

การกัดผิวซิลิคอนให้เรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับ
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

SILICON ETCHING WITH A SMOOTH SURFACE BY TMAH SOLUTION
ADDING IPA SURFACTANT FOR Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR

วุฒิไกร คำอ่อน
Wutikrai Khamon

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-043-052

การกัดผิวซิลิคอนให้เรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับ
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

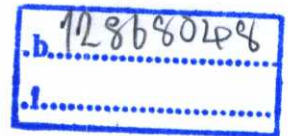
SILICON ETCHING WITH A SMOOTH SURFACE BY TMAH SOLUTION
ADDING IPA SURFACTANT FOR Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR



T148259

วุฒิไกร คำอ่อน

Wutikrai Khamon



เลขหมู่.....
เลขทะเบียน 148259
รับเดือนปี 18 ต.ค. 2560

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-043-052

SILICON ETCHING WITH A SMOOTH SURFACE BY TMAH SOLUTION
ADDING IPA SURFACTANT FOR Al_n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR

Wutikrai Khamon

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2017
KMITL-2017-EN-M-043-052

COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การกัดผิวซิลิคอนให้เรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจวัดแสง
โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

Thesis Title Silicon Etching with a Smooth Surface by TMAH Solution Adding IPA
Surfactant for Al/n-Si/Al UMSM Photodetector

นักศึกษา นายวุฒิไกร คำอ่อน

รหัสประจำตัว 57601192

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-043-052

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
รศ.ดร.วิสุทธิ์	ฐิติรุ่งเรือง	
ดร.รังสรรค์	เมืองเหลือ	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 15.00-17.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

คณบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกัดผิวซิลิคอนให้เรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู
นักศึกษา	นายวุฒิไกร คำอ่อน
รหัสนักศึกษา	57601192
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอกระบวนการกัดแบบเปียก เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยมุ่งเน้นให้พื้นผิวของซิลิคอนมีความราบเรียบ ซึ่งสารละลายที่นำมาใช้ในกระบวนการกัด คือ สารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ซึ่งมีคุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก แผ่นที่นำมาใช้สร้างตัวตรวจวัดแสง คือ แผ่นซิลิคอน ชนิดเอ็น มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω -cm และความหนา 625 μm จากการทดลองพบว่าสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 wt% พื้นผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบอยู่ที่ความเข้มข้น 25 wt% อุณหภูมิในการกัด โดยใช้อุณหภูมิในการกัดอยู่ที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส เมื่ออุณหภูมิลดลง จะทำให้พื้นผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบมากขึ้น ความเร็วรอบในการกวนสาร โดยใช้สารละลาย TMAH โดยใช้ความเร็วรอบในการกวนสารอยู่ที่ 150, 250, 350 และ 450 รอบต่อนาที โดยจะเห็นว่าความเร็วรอบที่ทำให้พื้นผิวเรียบอยู่ที่ 250 รอบต่อนาที สารลดแรงตึงผิวไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) โดยเติมสารลดแรงตึงผิว IPA ที่ปริมาณ 10, 20 และ 30 vol% โดยสารลดแรงตึงผิว IPA ที่ปริมาณ 30 vol% ทำให้พื้นผิวที่ถูกกัดมีความราบเรียบมาก การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 15, 20 และ 25 wt% ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% โดยการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบมีค่ากระแสเท่ากับ 2.3 μA , 4.0 μA , 3.2 μA และ 2.8 μA ตามลำดับ ที่แรงดันไบอัส 10 V การทดสอบคุณสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับความเข้มแสง 25,000 lux ค่ากระแสแสงเท่ากับ 28.9 μA , 49.8 μA , 49.0 μA และ 50.6 μA ตามลำดับ ที่แรงดันไบอัส 10 V ซึ่งค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ 1.7 เท่า และความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นมีความจุไฟฟ้าลดลง เนื่องจากพื้นที่บริเวณปลอดพาหะรอบข้างของขั้วไฟฟ้าถูกกัดออกไป

Thesis Title	Silicon Etching with a Smooth Surface by TMAH Solution Adding IPA Surfactant for Al/n-Si/Al UMSM Photodetector
Student	Mister Wutikrai Khamon
Student ID	57601192
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This thesis presents the fabrication of U-shape photodetector by wet etching. By emphasizing to make the smooth silicon surface with tetramethyl ammonium hydroxide in etching process that characteristic of etching is anisotropic etching. n-type silicon is used for photodetectors fabrication. The resistivity is about 5-10 Ω -cm and thickness about 625 μ m. From the etching experimental, different concentrations of tetramethyl ammonium hydroxide at 5, 10, 15, 20 and 25 wt% found that smooth silicon surface at 25 wt%. For different etching temperatures were used at the temperatures of 40, 60 and 80 $^{\circ}$ C. Etched silicon surface can be smoother when etching temperature decrease. The etching solution was stirred at a stirring speed of 150, 250, 350 and 450 rpm. The results shown that at a stirring speed of 250 rpm is influence to surface smoothness. Isopropyl alcohol was used to be surfactant solution at different volumes of 10, 20 and 30 vol% then it is found that at volumes of 30 vol% effect to the silicon surface is smoother than before. Electrical properties study and photo response of planar photodetectors and etched U-shape photodetectors with tetramethyl ammonium hydroxide along with adding the IPA Surfactant about 30 vol% at the concentration of 15, 20 และ 25 wt% by measuring the current-voltage properties of photodetectors while dark. The current values are 2.3 μ A, 4.0 μ A, 3.2 μ A and 2.8 μ A, respectively, at bias voltages of 10 V. The investigation of $I_{\text{photo}}-V$ characteristic in photodetector while it obtained the light at intensity of 25,000 lux, the photocurrent values were 28.9 μ A, 49.8 μ A, 49.0 μ A and 50.6 μ A, respectively at bias voltages of 10 V that the photocurrent of U-shape structure photodetector more than planar structure photodetector is 1.7 times and the capacitance values of planar and U-shape photodetector decrease because the depletion region around the electrodes were excised.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษารองศาสตราจารย์ ดร. สุธศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้ อบรมสั่งสอน ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมถึงปลูกฝังสิ่งที่ตั้งใจให้แก่ศิษย์ทุกคน

ขอขอบคุณ ดร. อัมพร โพธิ์เฒ่า ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC), ดร. จิรวัดน์ ปราบเขต และ นักวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในการทดลองบางส่วน ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ, คุณภววรรณตรี บ่อไทย และเจ้าหน้าที่งานศูนย์เครื่องมือ วิทยานวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการเอื้ออำนวยความสะดวก Microscope ในการทดลองงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณไอลดา สุวรรณชาติ ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้าน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือและแนะนำสิ่งต่างๆ ในชีวิต รวมถึงบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้ให้สำเร็จไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

วุฒิไกร คำอ่อน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อ.....	XI
รายการสัญลักษณ์.....	XII
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	5
2.1 กระบวนการกัด.....	5
2.1.1 การกัดแบบเปียก.....	5
2.1.2 การกัดแบบแห้ง.....	9
2.2 สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นผลึกซิลิคอน.....	11
2.2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย KOH.....	11
2.2.2 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย EDP.....	11
2.2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH.....	12
2.3 สารลดแรงตึงผิว.....	14
2.3.1 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์.....	16
2.4 การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก.....	18
2.4.1 ปฏิกิริยาการกัดซิลิคอน.....	18
2.4.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน.....	19
2.4.3 ความสัมพันธ์เชิงเลขาคณิตของตัวตรวจวัดแสงร่องรูปด้วย.....	20
2.5. ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	21
2.5.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล.....	21
2.5.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	22
2.5.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบ.....	24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM.....	25
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	27
3.1 การออกแบบและสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง	27
3.2 กระบวนการสร้าง	29
3.3 การทดลอง.....	34
3.3.1 ดูพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง	34
3.3.2 วัดความลึกด้วยเครื่อง Surface Profilometer.....	35
3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	35
3.3.4 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า	36
3.3.5 การวัดการตอบสนองทางแสง.....	37
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	38
4.1 การศึกษาลักษณะของพื้นผิวที่กัด.....	38
4.1.1 ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH	38
4.1.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด	40
4.1.3 ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH	42
4.1.4 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิว.....	43
4.1.4.1 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 10 wt%	44
4.1.4.2 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15 wt%	45
4.1.4.3 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 20 wt%	46
4.2 การศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย.....	47
4.2.1 อัตราการกัดของสารละลาย TMAH.....	48
4.2.2 อัตราการกัดของสารละลาย TMAH ที่เติมสารลดแรงตึงผิว	50
4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	51
4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ ร่องรูปตัวยู.....	54
4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ไม่ได้รับแสงตก กระทบ.....	54

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ได้รับ แสงตกกระทบ.....	55
4.4.3 ลักษณะคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง	59
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	61
เอกสารอ้างอิง	63
ภาคผนวก ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	66
ประวัติผู้เขียน.....	77

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การกัดเป็ยกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH.....	12
2.2 เปรียบเทียบอัตราการกัดของสารละลาย	13
2.3 สมบัติทางเคมีและกายภาพ.....	17
3.1 พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ.....	28
4.1 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ	49
4.2 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	51

