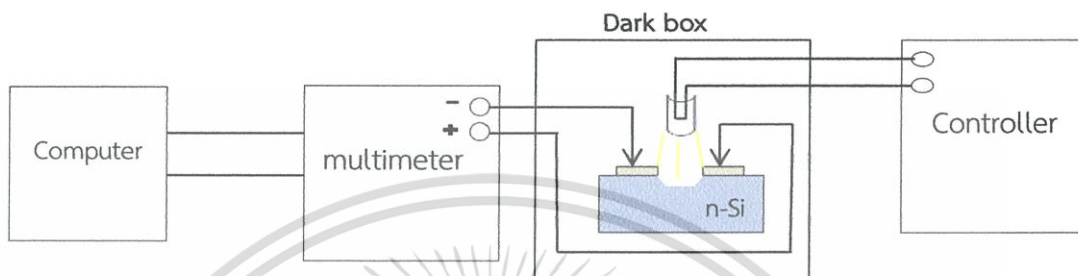


รูปที่ 4.8 แผนภาพที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขั้วโลหะที่สร้างจากโลหะชนิดเดียวกัน คือ อลูมิเนียม (Al) ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงในขณะสมดุล ตัวตรวจวัดแสงนี้จึงมีความสูงกำแพงศักย์ซีออตต์กีของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ แรงดันภายในของขั้วแคโทด (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 ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบแต่มีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยให้ขั้วโลหะด้านหนึ่งได้รับไบอัสตรง โดยขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้ จะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะ ข้ามกำแพงศักย์ซีออตต์กีไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่ว หรือเรียกว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง

4.2.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อวัดความสัมพันธ์ของกระแส-แรงดันของอุปกรณ์ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะที่แสงตกกระทบจากแหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มค่าที่อยู่ในช่วง 5000 – 25000 lux โดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 4.9 โดยป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ -10 ถึง 10 V



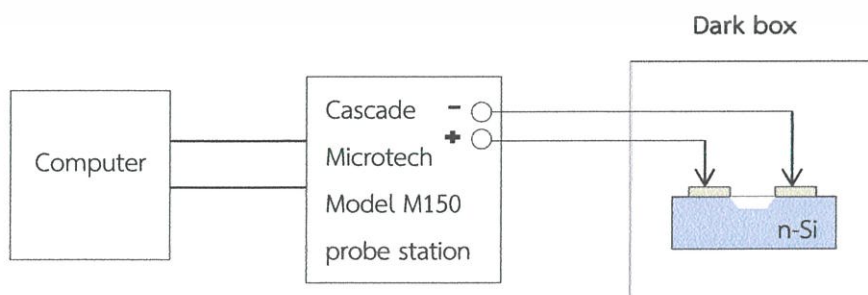
รูปที่ 4.9 แผนภาพที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

ความสัมพันธ์ของกระแสแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะที่แสงมาตกกระทบจากแหล่งจ่ายแสงหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มขึ้นในค่าที่อยู่ในช่วง 5000 – 25000 lux โดยต่อตามชุดการทดลองในรูปที่ 4.9 โดยการป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ -10 ถึง 10 V กระแสแสงหาได้จากสมการ

$$I_p = I_{Mea} - I_{Dark} \quad (4.3)$$

4.2.3 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

การวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Si/Al ใช้การวัดจากเครื่อง cascade microtech model m150 probe station ซึ่งคอมพิวเตอร์ซึ่งใช้ในการควบคุมเครื่อง และเก็บข้อมูล โดยให้แรงดันไบอัสกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ตั้งแต่ -10 ถึง 10 V และวัดการเปลี่ยนแปลงของความจุไฟฟ้า โดยมีแผนภาพการทดลองดังรูป 4.10



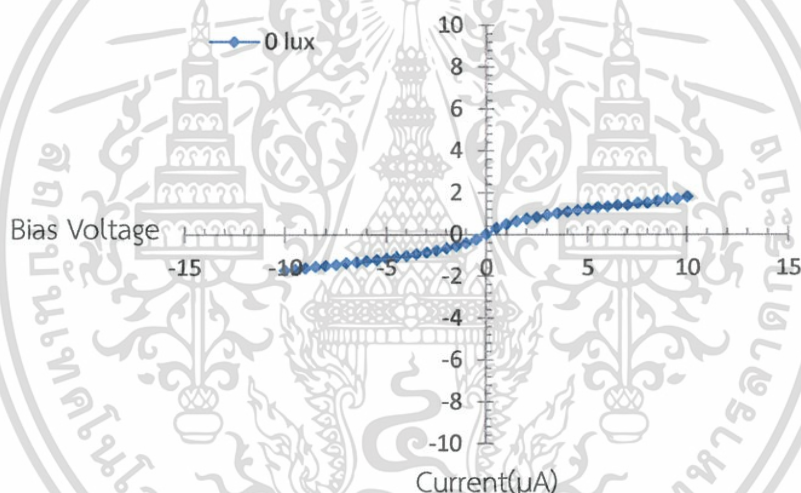
รูปที่ 4.10 แผนภาพที่ใช้ในการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์

หัวข้อนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ เพื่อนำลักษณะข้อมูลมาใช้เปรียบเทียบกับลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ กับ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วย แล้วนำข้อมูลมาเปรียบเทียบกับ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย ที่เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วยต่อไป

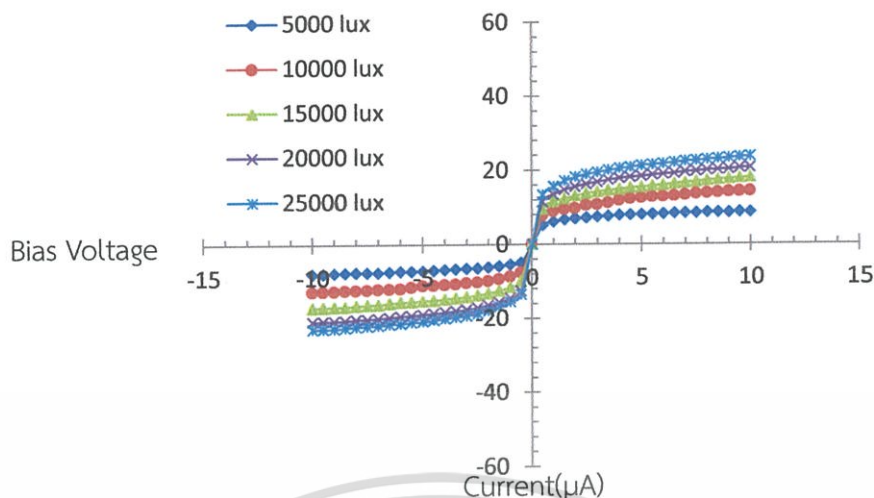
หลังจากการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแส-แรงดันจะได้กราฟดัง ในรูปที่ 4.11 เป็นความสัมพันธ์ของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ขณะไม่ได้รับการกระทบด้วยแสง โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V เพื่อหากระแสมีด พบว่ากระแสมีดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ขณะที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มีค่ากระแสเท่ากับ 1.8 μA