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ (ก) พี-เอ็นโพโตไดโอด (ข) พินโพโตไดโอด (ค) อะวาแลนซ์โพโตไดโอด (ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM	2
1.2 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู.....	2
2.1 ลักษณะการกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก.....	6
2.2 ลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก.....	6
2.3 แผนผังของพันธะซิลิคอน (A) ระนาบ (100) และ (B) ระนาบ (111).....	7
2.4 การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอน h คือ ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ สี่เหลี่ยม คือ อะตอมซิลิคอนบนพื้นผิว และ A คือ สารละลายใช้ในการกัด	8
2.5 ลักษณะการกัดแบบแห้ง.....	9
2.6 การกัดด้วยพลาสมา อะตอมของซิลิคอนระเหยออกจากพื้นผิว	9
2.7 การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง อะตอมของซิลิคอนหาปฏิกิริยากับไอออนปฏิกิริยา บนพื้นผิว	10
2.8 การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา.....	11
2.9 โครงสร้างโมเลกุลของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์.....	16
2.10 ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic) พันธะในอะตอม ซิลิคอนระนาบ (100), ระนาบ (111) และระนาบ (110).....	20
2.11 ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีขนาดของมุม 54.7°	20
2.12 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุลความร้อน (ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM (ข) แลปพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อน	22
2.13 แลปพลังงานของตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	23
2.14 แลปพลังงานของตัวตรวจวัด เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ.....	24
2.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ	25
2.16 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส	26
2.17 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM	26
3.1 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM	27
3.2 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM	29
3.3 สลวดลายของกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง	29
3.4 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM.....	31
3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด	33
3.6 (ก) ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัด (ข) ภาพจำลองชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัด.....	34
3.7 ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำมาเชื่อมต่อขา.....	34

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.8 กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง รุ่น OLYMPUS BX51.....	35
3.9 เครื่อง surface profilometer	35
3.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM).....	36
3.11 (ก) เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A (ข) เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station.....	36
4.1 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น (ก) 5 wt%, (ข) 10 wt%, (ค) 15 wt%, (ง) 20 wt%, (จ) 25 wt% ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	39
4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25 wt% ที่อุณหภูมิ (ก) 40, (ข) 60 และ (ค) 80 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	41
4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่อุณหภูมิ (ก) 40, (ข) 60 และ (ค) 80 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า	41
4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 % ที่ความเร็วรอบ (ก) 150, (ข) 250,(ค) 350 และ (ง) 450 รอบต่อนาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า	43
4.5 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol%, (ข) 20 vol%, (ค) 30 vol% ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	44
4.6 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol%, (ข) 20 vol%, (ค) 30 vol% ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	45
4.7 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol%, (ข) 20 vol%, (ค) 30 vol% ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	46
4.8 ตัวอย่างการวัดความลึกของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วย เครื่อง surface profilometer (ก) สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt%, เติม IPA 10 vol% (ข) สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt%, เติม IPA 30 vol%	47
4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนกับความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ	49
4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ใน สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ	50
4.11 ภาพถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย ด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt%, เติม IPA 30 vol% (ก) ภาพถ่ายตัวตรวจวัดแสง UMSM กำลังขยาย 50 เท่า (ข) ภาพถ่ายพื้นผิวที่ก้นหลุมของตัวตรวจวัดแสง UMSM กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	52
4.12 ภาคตัดขวางจากการถ่ายภาพด้วย SEM ที่มีลักษณะเป็นร่องรูปด้วย ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า.....	52

สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13	ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีขนาดของมุม 54.7° 53
4.14	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาสมาและแบบร่องรูปตัวยูขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ 55
4.15	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบพลาสมา..... 56
4.16	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 15 wt%..... 57
4.17	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 20 wt%..... 58
4.18	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25 wt%..... 58
4.19	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงที่แรงดันไบอัส 10 V..... 59
4.20	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง..... 60

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
DI	De-ionization water	น้ำไร้ประจุ
EDP	Ethylenediamine pyrocatechol	เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาที คอล
ERC	Electronic Research Center	ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
FCC	Face Centred Cubic	เฟสเซ็นเตอร์คิวบิก
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
H ₂ O	Water	น้ำ
IPA	Isopropyl alcohol	ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
NaOH	Sodium hydroxide	โซเดียมไฮดรอกไซด์
NH ₄ OH	Ammonium hydroxide	แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
n-Si	N type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
OH	hydroxide	ไฮดรอกไซด์
PR	Photoresist	น้ำยาไวแสง
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO ₂	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโคร อิเล็กทรอนิกส์
TMAH	tetramethyl ammonium hydroxide	เตตระเมทิลแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์
μm	Micrometer	ไมโครเมตร

รายการสัญลักษณ์

E_0	คือ	ระดับสูญญากาศ
E_C	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
E_F	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_{FM}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านโลหะ
E_{FS}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำ
E_g	คือ	ช่องว่างพลังงาน
E_i	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
E_V	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
\mathcal{E}_s	คือ	ค่าเฟอร์มิตวิตีของสารกึ่งตัวนำ
I_0	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
I_F	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง
I_{MS}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
I_R	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสย้อนกลับ
I_S	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
I_{SM}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
I_{photo}	คือ	กระแสแสง
N_D	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้
q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_{bi}	คือ	แรงดันภายใน
W_d	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
χ	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อตักีย
ϕ_M	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_S	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย

การกัด
การกัดแบบเปียก
การกัดแบบแห้ง
การกัดแบบพลาสมา
การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง
การกัดด้วยไอออนที่ ไรต์ต่อปฏิกิริยา
การเกิดส่วนไวต่อปฏิกิริยา
การดูดซับ
การแพร่กระจาย
การโยกย้าย
กรดไฮโดรฟลูออริก
กรดไนตริก
กรดปิร์นยา
กลไกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก
กระบวนการดูดกลืนแสง
กระบวนการสปัตเตอริง
กระแสมืด
กระแสรั่ว
กระแสแสง
การไบอัสตรง
การไบอัสย้อนกลับ
ขั้วแคโทด
ขั้วแอโนด
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ
ช่องว่างแถบพลังงาน
ไดโอดพี-เอ็น
ตัวตรวจวัดแสง
ไตรโคลอเอทิลีน
แถบนำไฟฟ้า

ภาษาอังกฤษ

Etching
Wet etching
Dry etching
Plasma etching
Chemical dry etching
Reactive Ion Etching
Active Species Generation
Adsorption
Diffusion
Migration
Hydrofluoric acid
nitric acid
Piranha
Mechanism of Anisotropic Etching
Absorption process
RF sputtering
Dark current
Leakage current
Photocurrent
Forward bias
Reverse bias
Cathode
Anode
Depletion width
Energy gap
P-N diode
Photodetectors
Trichloroethylene
Conduction band

รายการคำศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ภาษาไทย

แถบวาเลนซ์
เนื้อสารกึ่งตัวนำ
น้ำยาขึ้นลวดลาย
น้ำยาไวแสง
ปฏิกิริยารีดอกซ์
พันธะหลัก
โฟโตมาร์ก
โฟโตลิโธกราฟี
ภาคตัดขวางการจับยึด
รอยสัมผัสซีออตต์กี
รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ
ระดับพลังงานเฟอร์มิ
รีดักชัน-ออกซิเดชัน
สารกึ่งตัวนำชนิดพี
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น
อะซิโตน
แอนไอโซทรอปิก
ไอโซทรอปิก
กำแพงศักย์ภายใน
ค่าสภาพต้านทาน
จุดบกพร่อง
ชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ
ฟังก์ชันงาน

ภาษาอังกฤษ

Valence band
Bulk
Developer
Photoresist
redox reaction
back-bond
Photo mask
Photolithography
Capture cross section
Schottky contact
Metal-semiconductor contact
Fermi energy
Reduction-oxidation
p-type semiconductor
n-type semiconductor
Acetone
Anisotropic
Isotropic
Potential barrier
Resistivity
Defect
Native oxide
Work function

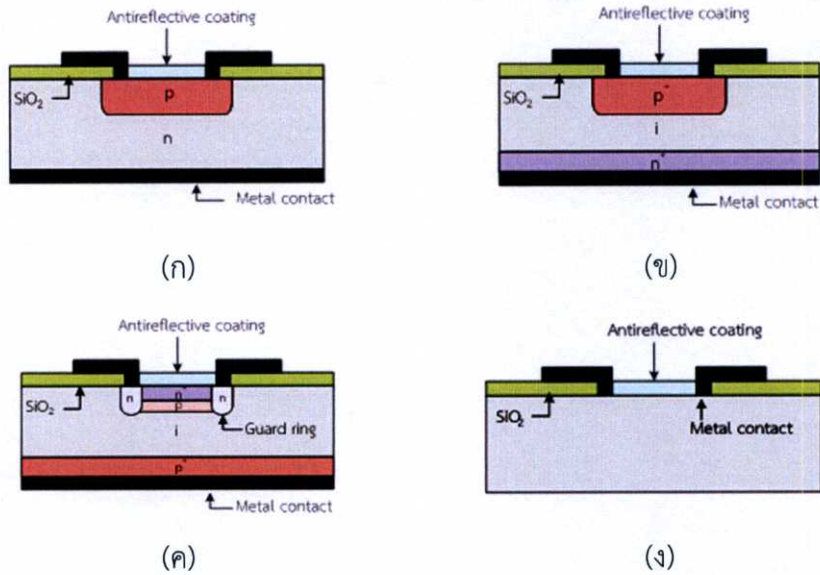
บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