รูปที่ 4.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

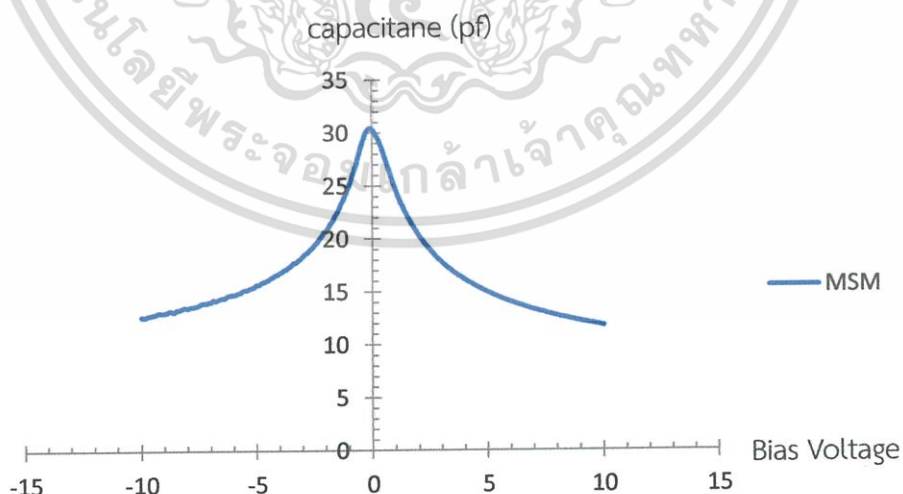
จากการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแสมีดในรูปที่ 4.11 ต่อมานำตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ที่สร้างขึ้นมาทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงมาตกกระทบจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง ค่าความเข้มแสงระหว่าง 5,000 ถึง 25,000 lux และจ่ายแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.12 พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ จะมีกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความเข้มแสงมากกระทบมากขึ้น โดยที่เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่ความเข้มแสง 5,000 , 10,000 , 15,000 , 20,000 และ 25,000 lux ตามลำดับ จะได้กระแสแสงเท่ากับ 8.6 , 14.25 , 18 , 20.62 และ 23.6 μA ตามลำดับ ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ขณะได้รับแสงตกกระทบบ

พอได้ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ขณะได้รับแสงตกกระทบบดังรูปที่ 4.12 แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ โดยใช้เครื่อง cascade microtech model m150 probe station ในการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน แล้วเก็บข้อมูล โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V พบว่าผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.13 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ จะมีค่าความจุไฟฟ้าค่อยๆลดลงเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดันไบอัส 0 V ได้ค่าความจุไฟฟ้า 30.31 pf



รูปที่ 4.13 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์

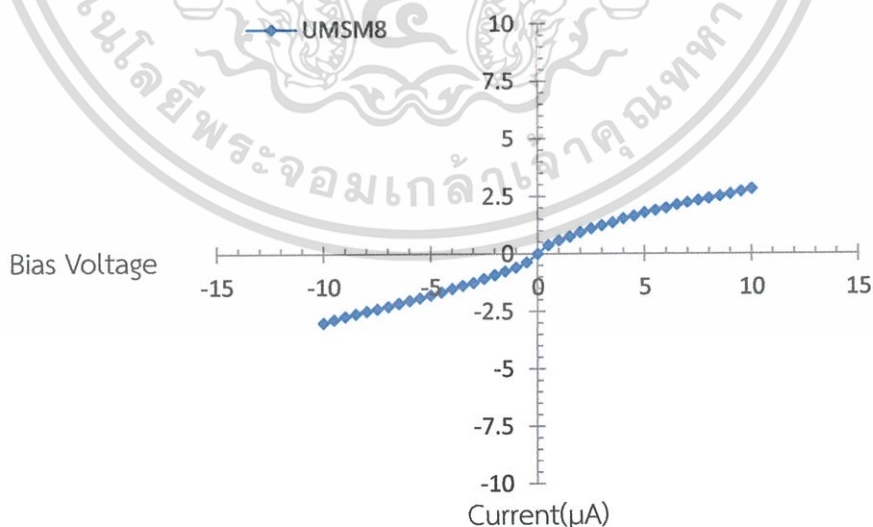
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

ในการทดลองนี้ได้ทำการปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อเพิ่มบริเวณพื้นที่เวลาแสงตกกระทบ บริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ให้กับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์โดยการกัดเปียกของสารละลาย TMAH ให้มาเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู แล้วนำไปวัดลักษณะข้อมูลมาไว้เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู กับ ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ ที่เป็นส่วนสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูต่อไป แยกเป็นอีกสามหัวข้อโดยแบ่งตามเวลาในการกัดเปียกด้วยสารละลาย TMAH มีเวลาในการกัด 8 , 12 และ 16 นาที

4.4.1 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 8 นาที

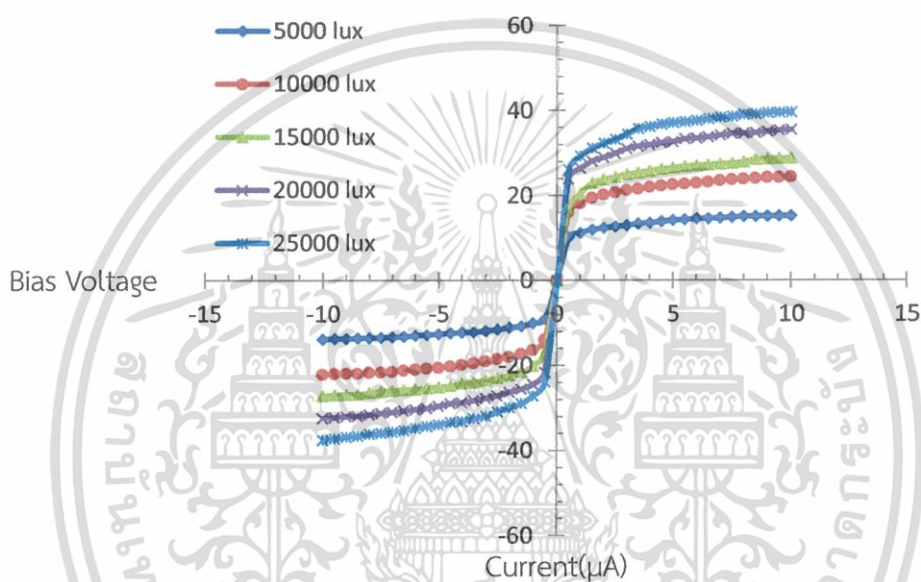
หลังจากการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ นำไปกัดด้วยสารละลาย TMAH ให้เกิดเป็นร่องรูปตัวยูเวลาในการกัด 8 นาที แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า กระแส-แรงดันจะได้กราฟดัง ในรูปที่ 4.14 เป็นความสัมพันธ์ของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับการกระทบด้วยแสง โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V เพื่อหากระแสมืด พบว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาในการกัดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ 8 นาที ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มีค่ากระแสเท่ากับ 2.82 μA



รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบของการกัดด้วย (TMAH) ต่อน้ำ 1:2 ในเวลาการกัด 8 นาที

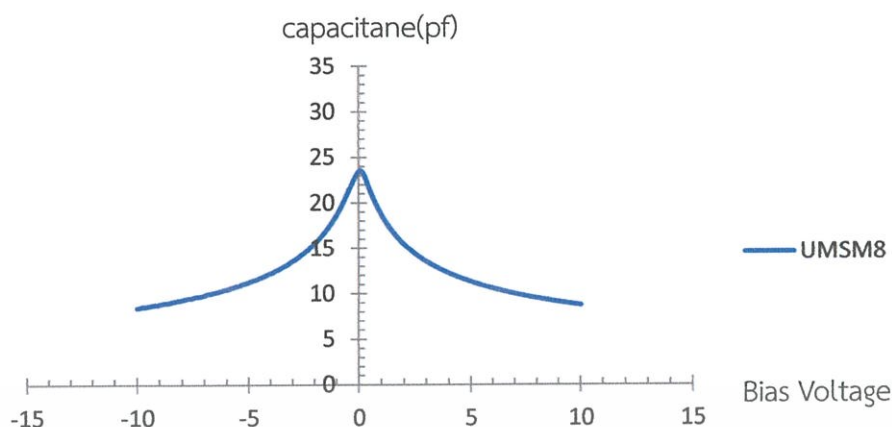
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแสมีดในรูปที่ 4.14 ต่อมนำตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่สร้างขึ้นมาทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงมาตกกระทบบจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง ค่าความเข้มแสงระหว่าง 5,000 ถึง 25,000 lux และจ่ายแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.15 พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลา ในการกักแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ 8 นาที จะมีกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความเข้มแสงมากระทบบมากขึ้น โดย ที่เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่ความเข้มแสง 5000, 10000, 15000 , 20000 และ 25000 Lux จะมีกระแสแสงเท่ากับ 15.21 , 24.41 , 28.83 , 35.55 และ 39.64 μA ตามลำดับ



รูปที่ 4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบบ เวลาการกัก 8 นาที

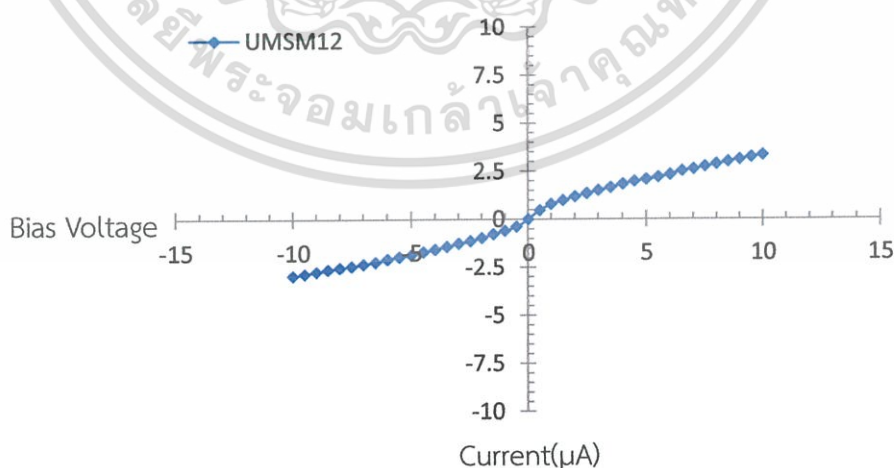
พอได้ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบบดังรูปที่ 4.15 แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยใช้เครื่อง cascade microtech model m150 probe station ในการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน แล้วเก็บข้อมูล โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V พบว่าผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.16 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู จะมีค่าความจุไฟฟ้าค่อยๆลดลงเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดันไบอัส 0 V ได้ค่าความจุไฟฟ้า 23.48 pf



รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย เวลาในการกัด 8 นาที

4.4.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย เวลาในการกัด 12 นาที

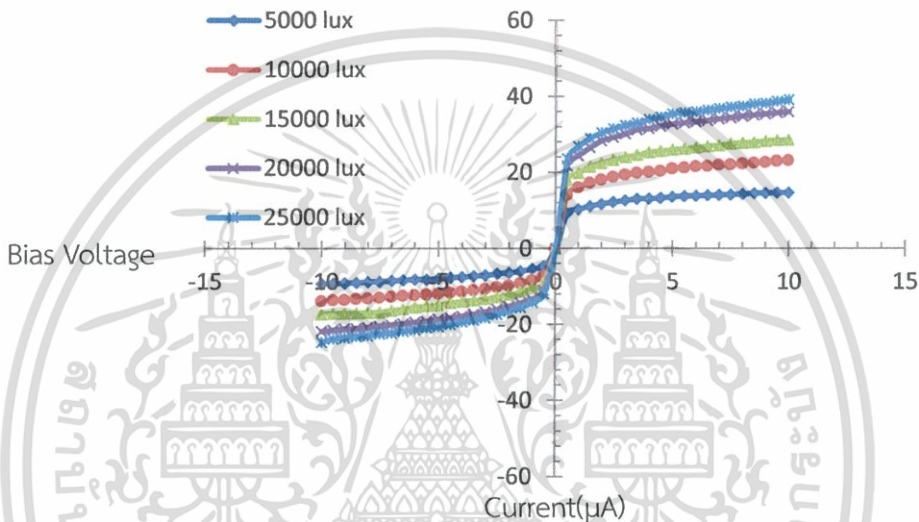
หลังจากการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาสมา นำไปกัดด้วยสารละลาย TMAH ให้เกิดเป็นร่องรูปด้วยเวลาในการกัด 12 นาที แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแส-แรงดันจะได้กราฟดัง ในรูปที่ 4.17 เป็นความสัมพันธ์ของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย ขณะไม่ได้รับการกระทบด้วยแสง โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V เพื่อหากระแสมืด พบว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วยที่ใช้เวลาในการกัดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ 12 นาที ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มีค่ากระแสเท่ากับ 3.34 μA



รูปที่ 4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบของการกัดด้วย (TMAH) ต่อน้ำ 1:2 ในเวลาการกัด 12 นาที

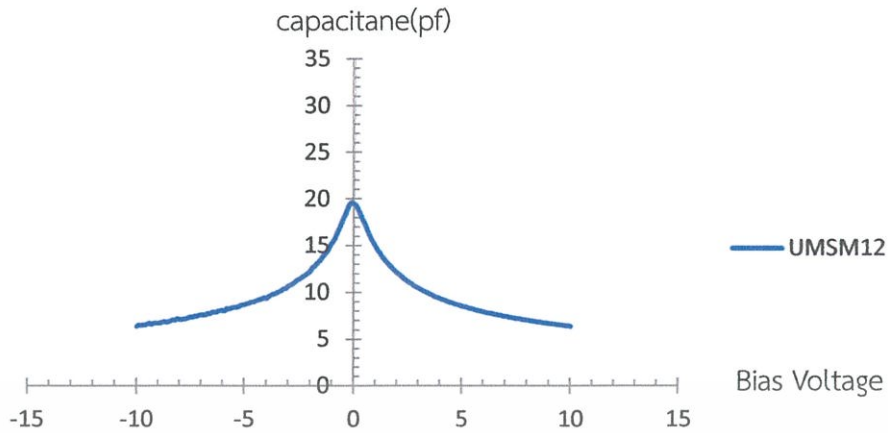
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแสในรูปที่ 4.17 ต่อมานำตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่สร้างขึ้นมาทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงมาตกกระทบจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง ค่าความเข้มแสงระหว่าง 5,000 ถึง 25,000 lux และจ่ายแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.18 พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลา ในการกัดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ 12 นาที จะมีกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความเข้มแสงมากระทบมากขึ้น โดยที่เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่ความเข้มแสง 5000, 10000, 15000, 20000 และ 25000 Lux จะมีกระแสแสงเท่ากับ 14.63, 23.16, 28.54, 35.97 และ 39.1 μA ตามลำดับ



รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบเวลาการกัด 12 นาที

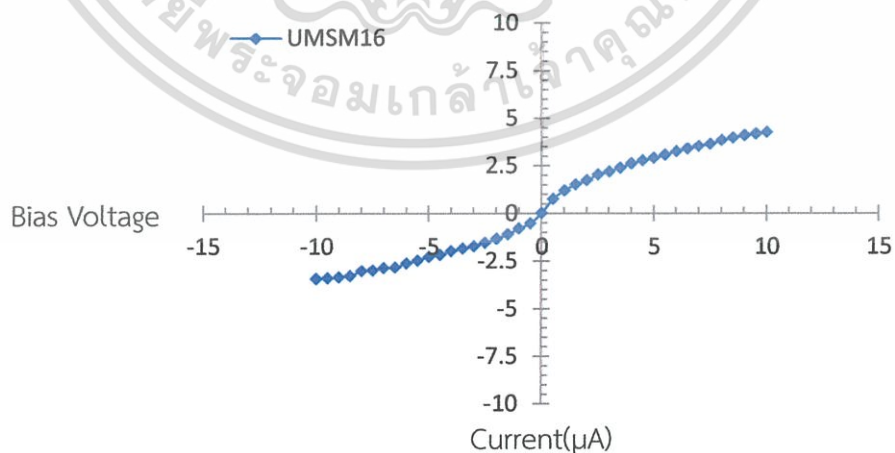
พอได้ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบดังรูปที่ 4.18 แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยใช้เครื่อง cascade microtech model m150 probe station ในการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน แล้วเก็บข้อมูล โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V พบว่าผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.19 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 12 นาที จะมีค่าความจุไฟฟ้าค่อยๆลดลงเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดันไบอัส 0 V ได้ค่าความจุไฟฟ้า 19.5 pf