การดำเนินชีวิตของมนุษย์ในปัจจุบัน มีสิ่งอำนวยความสะดวกสบายมากมายหลายชนิด ซึ่งส่งผลให้การใช้ชีวิตของมนุษย์สะดวกสบายมากยิ่งขึ้น ตัวอย่าง รถยนต์ ระบบไฟฟ้า โทรศัพท์ โทรทัศน์ โทรศัพท และคอมพิวเตอร์ เป็นต้น อีกทั้งยังมีการพัฒนาประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง ตั้งแต่อดีตจนมาถึงทุกวันนี้และคาดว่าจะยังคงพัฒนาอีกยาวไกลในอนาคต งานทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ก็เป็นอีกด้านหนึ่งที่มีการคิดค้นและพัฒนาเพื่ออำนวยความสะดวกสบายให้กับมนุษย์ และในปัจจุบันเทคโนโลยีมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว จึงทำให้มีการแข่งขันค่อนข้างสูง โดยการมุ่งเน้นความสำคัญในการรวมเอาเทคโนโลยีหลายๆอย่างไว้ในอุปกรณ์เพียงตัวเดียว และถ้ารวมอุปกรณ์ต่างๆไว้ในเครื่องเดียวนั้นคงหลีกเลี่ยงเรื่องของขนาดเครื่องที่ใหญ่และมีน้ำหนักการจะพกพาไป ณ แห่งหนตำบลใดก็ค่อนข้างจะยากลำบากทำให้ต้องคิดหาวิธีในการที่จะลดขนาดและน้ำหนักของเครื่องมือเหล่านั้นลง และนี่คือส่วนหนึ่งของการค้นคว้าเพื่อสร้างสิ่งอำนวยความสะดวกให้กับมนุษย์ ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจัดได้ว่างานทางด้านนี้นั้นได้มีการวิจัยมาอย่างยาวนานแล้ว และถึงแม้ว่าจะมีการพัฒนามาก่อนแต่ก็ยังคงมีการคิดค้นและหาหนทางในการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ฉะนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีแนวทางในการที่จะเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ชนิดหนึ่ง คือ ตัวตรวจจับแสง (photodetector)

ตัวตรวจจับแสงเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มของแสงโดยสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ตัวตรวจจับแสงมีโครงสร้างหลายลักษณะด้วยกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) [1], พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) [2], อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode) [3] และตัวตรวจจับแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal: MSM) เป็นต้นลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจจับแสงแสดงดังรูปที่ 1.1 โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มซีออตต์กีไดโอด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสซีออตต์กี 2 รอยสัมผัส โดยมีคุณสมบัติเด่น คือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาแนร์ กระบวนการสร้างที่ง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM [4]



รูปที่ 1.1 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ

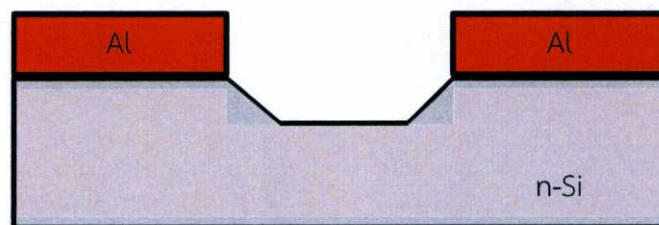
(ก) พี-เอ็นโฟโตไดโอด

(ข) พินโฟโตไดโอด

(ค) อะวาลานซ์โฟโตไดโอด

(ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบเชิงราบหรือแบบพลาแนร์เป็นโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อนเกินไป [5] แต่ในโครงสร้างแบบเชิงราบนั้นจะมีพื้นที่รับแสงที่ขึ้นอยู่กับขนาดของขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างเท่านั้นและในงานวิจัยที่ทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดขั้วไฟฟ้าทั้งสองโดยใช้วิธีของกระบวนการกัด (etching) พื้นผิวของพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง โดยใช้สารละลายเตตระ-เมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethyl ammonium hydroxide, TMAH) [6] การกัดโดยสารละลาย TMAH จะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยู [7] การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเป็นการกัดเลือกกระนาบและทิศทางในการกัดซิลิคอน ซึ่งอัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ (110)>(100)>(111) [8] จะทำให้ได้โครงสร้างดังรูปที่ 1.2



รูปที่ 1.2 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

ซึ่งในวิทยานิพนธ์การกัดดังกล่าวยังไม่ได้ทำการศึกษาพื้นผิวในการกัดแผ่นซิลิคอนอย่างจริงจัง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการทดลองและศึกษาพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนหลังจากกัดด้วยสารละลาย TMAH เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงในรูปแบบโครงสร้างแบบร่องรูป

ตัวต่อไปและใช้ในการเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบพลาสมาในเงื่อนไขที่ใกล้เคียงกันนั้นก็คือพื้นผิวที่เรียบและมีต้นแบบและกระบวนการสร้างที่เหมือนกัน โดยใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นป้องกันในการกัดของสารละลาย TMAH เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดอะลูมิเนียมที่ใช่เป็นขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นชั้นโลหะของอุปกรณ์ และใช้ IPA เป็นสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยให้ผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบมากขึ้นในระดับนาโนเมตร จากนั้นจึงทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาสมาและแบบร่องรูปตัวต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะนำเสนอการศึกษากระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH และสารลดแรงตึงผิวด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบร่องรูปตัว (UMSM)

1. ศึกษาการกัดของแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH เพื่อหาอัตราการกัดด้วยความลึกและพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนหลังการกัด
2. ศึกษาพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย TMAH, อุณหภูมิในการกัด, ความเร็วรอบในการกวาดสาร
3. ศึกษาพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA และหาอัตราการกัดเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิว
4. ศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวที่มีผลต่อกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง และผลของกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับความเข้มแสงในช่วง 5,000 – 25,000 lux เพื่อทดสอบการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะที่แสงมากน้อยแตกต่างกัน
5. ศึกษาผลของความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว เพื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบพลาสมา

1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องศึกษากระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH และทำให้พื้นผิวที่กัดมีความเรียบด้วยสารลดแรงตึงผิว IPA เพื่อนำข้อมูลของกระบวนการกัดมาสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบร่องรูปตัว จากนั้นจึงทำการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในอนาคตต่อไป การศึกษาแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนแรก ศึกษาการกัดและสารละลาย TMAH ที่ใช้สำหรับการกัดแผ่นซิลิคอนให้มีลักษณะเป็นร่องรูปตัวหรือ U-shape และศึกษาสารลดแรงตึงผิวที่ทำให้ผิวที่กัดมีความเรียบ เพื่อจะกำหนดอัตราส่วนผสมที่ใช้สำหรับการกัดและนำไปสู่กระบวนการสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว

ส่วนที่สอง ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว แล้วศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว โดยใช้เครื่อง Surface Profilometer เพื่อวัดความลึกของร่องรูปตัว ใช้กล้องกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงเพื่อดูพื้นผิวแบบหยากก่อนที่จะนำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อศึกษา

พื้นผิวของซิลิคอนในกำลังขยายที่ทำให้มองเห็นพื้นผิวละเอียดขึ้นของชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH และสารละลาย TMAH ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA

ส่วนสุดท้ายการทดสอบตัวตรวจวัดแสงด้วยการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง โดยจะทำการศึกษาค่าคุณสมบัติของกระแส-แรงดัน ซึ่งในกรณีที่ไม่มีแสงตกกระทบ เรียกกระแสที่เกิดขึ้นว่า กระแสรั่วหรือกระแสมืด และทำการทดลองวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าขณะได้รับแสงตกกระทบ โดยเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในช่วง 5,000 – 25,000 lux เพื่อทดสอบการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง และวัดคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ซึ่งนำไปสู่การวิเคราะห์กระแสแสงที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงได้ในโอกาสต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วตติงกี
2. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH จากเทคนิคการกัดแบบเปียกซึ่งทำให้เกิดเป็นร่องรูปตัวยู
3. ความรู้ความเข้าใจผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย TMAH, อุณหภูมิในการกัด, ความเร็วรอบในการกวนสาร
4. ความรู้ความเข้าใจผลของการเปลี่ยนแปลงของพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่มีการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA
5. ความรู้เกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ด้วยการวัดค่ากระแส-แรงดัน ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบและในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยจะศึกษาการเปลี่ยนแปลงเงื่อนไขในการกัดและคุณสมบัติทางไฟฟ้าเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท มีรายละเอียดดังนี้

บทที่ 1 บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่องรูปตัวยู และเหตุผลสนับสนุนต่องานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎี จะกล่าวถึงกระบวนการกัด เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการกัด ทฤษฎีรอยสัมผัสขั้วตติงกี และทฤษฎีของตัวตรวจวัดแสง

บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง จะกล่าวถึงการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสง กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขั้นตอนการทดลองและทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วย ผลของพื้นผิวของซิลิคอนด้วยการกัดของสารละลาย TMAH ด้วยเงื่อนไขต่างๆ ผลอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ทั้งก่อนและหลังจากเติม IPA และผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลอง และแนวทางการพัฒนาตัวตรวจวัดแสง

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบร่องรูปตัวยู หรือ UMSM ด้วยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethyl ammonium hydroxide, TMAH) โดยใช้แนวคิดมาจากกระบวนการสร้างเทคโนโลยีระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical-Systems, MEMS) [9] ซึ่งใช้เทคนิคการกัดและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อปรับปรุงชิ้นงานให้เหมาะสมต่อการใช้งานในด้านต่างๆ ของ MEMS การสร้างตัวตรวจวัดแสงด้วยการกัดเป็น U-Grooved metal-semiconductor-metal photodetector (UMSM-PD) เพื่อลดกระแสรั่วและเพิ่มประสิทธิภาพภายในของตัวตรวจวัดแสง [10] และ Silicon etching characteristics for tetramethylammonium hydroxide-based solution with additives [11] เพื่อศึกษากระบวนการกัดและเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า จากนั้นจะทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ดังในบทนี้ จะเป็นการกล่าวถึงทฤษฎีและหลักการต่างๆที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