รูปที่ 4.19 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 12 นาที

4.4.3 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 16 นาที

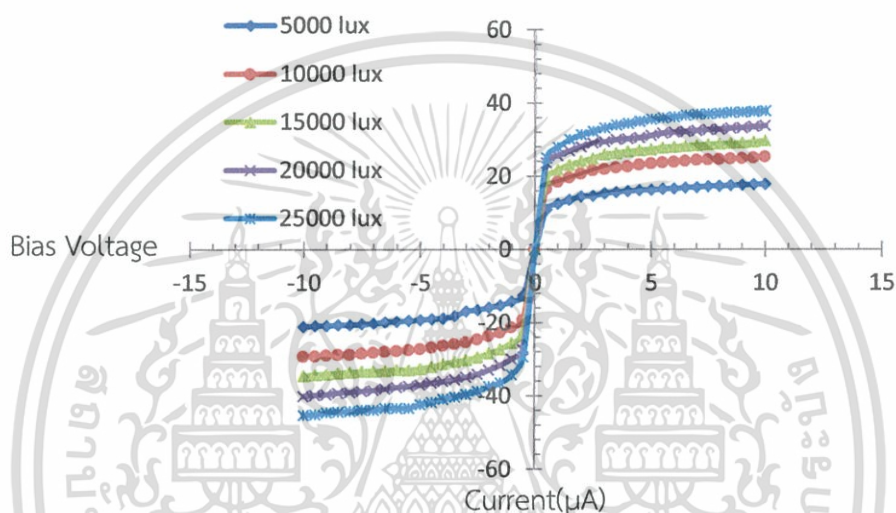
หลังจากการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาสมา นำไปกัดด้วยสารละลาย TMAH ให้เกิดเป็นร่องรูปตัวยูเวลาในการกัด 16 นาที แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแส-แรงดันจะได้กราฟดัง ในรูปที่ 4.20 เป็นความสัมพันธ์ของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับการกระทบด้วยแสง โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V เพื่อหากระแสมืด พบว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาในการกัดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ 16 นาที ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มีค่ากระแสเท่ากับ 4.25 μA



รูปที่ 4.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบของการกัดด้วย (TMAH) ต่อน้ำ 1:2 ในเวลาการกัด 16 นาที

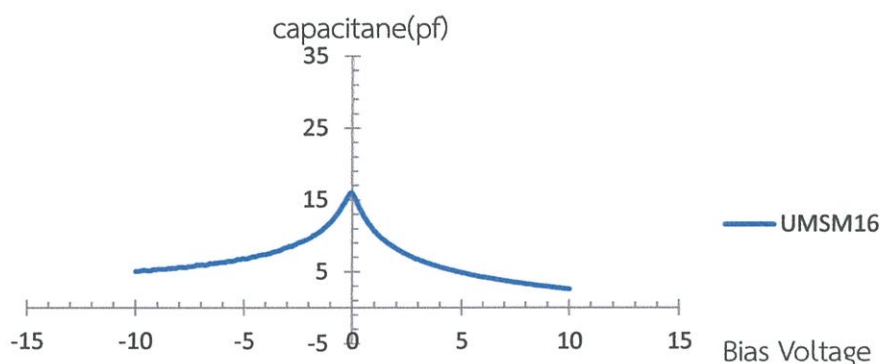
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ากระแสมีดในรูปที่ 4.20 ต่อมานำตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่สร้างขึ้นมาทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัด ความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงมาตกกระทบจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง ค่าความเข้มแสงระหว่าง 5,000 ถึง 25,000 lux และจ่ายแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V ผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.21 พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลา ในการกักแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ 16 นาที จะมีกระแสเพิ่มขึ้นเมื่อมีค่าความเข้มแสงมากระทบมากขึ้น โดยที่เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่ความเข้มแสง 5000, 10000, 15000 , 20000 และ 25000 Lux จะมีกระแสแสงประมาณ 17.84 , 25.25 , 29.63 , 33.81 และ 37.81 μA ตามลำดับ



รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบเวลาการกัก 16 นาที

พอได้ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบดังรูปที่ 4.21 แล้วนำมาวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยใช้เครื่อง cascade microtech model m150 probe station ในการวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน แล้วเก็บข้อมูล โดยให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V พบว่าผลการทดลองเป็นดังรูปที่ 4.22 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัก 16 นาที จะมีค่าความจุไฟฟ้าค่อยๆ ลดลงเมื่อให้แรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น ค่าความจุไฟฟ้าสูงสุดที่แรงดันไบอัส 0 V ได้ค่าความจุไฟฟ้า 15.88 pf

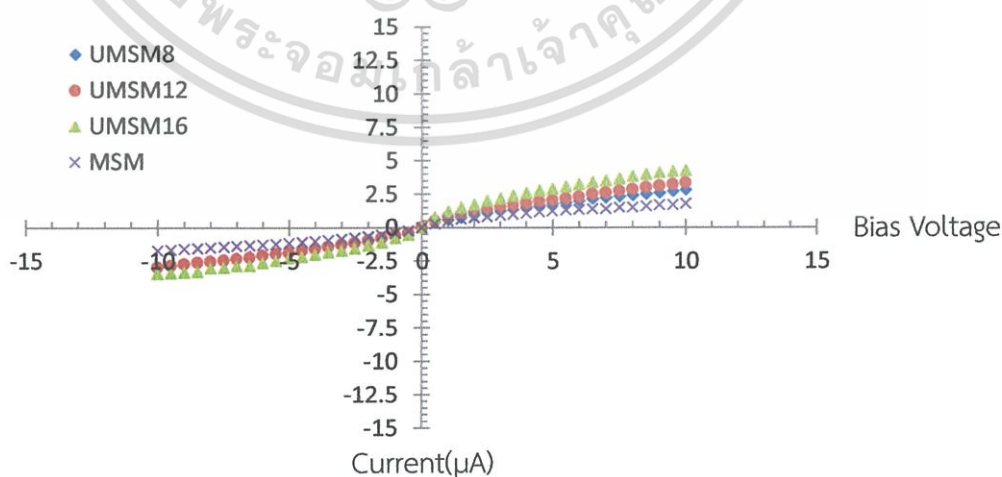


รูปที่ 4.22 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เวลาในการกัด 16 นาที

4.5 การเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาเนียร์ กับ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

นำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกันระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาเนียร์ กับ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ว่าผลการทดลองเมื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยการเปลี่ยนโครงสร้าง โดยการกัดเปียกด้วยสารละลาย TMAH ทำให้เกิดร่องลึกบริเวณขั้วโลหะทั้งสอง ร่องที่เกิดเป็นร่องรูปตัวยู ทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้ามาเปรียบเทียบกันดังนี้

ผลการทดลองในรูปที่ 4.23 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาเนียร์ และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่า $40\ \mu\text{m}$ ของการกัดด้วยสารละลาย TMAH ต่ออัตรา 1:2 ในเวลาการกัดทั้งหมด ที่แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V เพื่อเปรียบเทียบกระแสมืด