2.1 กระบวนการกัด

กระบวนการกัดนี้เป็นกระบวนการกัดด้วยสารเคมีโดยทั่วไปจะเป็นการสร้างลวดลายวงจรในงานอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมีกระบวนการกัดสองประเภทคือ การกัดแบบเปียก (wet etching) และการกัดแบบแห้ง (dry etching) เมื่อทำการกัดผิวหน้าของวัสดุด้วยสารเคมีหรือก๊าซแล้วนั้นจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุมีลักษณะเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) 0tเป็นการกัดแบบสม่ำเสมอในทุกทิศทาง หรือแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) จะเป็นการกัดแบบสม่ำเสมอในทิศทางของระนาบ การกัดแบบเปียกมักจะมีอัตราการกัดที่เร็วกว่าการกัดแบบแห้งและสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดได้โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันหรือความเข้มข้นของสารขึ้นอยู่กับนำไปใช้งาน [12,13]

2.1.1 การกัดแบบเปียก

การกัดแบบเปียก (Wet etching) เป็นการกัดผิวหน้าของวัสดุโดยจะใช้สารเคมีที่เป็นของเหลวหรือที่เรียกว่า “etchants” เพื่อกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยจะสร้างลวดลายไว้บนผิวหน้าของวัสดุเป็นการกำหนดลวดลายก่อนทำการกัดในส่วนที่ไม่ต้องการออก

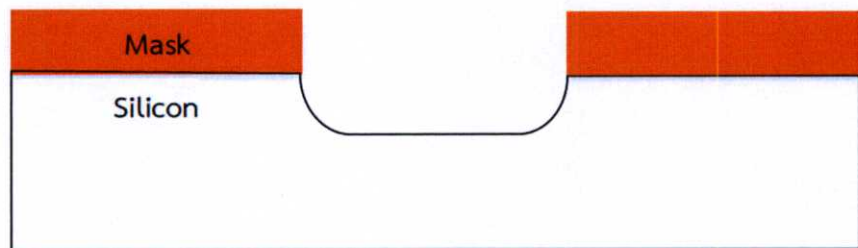
ขั้นตอนในกระบวนการกัดแบบเปียกจะต้องเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารละลายที่ใช้ในกระบวนการ ดังนั้นในกระบวนการกัดแบบเปียกจะอธิบายได้ 3 ขั้นตอนดังนี้

- (1) การแพร่กระจายของสารละลายบนผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ
- (2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายและผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox-reaction) ปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้ออกซิเดชันของวัสดุที่ละลายแล้วเกิดออกซิไดซ์
- (3) การแพร่กระจายของสารละลายโดยเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุที่มีปฏิกิริยาตอบสนอง [14]

การกัดแบบเปียกจะแบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

(1) การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก (isotropic etching)

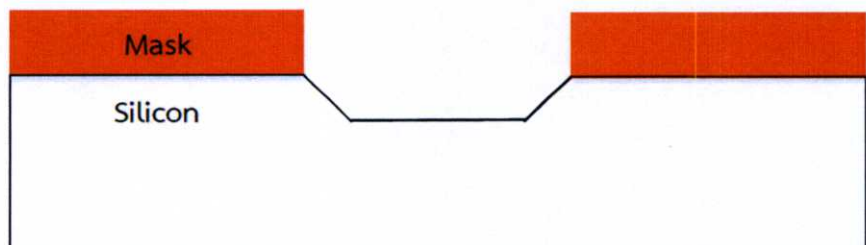
การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะมีส่วนผสมของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) กรดไนตริก (nitric acid) และกรดอะซิติก (acetic acid) เป็นสารละลายที่ใช้สำหรับการกัดซิลิคอน โดยการกัดนั้นจะมีความเข้มข้นของสารละลายที่เป็นการกำหนดอัตราการกัดและการกัดส่วนใหญ่จะใช้ซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิคอนไนไตรด์เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกันการกัดเนื่องจากการกัดลดลง การกัดด้วยสารเคมีโดยทั่วไปมักจะเป็นลักษณะไอโซทรอปิก ดังรูปที่ 2.1 แต่การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะไม่นิยมนำมาใช้ทำการกัดซิลิคอน



รูปที่ 2.1 ลักษณะการกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก

(2) การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching)

สารละลายที่ทำการกัดบนผิวหน้าของวัสดุ ในอัตราที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดผลึกของวัสดุกับสารละลายที่ใช้ในการกัดซึ่งจะมีความแตกต่างของอัตราการกัดขึ้นอยู่กับระนาบของผลึกในวัสดุ เช่น ซิลิคอนจะเกิดการกัดในลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกสูงมาก สารละลายบางตัวเท่านั้นที่จะทำให้เกิดการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกได้ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกอล (EDP) และเตตระ-เมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกในระนาบ (100) จะมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูแสดงในรูปที่ 2.2 [15]

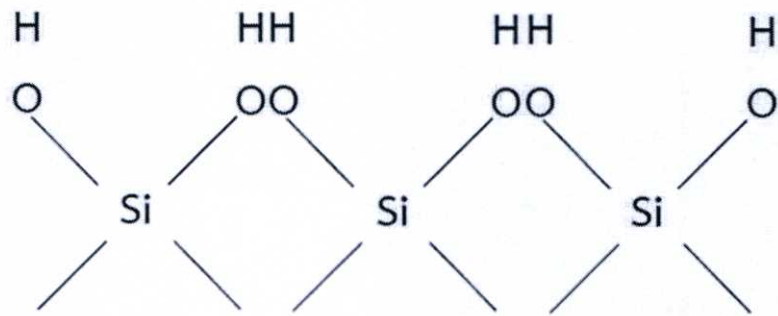


รูปที่ 2.2 ลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

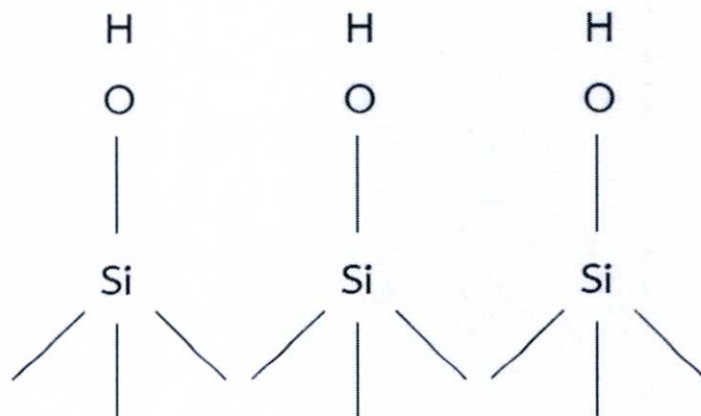
กลไกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Mechanism of Anisotropic Etching)

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมีรายละเอียดเป็นอัตราการกัด, การเกิดปฏิกิริยาและพื้นผิวของวัสดุ แสดงให้เห็นว่ากลไกที่ซับซ้อนมีส่วนร่วมในการกัดซิลิคอนในสารละลายที่เป็นด่าง รูปแบบของกลไกนี้มีปัจจัยอยู่ 3 แบบ (1) สาเหตุทางกายภาพของความแตกต่างในอัตราการกำจัดอะตอมจากพื้นผิวของผลึกทิศทางที่ต่างกันอย่าง (2)กระบวนการเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวที่เป็นสาเหตุทางกายภาพและ (3) สภาพพื้นผิวที่กำหนดอัตราการกำจัดอะตอมพื้นผิว

ทางกายภาพในประการแรกที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี back-bond strength นั่นคืออะตอมในพื้นผิวของระนาบ (111) มีสามพันธะเชื่อมต่อกับตาข่ายพื้นผิวในขณะที่พื้นผิวของระนาบ (100) นั้นมีเพียงสองพันธะที่ยึดเกาะอยู่ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.3 พันธะของอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวจะถูกสารละลายชนิด OH^- ดึงออกจากการยึดเกาะของพันธะ จำนวนของพันธะหลัก (back-bond) และความแข็งแรงของพันธะบนพื้นผิวเพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกันของพื้นผิวของผลึก คือ สาเหตุพื้นฐานทางกายภาพของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก



(A) (100) Surface

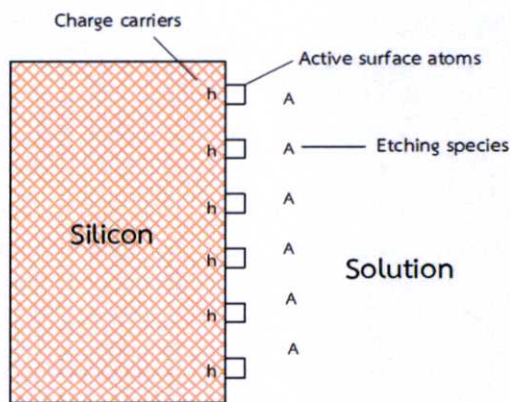


(B) (111) Surface

รูปที่ 2.3 แผนผังของพันธะซิลิคอน (A) ระนาบ (100) และ (B) ระนาบ (111)

โดยทั่วไปการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอนดังแสดงในรูป 2.4 อาจจะมี 3 ส่วนในการเกิดปฏิกิริยาของการกัด ชนิดนี้ในรูปแบบของการจ่ายประจุพาหะนั้นคือ อิเล็กตรอนและโฮล ที่อยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ชนิดของสารเคมีที่มีผลต่อพื้นผิวของวัสดุ เช่น OH^- , NO_3^- และ H_2O และอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวที่ใช้งานซึ่งเหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาและการกำจัด ซึ่งแตกต่างจากอีกสองชนิดที่จ่ายประจุพาหะหรืออาจจะไม่ได้เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวแต่อาจจะเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของธรรมชาติ ความเข้มข้นของแต่ละชนิดนี้จะถูกกำหนดโดยกระบวนการที่แตกต่างกัน เช่น การแพร่กระจาย (diffusion) การโยกย้าย (migration) การดูดซับ (adsorption) และ solvation (การจับกันในลักษณะเครือข่ายของโมเลกุลตัวทำละลายกับโมเลกุลในสารละลาย) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวที่ใช้งานขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก