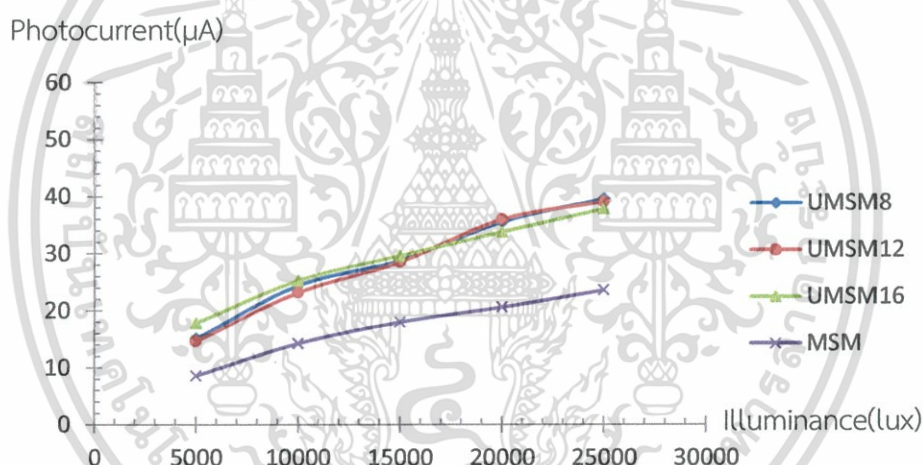


รูปที่ 4.23 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.23 เมื่อเปรียบเทียบกระแสมีด ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาแนร์ กับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ของทุกเวลาของการกักแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูเวลาในการกัก 8 นาที โดยไม่ได้แสงมาตกกระทบ มีกระแสมีด 2.82 μA ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูเวลาในการกัก 12 นาทีเวลาไม่มีแสงมาตกกระทบ มีกระแสมีด 3.34 μA ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูเวลาในการกัก 16 นาทีเวลาไม่มีแสงมาตกกระทบ มีกระแสมีด 4.25 μA ถือว่าค่าไม่ต่างกันมากกับแบบพลาแนร์ที่มีค่าเท่ากับ 1.8 μA ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาแนร์ กับ แบบร่องรูปตัวยู อยู่ในค่าที่ยอมรับได้ที่ไม่สูงเกิน

ผลการทดลองในรูปที่ 4.24 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาแนร์ และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูทั้งหมด การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงมาตกกระทบจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสง ค่าความเข้มแสงระหว่าง 5,000 ถึง 25,000 lux และจ่ายแรงดันไบอัส 10 V เพื่อเปรียบเทียบค่ากระแสแสงที่ได้



รูปที่ 4.24 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มของแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al ขณะได้รับแสงตกกระทบ

จากรูปที่ 4.24 เมื่อเปรียบเทียบความเข้มแสงสูงสุดที่ 25000 lux ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาแนร์ กับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ของทุกเวลาของการกักแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูเวลาในการกัก 8 นาทีเวลามีแสงมาตกกระทบที่ 25000 lux มีกระแสแสงเพิ่มขึ้นจากของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ถึง 1.68 เท่า ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูเวลาในการกัก 12 นาทีเวลามีแสงมาตกกระทบที่ 25000 lux มีกระแสแสงเพิ่มขึ้นจากของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ถึง 1.657 เท่า ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูเวลาในการกัก 16 นาทีเวลามีแสงมาตกกระทบที่ 25000 lux มีกระแสแสงเพิ่มขึ้นจากของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ถึง

1.602 เท่า ในการคำนวณพื้นที่ที่แสงตกกระทบได้ค่า 1.73 เท่า ถือว่าค่าไม่ต่างกันมาก ดังตารางเปรียบเทียบกระแสแสงที่ความเข้มแสง 25000 lux ระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาแนร์ กับ แบบร่องรูปตัวยู

ตารางที่ 4.2 กระแสแสงที่ความเข้มแสง 25000 lux ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่เปรียบเทียบเป็นจำนวนเท่า

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	กระแสแสงที่ความเข้มแสง 25000 lux
เวลาในการกัก 8 นาที	1.68 เท่า
เวลาในการกัก 12 นาที	1.657 เท่า
เวลาในการกัก 16 นาที	1.602 เท่า

เมื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาแนร์ และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู แล้วทำการหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบกับตัวอุปกรณ์ ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาแนร์ และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V แสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่าโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่บริเวณรอยสัมผัสทั้งสองต่อกันแบบอนุกรม ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จะมีค่าใกล้เคียงกับความจุไฟฟ้าด้านที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ

ซึ่งจากรูปที่ 4.24 พบว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al มีความสมมาตรกันซึ่งจะมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสดังความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.3) คือเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่แรงดันไบอัส 0 V ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 30.31, 23.48 , 19.49 และ 15.88 pF ที่ความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ พลาแนร์ , 3.556 , 3.981 และ 8.365 μm ตามลำดับ สาเหตุที่ความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเนื่องจากที่บริเวณรอยสัมผัสรอบข้างของขั้วไฟฟ้าถูกกัดออกไป จึงส่งผลให้มีค่าความจุไฟฟ้าลดลงตามความลึกของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

$$C = \sqrt{\frac{q\epsilon_S N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (4.4)$$

C คือ ค่าความจุไฟฟ้า

V_{bi} คือ แรงดันภายใน

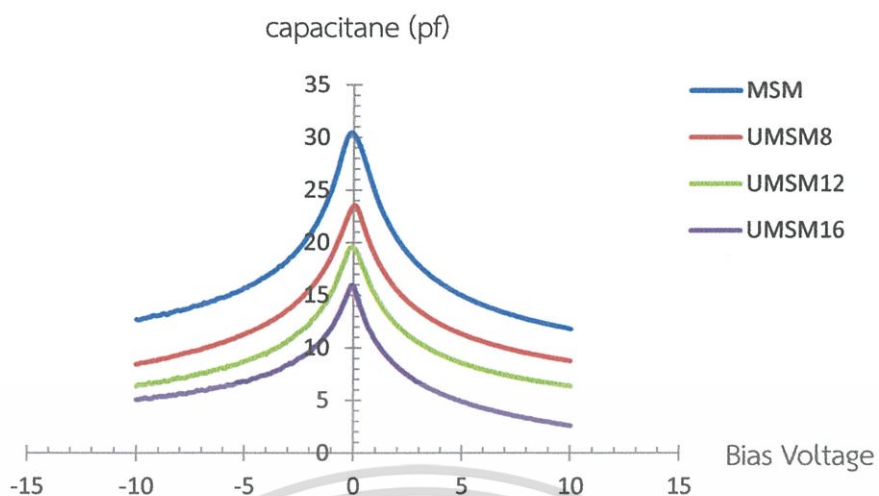
q คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน

ϵ_S คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

V_A คือ แรงดันไบอัส

N_D คือ ความหนาแน่นของอะตอมสารเจือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้เป็นการศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยส่วนแรกในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al จะได้แบบพลาณาร์มาก่อนแบบร่องรูปตัวยู โดยกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาณาร์นั้นได้ด้วยการนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มี ชั้นออกไซด์ อลูมิเนียม และ ซิลิคอนชนิดเอ็น เรียงเป็นชั้นตามลำดับ โดยกระบวนการสร้างนั้นมีกระบวนการ เตรียมแผ่นซิลิคอนแผ่นซิลิคอน เพื่อไม่ให้แผ่นซิลิคอนมีฝุ่น หรือ คราบไขมันอยู่บนแผ่นจะทำให้ค่าที่ได้คาดเคลื่อนไป ต่อมาได้นำแผ่นซิลิคอนที่เตรียมแผ่นแล้วไปผ่านกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อนำมาสัคม่าทำเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง โดยมีช่องว่างระหว่างขั้วขนาด $40\ \mu\text{m}$ เพราะเป็นขนาดที่เล็กที่สุดที่สามารถทำได้ นำแผ่นซิลิคอนที่สร้างขึ้นมาแล้วไปผ่านกระบวนการกัด (etching) จะกัดตามชั้นของแผ่นซิลิคอน

ในส่วนต่อมาเป็นส่วนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูโดยวิธีการกัด (etching) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างแบบพลาณาร์ที่ยังไม่ชินเตอริง ให้มาเป็นแบบร่องรูปตัวยู โดยการใช้สารละลาย TMAH ในการกัดซิลิคอนบริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้น เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงจากแบบพลาณาร์ เป็นแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสงโดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าจากการคำนวณของพื้นที่รับแสงแบบร่องรูปตัวยูนั้น มีพื้นที่มากกว่าพื้นที่รับแสงของพลาณาร์ประมาณ 1.69 เท่า หรือประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์จากเดิมทำให้เราสามารถประยุกต์ใช้ได้มากขึ้น