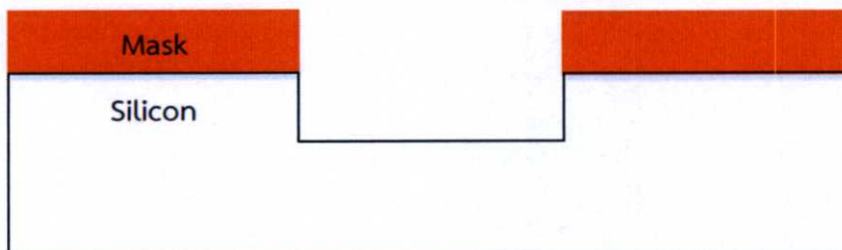
การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายที่เป็นต่างที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอนที่มีออกไซด์ การเกิดของฟิล์มออกไซด์ชั้นจะปกปิดบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งมีทิศทางที่แตกต่างกันและจะทำให้มีผลต่อการกัดแบบไอโซทรอปิก นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ถึงแม้จะทำการกัดแบบไอโซทรอปิกอาจเกิดขึ้นภายใต้การควบคุมการแพร่กระจายอย่างใดอย่างหนึ่งหรือการควบคุมการใช้งานของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถเกิดขึ้นโดยกระบวนการที่มีการควบคุมพื้นผิวอย่างน้อยสำหรับการกัดพื้นผิว การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกไม่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการกัดทั้งหมดของพื้นผิวรวมทั้งสารละลายที่มีอัตราการกัดช้าที่สุดจะขึ้นอยู่กับสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นการจ่ายประจุพาหะที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการกัด ประจุพาหะที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการกัดแบบไอโซทรอปิกในสารละลาย HF แต่ไม่ได้ เกิดขึ้นในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย KOH [16]



รูปที่ 2.4 การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอน h คือ ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ สี่เหลี่ยม คือ อะตอมซิลิคอนบนพื้นผิว และ A คือ สารละลายใช้ในการกัด

2.1.2 การกัดแบบแห้ง

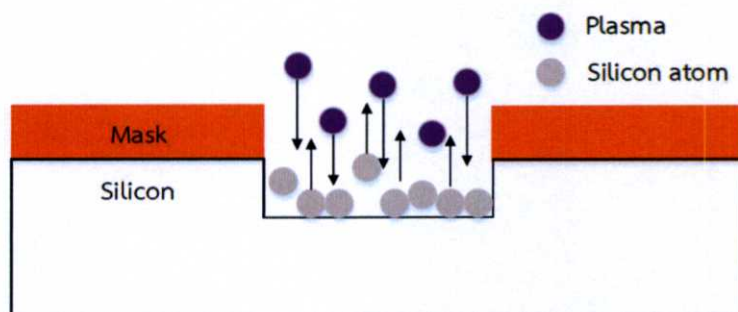
กระบวนการกัดแบบแห้ง (Dry etching) นี้ใช้พลาสมาหรือก๊าซในการกัดพื้นผิวของวัสดุ การเกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้พลังงานของอนุภาคที่เกิดการเคลื่อนที่ทางฟิสิกส์และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จะมี ลักษณะการกัดแบบแห้งดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ลักษณะการกัดแบบแห้ง

(1) การกัดแบบพลาสมา (Plasma etching)

กระบวนการนี้จะมีการกำเนิดพลาสมาที่ความดันต่ำโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับ ย่านความถี่วิทยุ 13.56 เมกะเฮิร์ตซ์ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีไอออนบวกและลบ ไอออนบวกจะกระจายตัวไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการกำจัดออก เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้นหลุดออกมาจากอะตอมบนพื้นผิวของวัสดุจะระเหยไป จะไม่มีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังนั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพดังรูปที่ 2.6 ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องจักรที่ใช้มีความสามารถกำเนิดพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง

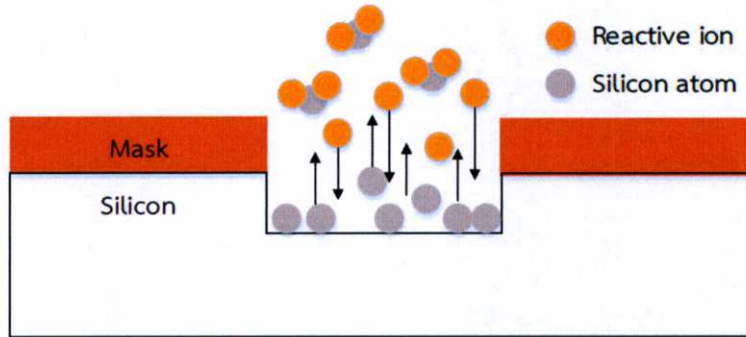


รูปที่ 2.6 การกัดด้วยพลาสมา อะตอมของซิลิคอนระเหยออกจากพื้นผิว

(2) การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง (Chemical dry etching)

การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้งนั้นจะไม่ใช้สารเคมีที่เป็นของเหลว หรือที่เรียกว่า vapor phase etching กระบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกันระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีกับการกัดด้วยก๊าซบนพื้นผิวหน้าของวัสดุ กระบวนการกัดทางเคมีนั้นมักจะเป็นลักษณะ

ของไอโซทรอปิกและเป็นการกัดที่มีเทคนิคขั้นสูง การกัดแห้งแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถกัดที่ความละเอียดมากและอัตราการกัดที่สูงกว่าการกัดแบบไอโซทรอปิก เนื่องจากการกัดแบบแห้งสามารถหลีกเลี่ยง undercutting ได้ ในรูปที่ 2.7 แสดงให้เห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกัดแบบแห้งโดยสารเคมีที่ใช้ในการกัดแบบแห้งคือ tetrafluoromethane (CF_4), sulfur hexafluoride (SF_6), nitrogen trifluoride (NF_3), chlorine gas (Cl_2), หรือ fluorine (F_2) [14]

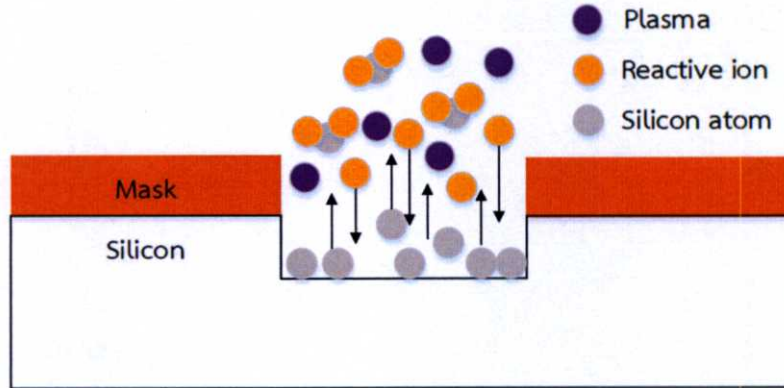


รูปที่ 2.7 การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอออนปฏิกิริยาบนพื้นผิว

(3) การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Ion Etching : RIE)

การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาจะใช้ปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีความหลากหลายและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในด้านอุตสาหกรรม กระบวนการนี้จะเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วมาก การชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากไอออนไนซ์จะช่วยให้สารละลายแตกตัวและทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุ

การไวต่อปฏิกิริยา (Active Species Generation) เมื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัว ในระบบนั้นอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าเร่งจนมีพลังงานขนาดเพียงพอแก่การเกิดไอออนไนซ์ การชนกับโมเลกุลของก๊าซจะทำให้เกิดพลาสมาที่เรืองแสง ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งส่วนที่เป็นประจุบวกและประจุลบ อิเล็กตรอนและส่วนที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีสภาพคล่องสูงกว่าประจุบวก ดังนั้นจึงแพร่ออกสู่ผิวหน้าของวัตถุได้เร็วกว่า ผิวหน้าของวัตถุมักจะกลายเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา การแยกสภาพขั้วออกจากกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างหมู่พลาสมาและฐานรอง โดยออกจากพลาสมาไปสู่ผิวหน้าของวัตถุ ไอออนที่เกิดขึ้นมีประจุหลุดออกจากผิวหน้าของวัตถุ แต่ส่วนของพลาสมาที่มีสภาพเป็นกลางจะไม่เคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.8 ก๊าซส่วนหนึ่งที่ถูกไอออนไนซ์แล้วนั้นจะเป็นส่วนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเรียกว่าส่วนไวต่อปฏิกิริยา (reactive species) เช่น ไอออนของฟลูออไรด์ (SF_6) และ ไอออนของคลอรีน (CF_4) [13]



รูปที่ 2.8 การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา

อย่างไรก็ตามในวิธานิพนธ์เล่มนี้จะไม่ใช้การกัดแบบแห้ง เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMMSM แต่จะใช้การกัดแบบเปียกแทนเนื่องจากการกัดแบบแห้งนั้นมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนต่อการใช้งาน

2.2 สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นผลึกซิลิคอน

การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกนั้นจะมีอัตราการกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับระนาบของผลึกซิลิคอนและสารละลายที่ใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมักจะเป็นสารละลายที่มีหมู่ OH เป็นส่วนประกอบแต่สารละลายที่ใช้กันส่วนมาก คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีนไพโรคาทิกอล (EDP) และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH)

2.2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย KOH

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารละลายไม่เป็นพิษ มีราคาที่ถูกและนิยมใช้กันแพร่หลาย การกัดซิลิคอนจะใช้ความเป็นด่างของไฮดรอกไซด์ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่สูงและการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกระดับสูง ส่วนพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะเป็นลักษณะขรุขระ แต่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะกัดโลหะอะลูมิเนียมอย่างรวดเร็วและไม่นิยมนำไปใช้ในการกัดงานจำพวก MOS หรือ CMOS เนื่องจากพบไอออนของด่างบางส่วนของที่หลงเหลืออยู่บนผิวหน้าของโลหะ