โดยคุณสมบัติของสารละลายที่ใช้ในการกัดร่องรูปตัวยูนี้จะทำให้เกิดการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก จากนั้นจะทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพ และลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยู กระบวนการสร้างเริ่มจากใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีระนาบ (100) และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร เพื่อใช้ในการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมโดยใช้กระบวนการสปัตเตอร์ จากนั้นทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบพลาณาร์ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าไว้ใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู หลังจากที่ได้ตัวตรวจวัดแสงแบบพลาณาร์แล้วจึงทำการกัดบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาณาร์ด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 8.3 wt.% อุณหภูมิที่ใช้ในการกัดซิลิคอน 80 องศาเซลเซียส ในเวลาการกัด 8 , 12 และ 16 นาทีตามลำดับ เพื่อหาควรใช้เวลาในการกัดที่เท่าไรจึงจะมีความลึกที่เหมาะสมต่อการสร้างต่อไป ที่คาดว่าความลึกควรอยู่ที่ประมาณ $4\ \mu\text{m}$ โดยการกัดทั้ง3เงื่อนไขนั้น เราทำการวัดขนาดของความลึกไว้ โดย ไม่เป็นตามคาด เนื่องจาก การเกาะบนผิวซิลิคอนของสารเคมี

บางชนิดทำให้ไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ โดยเวลาที่กำหนดคือ 8 , 12 และ 16 นาที ความลึกในการกัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของร่องรูปตัวยู เวลา 8 นาที่ เท่ากับ $3.556 \mu\text{m}$ ความลึกในการกัดของร่องรูปตัวยู เวลา 12 นาที่ เท่ากับ $3.981 \mu\text{m}$ ความลึกในการกัดของร่องรูปตัวยู เวลา 16 นาที่ เท่ากับ $8.365 \mu\text{m}$ เสร็จในกระบวนการกัดแล้วลอกชั้นออกไซด์ที่เหลือแล้วนำไปวัดผลทางไฟฟ้าต่อไป

ในส่วนต่อมาเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู พบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วไหล ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มีค่าเท่ากับ $1.8 \mu\text{A}$ โดยที่เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่ความเข้มแสง $5,000, 10,000, 15,000, 20,000$ และ $25,000 \text{ lux}$ ตามลำดับ จะได้กระแสแสงเท่ากับ $8.6, 14.25, 18, 20.62$ และ $23.6 \mu\text{A}$ ตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

ในส่วนสุดท้ายนี้เป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ในส่วนนี้มีลักษณะสมบัติทางกายภาพ และลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า พบว่าลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงจากโครงสร้างร่องรูปตัวยูมีพื้นที่ในการรับแสงเพิ่มขึ้น โดยบริเวณพื้นที่รับแสงด้าน จะมีเพิ่มขึ้น จากแบบพลาแนร์ จากศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ในกรณีที่ไม่มีการมีแสงตกกระทบบนและมีแสงตกกระทบบน ขณะไม่มีแสงตกกระทบบนนั้น คือ กระแสมืดได้มีปรับปรุงมาจากการทำโครงการในปี 3 และปี 4 เทอม 1 โดยการทำการกระบวนการให้มีความสะอาดมากขึ้น แต่ทำเข้ามาขึ้น จึงส่งผลให้กระแสมืดเทียบกับเทอมที่แล้ว จะลดถึง 5 เท่า ทำให้ได้ค่าใกล้เคียงกับกระแสมืดของแบบพลาแนร์อีกด้วย และการวัดขณะมีแสงตกกระทบบน โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ในการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขได้รับแสงมาตกกระทบบนจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสงระหว่าง $5,000$ ถึง $20,000 \text{ lux}$ โดยการให้แรงดันไบอัสจาก 0 ถึง 10 V ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาการกัด 8 นาที่ จะมีกระแสแสงประมาณ $15.21, 24.41, 28.83, 35.55$ และ $39.64 \mu\text{A}$ ตามลำดับ ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาการกัด 12 นาที่ จะมีกระแสแสงประมาณ $14.63, 23.16, 28.54, 35.97$ และ $39.1 \mu\text{A}$ ตามลำดับ ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ใช้เวลาการกัด 16 นาที่ จะมีกระแสแสงประมาณ $28.07, 41.81, 50.18$ และ $62.33 \mu\text{A}$ ตามลำดับ นอกจากนี้ได้มีการนำชิ้นไปวัดส่วนของคุณสมบัติทางไฟฟ้าสมบัติ ค่าประจุไฟฟ้า-แรงดันโดยขณะไม่มีแรงดันไบอัส มีค่า $31.2, 22.8, 19.7$ และ 14.4 pF ตามลำดับ ทำให้เห็นว่ายังมีความลึกมากยังมีค่าประจุไฟฟ้าต่ำลง เนื่องจากสมการให้คำนวณหา ระยะบริเวณปลอดพาหะ

จากการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกัตร่องรูปตัวยู หรือ UMSM โดยใช้เทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก สามารถสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีพื้นที่รับแสงเพิ่มมากขึ้นและมีการตอบสนองทางแสงได้ คาดว่าจะเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ศุภเดช., “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, พิมพ์ครั้งที่ 4 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.
- [2] สมเกียรติ ศุภเดช., “เซมิคอนดักเตอร์ไอซ์”, พิมพ์ครั้งที่ 3 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.
- [3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : มินเซอร์วิสต์ซ์พพลาย, พ.ศ. 2558.
- [4] งามจิต มงคลธนานนท์, “การศึกษาการกัดผ่านผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปด้วยโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559
- [5] ธเนศ โชะเหม, “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6] สรายุทธ์ วิศวแสวงสุข, “การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545ง. 2548
- [7] Thanakrit Sanghong. “FABRICATION OF Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR BY ANISOTROPIC SILICON ETCHING TECHNIQUE”, Master of Engineering thesis Microelectronics Engineering , King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้างแบบร่องรูปตัว U โดยสารละลาย TMAH
The fabrication type U-shaped Al/n-Si/Al photodetector by TMAH solution

นายจิตรกร ภาค และ นาย ธนพล เผ่าชัย

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ. ฉลอมกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นการศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้างแบบร่องรูปตัว U โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ในการกัดแผ่นซิลิคอนให้มีพื้นผิวเรียบ โดยทำการสร้างขั้วไฟฟ้าขนาด 1 mm² ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 40 μm จากการออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง พบว่า ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว U ที่ใช้ความลึกจากค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะประมาณ 4 μm มีพื้นที่ในการรับแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ถึง 1.7 เท่า จากนั้นทำการทดลอง เพื่อทดสอบความลึกที่มีผลกระทบต่อกำลังไฟฟ้าอย่างไร เมื่อแสงตกกระทบโดยการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการกระบวนการกัดเป็น 8, 12 และ 16 นาที พบว่าได้ความลึกอยู่ที่ 3.556, 3.981 และ 8.365 μm ตามลำดับ

เมื่อทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าขณะไม่มีแสงตกกระทบ พบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัว U มีกระแสมืดอยู่ในช่วง 2-4 μA ซึ่งค่ากระแสมืดที่ได้ใกล้เคียงกับแบบพลาแนร์ และเมื่อทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเมื่อมีแสงตกกระทบที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ และความเข้มแสง 25000 lux พบว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัว U ที่ทำการเปลี่ยนแปลงความลึกมีค่ากระแสแสงมากกว่าแบบพลาแนร์ใกล้เคียงกัน อยู่ที่ 1.6 เท่า จากนั้นทำการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัว U พบว่ามีความจุไฟฟ้าลดลงต่ำลงเมื่อทำการเทียบกับค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์

Abstract

This project is fabrication process of U-shaped Al/n-Si/Al photodetector by using Tetramethyl ammonium Hydroxide (TMAH). Etching silicon wafer cause smooth surface by design electrode is 1 mm², its has distance between electrode is 40 μm. Design structure of photodetector. its show U-shaped has depth from expanded of Depletion region is 4 μm. It has light area more than planar 1.7 x. Experiment show depth affect to Characteristic when light condition by change etching time to 8, 12 and 16 minutes. Measuring depth of photodetector has 3.556, 3.981 and 8.365 μm. Testing to characteristic of photodetector when dark condition show U-MSM has dark current at 2-4 μA nearby dark current of planar and Testing at voltage bias 10 V and intensity of light 25000 lux. It show photocurrent of U-MSM more than planar 1.6 X. Testing capacitance of U-MSM less than planar.

1. บทนำ

จากการศึกษาที่ผ่านมาได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบหรือแบบพลาแนร์ ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ง่ายต่อ

กระบวนการสร้าง ไม่ยุ่งยากซับซ้อน แต่พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างแบบพลาแนร์ นั้นจะมีพื้นที่รับแสงจำกัดอยู่ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง การศึกษาค้นคว้าจึงมีแนวความคิดในการเพิ่มพื้นที่รับแสงซึ่งอยู่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยการกัดเป็นร่องรูปตัว U โดยที่ไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งใช้กระบวนการกัดแบบเปียกด้วยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ หรือ TMAH ในการกัดบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงให้เป็นร่องรูปตัว U สามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงได้ถึง 1.7 เท่าเมื่อเทียบกับแบบพลาแนร์ โดยตั้งสมมติฐานได้ว่า การเปลี่ยนแปลงของพื้นที่รับแสงนั้น มีผลต่อการเพิ่มคู่อิเล็กตรอน-โฮลในแถบตัวนำ ทำให้กระแสที่ได้มีความสูงขึ้นเมื่อนำมาเปรียบเทียบกับแบบพลาแนร์และทำให้ค่าประจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นต่ำกว่าแบบพลาแนร์เพราะพื้นผิวที่หายไปอีกด้วย

2. การทดลอง

2.1 กระบวนการสร้าง

กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาด เพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะทำการเป็นขั้นตอนแรกของการกระบวนการสร้างทั้งหมดและถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลงได้

2.2 กระบวนการกัดแบบตัวตรวจวัดแสง

ลวดลายกระจกต้นแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์คือ โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งจะประกอบไปด้วยรอยสัมพันธ์ระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมพันธ์คือ 2 รอยสัมพันธ์ ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ 1x1 mm² มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านมีขนาด 40 μm ดังแสดงในรูปที่ 1 แสดงลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์คือ



รูปที่ 1 ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์คือ

2.3 กระบวนการโฟโตลิโกราฟี

กระบวนการโฟโตลิโกราฟี ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงานเพื่อสร้างลวดลายขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระจกต้นแบบ ที่เรียกว่า โฟโตมาสก์ (photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ที่ได้มาจากการออกแบบ

2.4 การเตรียมสารละลาย TMAH

โดยในแต่ละอัตราส่วน ให้มีปริมาณใกล้เคียงกับ 200 มิลลิลิตร โดยมีการเพิ่มให้มากกว่า 200 มิลลิลิตรตามจำนวนอย่างง่าย แต่เนื่องจากในการทดลองเทอมที่ผ่านมาได้ทราบอัตราส่วนผสมระหว่าง TMAH กับ H₂O โดยได้อัตราส่วน 1:2 ที่มีการกัดแผ่นซิลิคอนได้มากที่สุดในการทดลองเทอมที่ผ่านมา จึงนำมาใช้ต่อโดยการเติมผงซิลิคอนลงไปเพื่อให้การกัดคืออะลูมิเนียมขอลง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กระบวนการกัด

การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนสารละลายที่ใช้กันคือ เตตระเมทริวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl ammonium Hydroxide : TMAH) โดยมีความเข้มข้น 25 wt% ผสมกับน้ำในอัตราส่วน 2 เท่า และผสมกับผงซิลิคอนตามอัตราส่วนข้างต้น เพื่อใช้ในกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนให้มีลักษณะโครงสร้าง U-shape



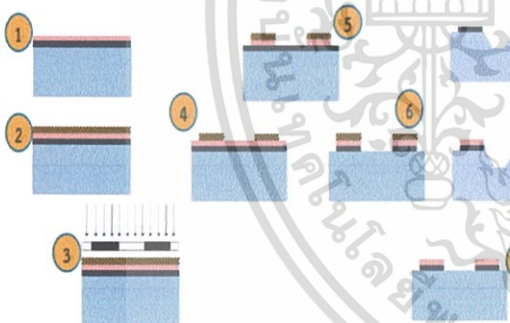
รูปที่ 2 อุปกรณ์สำหรับกระบวนการกัด

2.6 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

ตัวตรวจวัดแสงและข้อต่อที่ไดโอดที่สร้างขึ้นนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็น Al/n-Si/Al เมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการวัดค่ากระแส-แรงดัน



รูปที่ 3 อุปกรณ์จ่าย และวัดวัดแรงดันของตัวตรวจวัดแสง

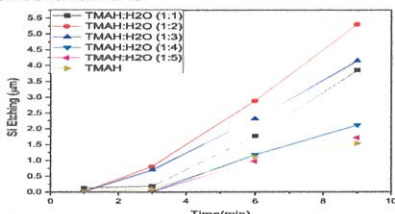


รูปที่ 4 ภาพภาคตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM

3. ผลการทดลอง

จากการทดลองเมื่อเทอมที่ผ่านมา ได้ผลการทดลองจากกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนที่ระนาบ (100) ในสารละลาย TMAH และสารละลาย TMAH:H₂O จะเห็นว่าพื้นผิวของแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนโดยแสดงผลเป็นระยะความลึกของการกัดต่ออัตราส่วนของสารละลายการกัดซิลิคอน

3.1 การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนโดยแสดงผลเป็นระยะความลึกของการกัดต่ออัตราส่วนของสารละลาย



รูปที่ 5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการกัดซิลิคอนในเวลาต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการกราฟทำให้เห็นว่า อัตราส่วน 1:2 เนื่องจากมีสารตั้งต้นมากพอที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาสูงสุดและ ความสามารถในการกัดสูงสุดซึ่งในการกัดครั้งนี้จึงเลือกเป็นอัตราส่วนเงื่อนไขที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง เราต้องการให้มีระยะความลึกประมาณ 4 μm ซึ่งคำนวณจากความกว้างบริเวณปลอดพาหะสัมพันธ์กับความต้านทานของแผ่นซิลิคอนที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง ทำให้สามารถกำหนดระยะเวลาในการกัดได้คือ 8,12 และ 16 นาที

3.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยการวัดค่าความลึกด้วยเครื่อง Profilometer

หลังจากผ่านกระบวนการกัดเพื่อใช้สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ได้ทำการวัดค่าความลึกด้วยเครื่อง Profilometer ซึ่งได้ความลึกในการกัดของสารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วน 1:2 (TMAH : H₂O) เป็นอัตราการกัดที่ดีที่สุดนำมาจัดทำ

ตารางที่ 1 แสดงอัตราการกัดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยูในเวลาต่างๆ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู	ความลึกของการกัด (μm)
เวลาในการกัด 8 นาที	3.556
เวลาในการกัด 12 นาที	3.981
เวลาในการกัด 16 นาที	8.365

3.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 5000 เท่า ที่บริเวณร่องรูปตัวยูเพื่อดูพื้นผิวของชิ้นงานระหว่างช่วงทั้งสองขั้ว ซึ่งพื้นผิวชิ้นงานมีความเรียบในระดับหนึ่งแต่ยังมีพื้นผิวเพียงเล็กน้อยที่ยังเป็นรอยขรุขระ

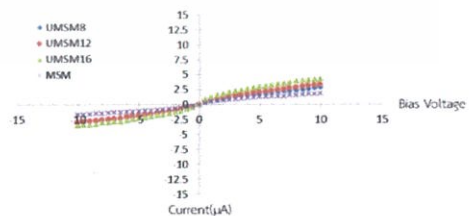


(ก)

(ข)

รูปที่ 6 (ก) ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 1000 เท่า ที่บริเวณขั้ว (ข) ภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) กำลังขยาย 5000 เท่า