2.2.2 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย EDP

สารละลายเอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกอล (EDP) สูตรทางเคมี $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$ เป็นสารละลายไดอะมีนที่เป็นพื้นฐานสำหรับกัดซิลิคอน ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระนาบ (100) ที่อุณหภูมิ 118°C ประมาณ 300 \AA/s มีอัตราส่วนในอัตราการกัด Si/SiO_2 ที่สูงและระดับการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถใช้กับงาน MOS หรือ CMOS ได้ นอกจากนี้อัตราการกัดซิลิคอนกับวัสดุอื่นๆ เช่น คาร์ไบด์, ไนไตรด์, ออกไซด์และโลหะมากที่สุด แต่สารละลายเอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกอลระเหยได้อย่างรวดเร็ว ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือในการกัดที่ซับซ้อนยุ่งยากและต้องระมัดระวังในขณะที่ทำการกัดเพราะสารละลายจะระเหยเป็นก๊าซพิษออกมา

2.2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH

สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) สูตรทางเคมี $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ เป็นสารละลายที่มี quaternary ammonium hydroxide มากที่สุดและเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน มีอัตราการกัดออกไซด์ที่ต่ำมากและจะไม่กัดอะลูมิเนียมถ้ามีซิลิเกตจำนวนมากพอ สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้จะมีราคาที่สูงเพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับงานจำพวก MOS หรือ CMOS ได้ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง สารละลาย TMAH ที่ทำการกัดซิลิคอนนั้นพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระ แต่เมื่อเจือสารละลาย TMAH ด้วยปริมาณที่เหมาะสมของกรด silicic และ AP (ammonium peroxodisulphate, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$), ผสมให้ลดการกัดอะลูมิเนียมที่สมบูรณ์พร้อมกับพื้นผิวที่เรียบ [17]

ตารางที่ 2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระนาบ	อัตราการกัด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	หมายเหตุ
22% TMAH	90	(100)	0.9	(110) เป็นระนาบที่เร็วที่สุดโดยไม่ต้องลดแรงตึงผิว
		(110)	1.8	
		(111)	0.018	
10% TMAH: 90% H ₂ O	60	(100)	0.28	
	70		0.41	
	80		0.72	
	90		1.2	
	80	(111)	0.014	
5% TMAH: 95% H ₂ O	70	(100)	0.48	
	80		0.87	
	90		1.4	
	70	(110)	0.74	
	80		1.4	
	90		1.8	
	90		(111)	
22% TMAH + 0.5% surfactant	90	(100)	0.6	(100) ได้เร็วที่สุดด้วยสารลดแรงตึงผิว
		(110)	0.12	
		(111)	0.01	
22% TMAH + 1% surfactant	90	(100)	0.6	ลดแรงตึงผิว
		(110)	0.1	
		(111)	0.009	

ในตารางที่ 2.1 แสดงอัตราการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH อัตราการกัดซิลิคอนในระนาบ (100) และ (110) จะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายที่สูงขึ้น สารละลายจะเลือกกัดระนาบอื่นๆมากกว่าระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับตอนที่เติมสารลดแรงตึงผิวแล้วอัตราการกัดจะลดลงเป็นเท่าตัว [18]

เมื่อเปรียบเทียบลักษณะการกัดของสารละลาย EDP, KOH และ TMAH ในตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบอัตราการกัดของสารละลาย การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกจะมีอัตราการกัดที่มากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น ซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์และโลหะอะลูมิเนียม การหยุดการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยการเจือสารโบรอนมากในซิลิคอน (P^{++} etch stop) หรือการเอนเอียงของรอยสัมผัส P-N (electrochemical etch stop) ปริมาณของโบรอนจะมีผลต่ออัตราการกัดของซิลิคอน ซึ่งทำให้อัตราการกัดนั้นลดลง

ตารางที่ 2.2 เปรียบเทียบอัตราการกัดของสารละลาย

	EDP	KOH	TMAH
Si etch rate ($\mu\text{m}/\text{min}$)	0.75-1.25	1-2	≈ 1
SiO_2 etch rate (nm/min)	1-80	1-10	0.05-0.25
Si_3N_4 etch rate (nm/min)	0.1	very low	0.05-0.25
(100)/(111) etch ratio	35	400	10-35
Si roughness	low	very low	moderate
Al selectivity	no ⁽¹⁾	no	yes ⁽²⁾
Au selectivity	yes	yes	yes
P^{++} etch stop [cm^{-3}]	$B > 7 \times 10^{19}$ ER/50 ⁽³⁾	$B > 10^{20}$ ER/20	$B > 2 \times 10^{20}$ ER/40
Alkali ions	no	yes	no
Cost	high	low	moderate
Disposal	easy	difficult	moderate
Safety	low	moderate	high
(1) One specific formulation does not attack Al			
(2) If specific amounts of silicon are dissolved in the etching solution			
(3) Silicon etch rate divided by 50 if Boron doses higher than $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$			

การกัดของสารละลายแต่ละชนิดนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การกัดด้วยสารละลาย KOH นั้นเป็นที่รู้กันดีว่าจะเลือกกัดที่ระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับในการผลิตจะกำหนดและควบคุมการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ แต่สารละลาย KOH ไม่สามารถนำมาใช้ในงาน

จำพวก MOS หรือ CMOS เนื่องจากมีสารตกค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุซึ่งเป็นไอออนของโพแทสเซียม (K^+) ซึ่งสามารถนำไปใช้งานกับทรานซิสเตอร์ MOS และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและ การกักร้อนอะลูมิเนียม สารละลาย EDP จะมีความน่าสนใจเนื่องจากในขณะที่ทำการกักร้อนนั้นจะไม่มี โซเดียมหรือโพแทสเซียมไอออนตกค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุและไม่เลือกกัดอะลูมิเนียม (ยกเว้นใน สูตรเฉพาะอย่างใดอย่างหนึ่ง) แต่มีข้อเสียอย่างอื่นของสารละลาย EDP จะเป็นพิษและอันตรายมาก และมีความยุ่งยากในการจัดการ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการใช้ในงานจำพวก MOS หรือ CMOS ใน โรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ที่สะดวกต่อการจัดการกับสารพิษ สารละลาย TMAH นี้ จึงเหมาะสม สำหรับทำงานวิจัยและเป็นสารละลายที่รู้จักกันดีเพราะสารละลาย TMAH จะถูกนำไปใช้ใน กระบวนการสร้าง IC เป็นการพัฒนาของ positive photoresist อัตราการกัดซิลิคอนนั้นอยู่ในระดับ ปานกลาง สารละลาย TMAH เหมาะสำหรับการใช้ในงานจำพวก MOS หรือ CMOS เพราะไม่มีพวก ไอออนของต่างตกค้างบนพื้นผิวของวัสดุ ถ้าเจือสารละลายอื่นเพื่อทำการลดอัตราการกัดอะลูมิเนียม จะช่วยให้อะลูมิเนียมยังคงอยู่หรือสร้างชั้นป้องกันการกัดในส่วนที่ต้องการไว้ สารละลาย TMAH จะมี อัตราการกัดระนาบ (111), SiO_2 และ Si_3N_4 ต่ำมากสามารถใช้ SiO_2 และ Si_3N_4 เพื่อป้องกันการกัด ได้ ลักษณะพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะขรุขระน้อยกว่าการกัดแบบอื่นๆทั่วไป [15]

2.3 สารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิว (surfactant) [21] คือ สารที่มีโมเลกุลหรือไอออนซึ่งประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนหัวหรือส่วนที่ชอบน้ำ (hydrophilic) และส่วนหางหรือส่วนที่ไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ซึ่ง ทั้ง 2 ส่วนนี้ต้องสมดุลกันทำให้ถูกดูดซับที่พื้นผิวหรือระหว่างพื้นผิวของของเหลว ทำให้ความเข้มข้นที่ พื้นผิวสูงกว่าความเข้มข้นภายในเนื้อของของเหลวและแรงตึงผิวลดลง

ประเภทของสารลดแรงตึงผิว

สารลดแรงตึงผิวทุกชนิดมีโครงสร้างคล้ายๆ กัน คือ ส่วนหาง (ไม่ชอบน้ำ) และส่วนหัว (ชอบ น้ำ) อย่างไรก็ตาม สารลดแรงตึงผิวทุกตัวมีคุณสมบัติที่ไม่เหมือนกัน แต่ละชนิดกลับมีความแตกต่าง กัน ซึ่งเป็นผลมาจากความแตกต่างของส่วนหัวที่ชอบน้ำ (hydrophilic head) เมื่อสารลดแรงตึงผิว แยกตัวเป็นไอออน (สารที่มีประจุไฟฟ้า)

1. สารลดแรงตึงผิวประจุลบ (Anionic Surfactant)

สารนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะแตกตัวและส่วนหัวจะมีประจุเป็นลบ สารจำพวกนี้ นำมาใช้ในการทำผลิตภัณฑ์ทำความสะอาดต่างๆ เช่น น้ำยาล้างจาน ผงซักฟอก ตลอดจน ผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง เช่น แชมพู ครีมอาบน้ำ ทั้งนี้เพราะมีคุณสมบัติ ในการทำความสะอาดดี มีฟองมาก และละลายน้ำได้ดี

- ตัวอย่างเช่น
- Sodium / Ammonium Lauryl Ether Sulphate
 - Sodium / Ammonium Lauryl Sulphate
 - Linear Alkyl Benzene Sulphonate (LAS)
 - Alpha Olefin Sulfonate (AOS)
 - Sarcosinate
 - Sulphosuccinate

2. สารลดแรงตึงผิวประจุบวก (Cationic Surfactant)