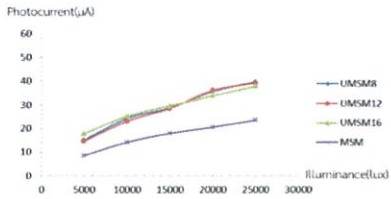
3.4 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 7 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากรูปเห็นได้ว่าค่ากระแสสมมติของตัวตรวจวัดแสงทั้งหมดนั้นใกล้เคียงกันทำให้การสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูนั้น มีการประหยัดมากขึ้นเนื่องจากสามารถเพิ่มกระแสแสงได้โดยกระแสมีค่าใกล้เคียงกับแบบพลาแนร์

3.5 การศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มข้นของแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะได้รับแสงตกกระทบ



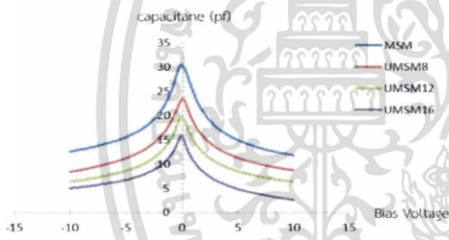
รูปที่ 8 สมบัติกระแส-ความเข้มข้นของแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อเปรียบเทียบกระแสแสงที่ความเข้มแสงทุกความเข้มนั้นจะทำให้เห็นว่า ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปทุกตัวนั้นมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ประมาณ 1.6-1.7 เท่า จึงเป็นไปตามที่คำนวณจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงที่ประมาณ 1.7 เท่า

ตารางที่ 2 อัตราส่วนเปรียบเทียบกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวอยู่กับตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ที่ความเข้มแสง 25000 lux

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัว	กระแสแสงที่ความเข้มแสง 25000 lux
เวลาในการกัก 8 นาที	1.68 เท่า
เวลาในการกัก 12 นาที	1.657 เท่า
เวลาในการกัก 16 นาที	1.602 เท่า

3.6 การศึกษาลักษณะคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al



รูปที่ 9 ความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al

พบว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al มีความสมมาตรกันซึ่งจะมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสตั้ง ความสัมพันธ์ของสมการ คือเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่แรงดันไบอัส 0 V ค่าความจุไฟฟ้าของอุปกรณ์มีค่าประมาณ 30.31, 23.48, 19.49 และ 15.88 pF

4. สรุปผลและวิเคราะห์ผลการทดลอง

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการทำงาน วิธีการสร้างและการวิเคราะห์ผลทางภาพและไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์และแบบร่องรูปตัว ซึ่ง กระบวนการสร้างเริ่มจากใช้แผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีระนาบ (100) และมีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร เพื่อใช้ในการสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมโดยใช้กระบวนการสปัตเตอร์ จากนั้นทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์ ทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าไว้ใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัว หลังจากที่ได้ตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์แล้วจึงทำการกัดบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 8.3 wt% อุณหภูมิที่ใช้ในการกัดซิลิคอน 80 องศาเซลเซียส ในเวลาการกัด 8, 12 และ 16 นาทีตามลำดับ เพื่อหาควรใช้เวลาในการกัดที่เท่าไรจึงจะได้ความลึกที่เหมาะสมต่อการสร้างต่อไป ที่คาดว่าความลึกควรอยู่ที่ประมาณ 4 µm โดยการกัดทั้ง 3 เงื่อนไขนั้น เราทำการวัดขนาดของความลึกไว้ โดย ไม่เป็นไปตามคาด เนื่องจาก การเกาะบนผิวซิลิคอนของสารเคมีบางชนิดทำให้ไม่เป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ ระยะเวลาที่กำหนดคือ 8, 12 และ 16 นาที ความลึกในการกัดของร่องรูปตัว เวลา 8 นาที เท่ากับ 3.556 µm

ความลึกในการกัดของร่องรูปตัว เวลา 12 นาที เท่ากับ 3.981 µm ความลึกในการกัดของร่องรูปตัว เวลา 16 นาที เท่ากับ 8.365 µm เสร็จในกระบวนการกัดแล้วลอกชั้นออกไซด์ที่เหลือแล้วนำไปวัดผลทางไฟฟ้าต่อไป

โดยแบบพลาแนร์นั้นใช้ในการเปรียบเทียบซึ่งทางผู้จัดทำนั้นได้สร้างขึ้นและมีผลเป็นที่ยอมรับได้จากงานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาในอดีต ซึ่งมีค่าต่างๆใกล้เคียงกัน พบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ที่สร้างขึ้นมีกระแสรั่วไหล ที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V มีค่าเท่ากับ 1.8 µA โดยที่เมื่อให้แรงดันไบอัสเท่ากับ 10 V ที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux ตามลำดับ จะได้กระแสแสงเท่ากับ 8.6, 14.25, 18, 20.62 และ 23.6 µA ตามลำดับ จากนั้นนำผลการทดลองที่ได้ไปเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัว

จากศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวทั้งในกรณีที่ไม่ไม่มีแสงตกกระทบและมีแสงตกกระทบ ขณะไม่มีแสงตกกระทบนั้น คือ กระแสมืดได้มีปรับปรุงจากการทำโครงการในปี 3 และปี 4 เอม 1 โดยการทำการกระบวนการให้มีความสะอาดมากขึ้น แต่ทำซ้ำมากขึ้น จึงส่งผลให้กระแสมืดเทียบกับเทอมที่แล้ว จะลดลง 5 เท่า ทำให้ได้ค่าใกล้เคียงกับกระแสมืดของแบบพลาแนร์อีกด้วยและการวัดขณะมีแสงตกกระทบนั้น โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน ในการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าโดยการวัดความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดันภายใต้เงื่อนไขที่รับแสงมาตกกระทบจากหลอดฮาโลเจนที่มีความเข้มแสงค่าต่างๆ ที่ความเข้มแสงระหว่าง 5,000 ถึง 20,000 lux โดยการให้แรงดันไบอัสจาก 0 ถึง 10 V ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวที่ใช้เวลาการกัด 8 นาทีจะมีกระแสแสงประมาณ 15.21, 24.41, 28.83, 35.55 และ 39.64 µA ตามลำดับ ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวที่ใช้เวลาการกัด 12 นาที จะมีกระแสแสงประมาณ 14.63, 23.16, 28.54, 35.97 และ 39.1 µA ตามลำดับ ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวที่ใช้เวลาการกัด 16 นาที จะมีกระแสแสงประมาณ 28.07, 41.81, 50.18 และ 62.33 µA ตามลำดับ นอกจากนี้ได้มีการนำชิ้นไปวัดส่วนของคุณสมบัติทางไฟฟ้าสมบัติ ค่าประจุไฟฟ้า-แรงดันโดยขณะไม่มีแรงดันไบอัส มีค่า 31.2, 22.8, 19.7 และ 14.4 pF ตามลำดับ ทำให้เห็นว่ายังมีค่าความลึกมากยิ่งขึ้นค่าประจุไฟฟ้าต่ำลง เนื่องจากสมการที่คำนวณหา ระยะบริเวณปลอดพาหะ จากการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบกึ่งร่องรูปตัว หรือ UMSM โดยใช้เทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก สามารถสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีพื้นที่รับแสงเพิ่มมากขึ้นและมีการตอบสนองทางแสงได้ คาดว่าจะเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1]สมเกียรติ ศุภเดช., “เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม”, พิมพ์ครั้งที่ 4 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.
- [2]สมเกียรติ ศุภเดช., “เซมิคอนดักเตอร์ไอซ์”, พิมพ์ครั้งที่ 3 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.
- [3]สุรศักดิ์ นิยมเจริญ, “รอยลัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ : มินเซอร์วิสิซัฟหลาย, พ.ศ. 2558.
- [4]วงมจิต มงคลอนานนท์, “การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัว โดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559
- [5] ธนศ โสพะเหม, “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [6]สราวุธ วิศวแสงสุข, “การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/Si/Al”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2545.
- [7]Thanakrit Sanghong. “FABRICATION OF Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR BY ANISOTROPIC SILICON ETCHING TECHNIQUE”, Master of Engineering thesis Microelectronics Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้