สารในกลุ่มนี้เมื่อละลายน้ำแล้วส่วนหัวจะเป็นประจุบวกนิยมใช้กันมากในอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้เคลือบผ้าเพื่อให้ความลื่นและป้องกันไฟฟ้าสถิตสารจำพวกนี้ไม่มีความสามารถในการทำความสะอาดและไม่มีฟองแต่สามารถเกาะเส้นผมและพื้นผิวได้ดีให้ความลื่นจึงนิยมนำมาใช้ในครีมนวดผมหรือปรับผ้านุ่ม

- ตัวอย่างเช่น
- Dyhyquat AC
 - Rinse compound
 - Cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB)
 - Polyquaternium-6,-7,-10,-16
 - Alkyltrimethyl ammoniumchloride

3. สารลดแรงตึงผิวไม่มีประจุ (Nonionic Surfactant)

สารชนิดนี้เมื่อละลายน้ำแล้วจะไม่แตกตัวจึงไม่มีประจุ คุณสมบัติของสารกลุ่มนี้จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ละลายน้ำได้จนไม่ละลายน้ำสารที่ไม่ละลายน้ำมักใช้เป็นตัวดับฟองและ emulsifier ส่วนสารที่ละลายน้ำมักใช้เป็นสารทำความสะอาดแต่เนื่องจากมีฟองน้อยจึงมักใช้คู่กับ Linear Alkyl Benzene Sulphonate (LAS) หรือ Anionic Surfactant อื่นๆ

- ตัวอย่างเช่น
- Amine oxides
 - Alkyl ethoxylate
 - Alkyl polyglucoside
 - Alkyl diethanol, monoethanol, isopropanol amides
 - Alcohol alkylphenol ethoxylate
 - Cetyl stearyl alcohol

4. สารลดแรงตึงผิวชนิดสองประจุ (Amphoteric Surfactant)

สารกลุ่มนี้มีทั้งประจุบวกและประจุลบอยู่ในโมเลกุลเดียวกันเมื่อละลายน้ำจะแสดงประจุใดประจุหนึ่งขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมโดยถ้าสภาพแวดล้อมเป็นกรดก็จะแสดงประจุบวกถ้าสภาพแวดล้อมเป็นด่างก็จะแสดงประจุลบ

คุณสมบัติหลักของสารกลุ่มนี้ คือ

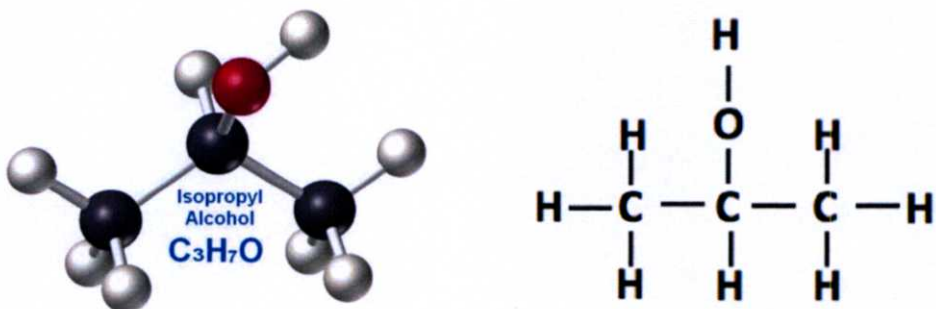
- สามารถทนน้ำกระด้าง
- อ่อนละมุนต่อผิว
- สามารถเข้ากับ SLES , SLS ได้ดี เมื่อใช้ร่วมกันจะทำให้สามารถทำให้ชั้นได้ง่ายขึ้น
- ป้องกันไฟฟ้าสถิต และให้ความนุ่ม

การนำสารลดแรงตึงผิวไปใช้

1. อุตสาหกรรมสิ่งทอ ใช้ในขั้นตอนปั่นและทอเส้นใย
2. อุตสาหกรรมซักล้าง ใช้ผลิตสารซักฟอก น้ำยาปรับผ้านุ่ม น้ำยาทำความสะอาด น้ำยาฆ่าเชื้อโรค ที่ใช้ในครัวเรือนหรือในอุตสาหกรรม
3. อุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้ผลิตผลิตภัณฑ์ทำความสะอาด เช่น แชมพู ครีมอาบน้ำ , ใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวในการผลิตครีม โลชั่น โรลออน น้ำหอม ครีมแต่งผม ยาสีฟัน ช่วยกระจายสีในลิปสติกและแมกอัพ
4. อุตสาหกรรมยา ใช้ลดแรงตึงผิวในการผลิตยาแคปซูล, ออยล์มิน, ครีมทา และโลชั่น
5. อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ลดแรงตึงผิวในการผลิตเนยเทียม, ไอศกรีมและช่วยให้ขนมปังมีความกรอบอร่อยขึ้น
6. อุตสาหกรรมทำสีหรือน้ำยาเคลือบเงา ช่วยให้ส่วนผสมเป็นเนื้อเดียวกัน
7. อุตสาหกรรมพลาสติก ทำพีวีซี, ฉนวนกันเสียง, ฉนวนกันความร้อน
8. ในอุตสาหกรรมทำกระดาษ ทำให้เยื่อกระดาษอ่อนตัวและซับน้ำได้ดี และใช้ในขบวนการรีไซเคิลกระดาษเก่าโดยช่วยชะล้างน้ำหมึกเก่าออก
9. อุตสาหกรรมโลหะ ช่วยหล่อในขั้นตอนการม้วน การตัด การตัดโลหะ และป้องกันการเกิดสนิม
10. วงการก่อสร้าง ใช้ลดแรงตึงผิวในการผสมปูนเพื่อให้ปูนเข้ากับน้ำ, ช่วยให้วัสดุปูนเกาะพื้นผิวอย่างดี
11. วงการเกษตร ใช้ผสมในยาฆ่าแมลง เพื่อให้จับเกาะใบพืชได้ดี
12. วงการดับเพลิง ทำให้เกิดฟองในถังดับเพลิงและทำให้ยับยั้งไฟได้

2.3.1 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

ไอโซโพรพานอล (Isopropanol) หรือ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol: IPA) หรือ 2-โพรพานอล (2-Propanol) หรือ โพรพาน-2-อล (Propan-2-ol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง และเป็นสารลดแรงตึงผิวไม่ประจุ (Nonionic Surfactant) ซึ่งส่วนใหญ่นิยมใช้เป็นสารฆ่าเชื้อในทางการแพทย์ มักใช้ผสมกับอะซีโตนหรือน้ำกลั่นโดยให้แอลกอฮอล์มีปริมาณ 70% โดยปริมาตร เป็นของเหลวใสไม่มีสี กลิ่นรุนแรง และเป็นไอโซเมอร์โครงสร้างกับ 1-โพรพานอล จะต่างกันตรงที่มีหมู่ไฮดรอกซิล ต่อที่คาร์บอนตัวที่สองแทนที่จะเป็นปลาย



รูปที่ 2.9 โครงสร้างโมเลกุลของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [30-31]

ตารางที่ 2.3 สมบัติทางเคมีและกายภาพ [24]

สมบัติ	ค่า	ณ อุณหภูมิ
จุดเดือด	81 - 83 °C	
จุดหลอมเหลว	-89.5 °C	
จุดวาบไฟ	12 °C	
อุณหภูมิลุกติดไฟด้วยตนเอง	399 °C	
ความดันไอ	33 mmHg	20 °C
ความหนืด	2.27 Pas	20 °C
ความหนาแน่นของไอ	2.1 g/l	
สัดส่วนของน้ำ	0.003 %	
แรงตึงผิว	20,800 mN/m	25 °C
การละลาย	การละลายน้ำ: สมบูรณ์	

ไอโซโพรพานอลผสมเข้ากับน้ำอีเทอร์และคลอโรฟอร์มได้ดี โดยเมื่อผสมกับน้ำแล้วจะเกิดเป็นสารกั้นแยกไม่ได้ (azeotrope) สารนี้รับประทานไม่ได้และมีจุดเยือกแข็งต่ำลง (คือ ช่วงอุณหภูมิที่เป็นของเหลวกว้างขึ้น) นอกจากนี้ยังเป็นตัวทำละลายเอทิลเซลลูโลส โพลีไวนิลบิวทิล น้ำมัน อัลคาลอยด์ และยางไม้ได้ แต่ไม่ละลายในสารละลายเกลือ จึงทำให้สามารถแยกออกจากสารละลายได้โดยเติมเกลือแกงโซเดียมซัลเฟตหรือเกลืออนินทรีย์อย่างอื่นเพื่อให้แอลกอฮอล์แยกชั้นออกมา [22]

ไอโซโพรพานอลผลิตได้โดยอาศัยปฏิกิริยาเติมน้ำเข้ากับโพรพีนจากกฎของมาร์คอฟนิกอฟซึ่งกล่าวว่า ไฮโดรเจนมีแนวโน้มจะผนวกเข้ากับคาร์บอนที่มีไฮโดรเจนมากกว่าเสมอ จึงทำให้เกิดไอโซโพรพานอล มากกว่าที่จะเป็น 1-โพรพานอล หรืออาจจะใช้ปฏิกิริยาของโพรพีนกับกรดซัลฟิวริก ให้เกิดซัลเฟตเอสเทอร์ ที่เมื่อสลายด้วยน้ำแล้วจะได้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ในกระบวนการอย่างหลังจะมีไดไอโซโพรพิลอีเทอร์เป็นผลพลอยได้ ซึ่งสามารถนำกลับเข้าสู่กระบวนการอีกครั้ง นอกจากนี้ ไอโซโพรพานอลยังผลิตได้โดยเติมไฮโดรเจนลงในอะซีโตนก็ได้ [23] ไอโซโพรพานอลถูกนำไปใช้งานมากมาย อาทิ ใช้เป็นตัวลดแรงตึงผิวและตัวทำละลายประสิทธิภาพสูงและมีพิษน้อยกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น ใช้ทำความสะอาดคราบน้ำมัน อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ และใช้ผสมน้ำ 60 - 75% เพื่อฆ่าเชื้อโรค

2.4 การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก

2.4.1 ปฏิกริยาการกัดซิลิคอน

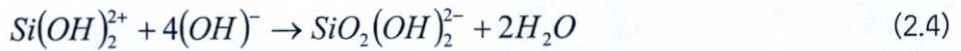
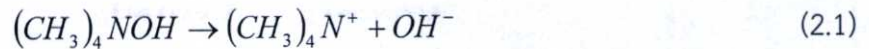
การกัดซิลิคอนด้วยวิธีที่ประสบความสำเร็จที่สุด คือ การกัดซิลิคอนด้วยสารเคมีหรือกัดด้วยพลาสมา สารเคมีที่กัดกร่อนซิลิคอนได้นั้นมีมากมาย แต่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยต่างผสมกับน้ำ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine), ไฮดราซีน (Hydrazine), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ส่วนก๊าซที่ใช้กัดในพลาสมา ได้แก่ CF_4 , SF_6 , Cl_2 และก๊าซฮาโล-หรือฟลูออโรคาร์บอนอื่นๆ เป็นต้น สารละลายการกัดดังกล่าวเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกหรือแอนไอโซทรอปิก อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลาย สารละลายการกัดเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกสารละลายการกัดที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นด้วย

การกัดซิลิคอนนั้นมีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอน

- (1) การฉีกไฮลจากสารละลายเข้าสู่ซิลิคอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ของซิลิคอนเป็น Si^+
 - (2) การรวมตัวของอะตอม OH^- และซิลิคอนประจุบวก เป็นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำได้
 - (3) การรวมตัวของซิลิคอนและองค์ประกอบในสารละลายกลายเป็น complexing agent
 - (4) การดึงซิลิคอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิคอนถูกกัดออกไป
- จากขั้นตอนทั้งสี่ สารเคมีที่จะกัดซิลิคอนได้ต้องแตกตัวให้ไฮลกับซิลิคอนและตัวมันเองต้องมีอะตอมไฮดรอกซิลเกิดขึ้นรวมทั้ง complexing agent นั้นต้องสามารถละลายน้ำได้

สำหรับปรากฏการณ์การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) นั้น มีกลไกกระบวนการกัดดังนี้

- (1) สารละลาย TMAH จะลดรูปเป็นไอออนไฮดรอกซิล [18]
- (2) อะตอมไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิคอน สำหรับแขนของซิลิคอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่ซิลิคอนระนาบ (111) มีเพียงแขนเดียว ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนไนเซชันเพียง 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก
- (3) พันธะซิลิคอนหลัก (back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $Si(OH)^+$ หรือ $SiOH^3^-$ (เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์) ปฏิกริยานี้ทำให้พลังงานแก่ผลึกต่างกัน อัตราส่วนการกัดของระนาบต่างๆ จะไม่เท่ากัน ที่อุณหภูมิใกล้เคียงเต็ดอัตราการกัดระนาบ (110) : (100) : (111) เท่ากับ 160:100:1 แต่ที่อุณหภูมิห้องจะกัด 50:30:1
- (4) ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่ออกสู่ออกสารละลาย
- (5) กรด Orthosilic acid แตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการเคมีนี้

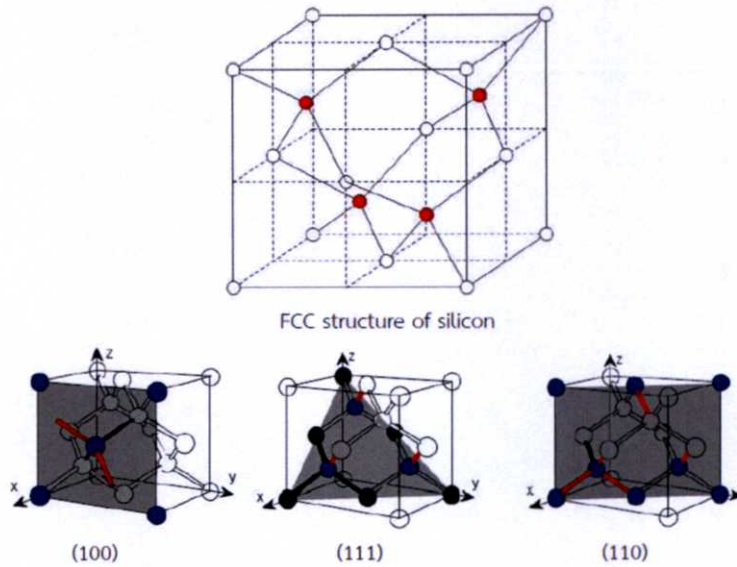


2.4.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน

ในระนาบต่างๆ ของซิลิคอน จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า (เหลือเป็นแขนยื่น) จำนวนพันธะที่กำลังถูกกัด และจำนวนพันธะที่ถูกดึงออกสู่สารละลายเป็นขั้นตอนต่อไปไม่เท่ากัน กล่าวคือ ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ ระนาบ (111) จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าและมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้านี้อาจเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด ระนาบ (110) จะมีสามอะตอมอยู่ที่ผิวหน้า หนึ่งอะตอมอยู่ใต้ผิวหน้าและหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า แม้ว่าจะมีสองอะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมตรงกลางที่อยู่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่อยู่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดออกไปพร้อมกัน

สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำปอลดประจุ มีชื่อย่อว่า (TMAH) เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก อัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนในระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับ ดังนี้ (110) > (100) > (111) [13]

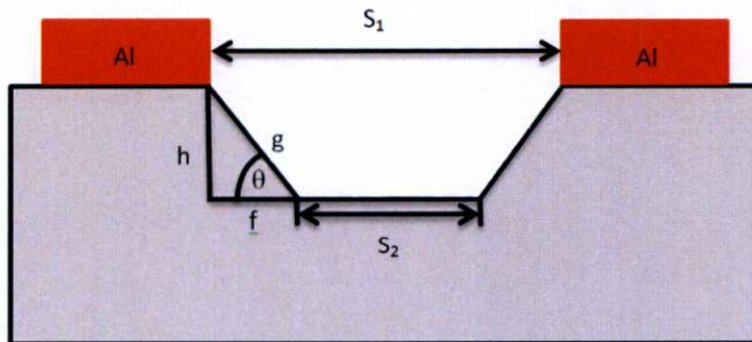
เนื่องจากสารละลาย TMAH เป็นสารละลายที่ทำการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โครงสร้างของสารละลาย TMAH ต้องเพิ่มอุณหภูมิช่วยในการกัดระนาบของซิลิคอน เพื่อให้สารละลาย TMAH ทำการกัดได้เร็วขึ้น ควรรู้ว่าโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือ โครงสร้างอะตอมประกอบเท่ากับ 5.43 Å เป็น โครงสร้างแบบ Face Centered Cubic (FCC) หรือเรียกว่า โครงผลึกแบบ Diamond แต่มีอะตอม สองอะตอมในหน่วยเซลล์ ในรูปที่ 2.10 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนและระนาบต่างๆ ของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.10 ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic) พันธะในอะตอมซิลิคอน ระนาบ (100), ระนาบ (111) และระนาบ (110)

2.4.3 ความสัมพันธ์เชิงเลขาคณิตของตัวตรวจวัดแสงร่องรูปตัวยู

ร่องรูปตัวยูที่เกิดขึ้นจากการกัดเมื่อเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ไม่เหมือนกัน จะมีความแตกต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการกัดช้าที่สุด สำหรับแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) ถ้าเปิดช่องเลือกกัดเป็นวงกลม ร่องรูปตัวยูที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังสองด้านเอียงทำมุม 54.74 องศา ขนานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง (110) ระนาบนั้นคือ ระนาบ (111) และยังมีระนาบ (100) ร่วมกันประกอบเป็นผนัง แต่ถ้าเปิดบริเวณเลือกกัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉาก ที่มีด้านทั้งสี่ขนานกับทิศทาง (110) จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (111) ทั้งหมด พื้นที่หลุมจะเป็น ระนาบ (100) โดยความสัมพันธ์ของเลขาคณิตที่แน่นอนของระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังรูปที่ 2.11 การกัดของระนาบ (100) [15]



รูปที่ 2.11 ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีขนาดของมุม 54.7°

$$S_2 = S_1 - 2h \times \cot \theta \quad (2.6)$$

$$h = Rt \quad (2.7)$$

เมื่อ S_1 คือ ขนาดของความกว้างของปากหลุม
 S_2 คือ ขนาดของความกว้างในหลุม
 h คือ ขนาดความลึกของหลุม
 R คือ อัตราการกัดในแนวตั้งของซิลิคอน
 t คือ เวลา

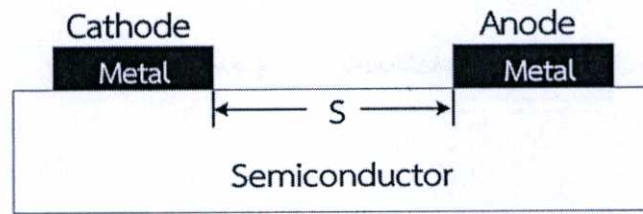
2.5 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มของซีอิตต์กีย์ไดโอด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เป็นรอยสัมผัสซีอิตต์กีย์ 2 รอยสัมผัส มีคุณสมบัติเด่นคือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี กระแสรั่วต่ำ มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาแนร์ ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและไม่ซับซ้อนจนเกินไปและที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้าง หลักการทำงานและความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวกับโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ดังมีรายละเอียดดังนี้

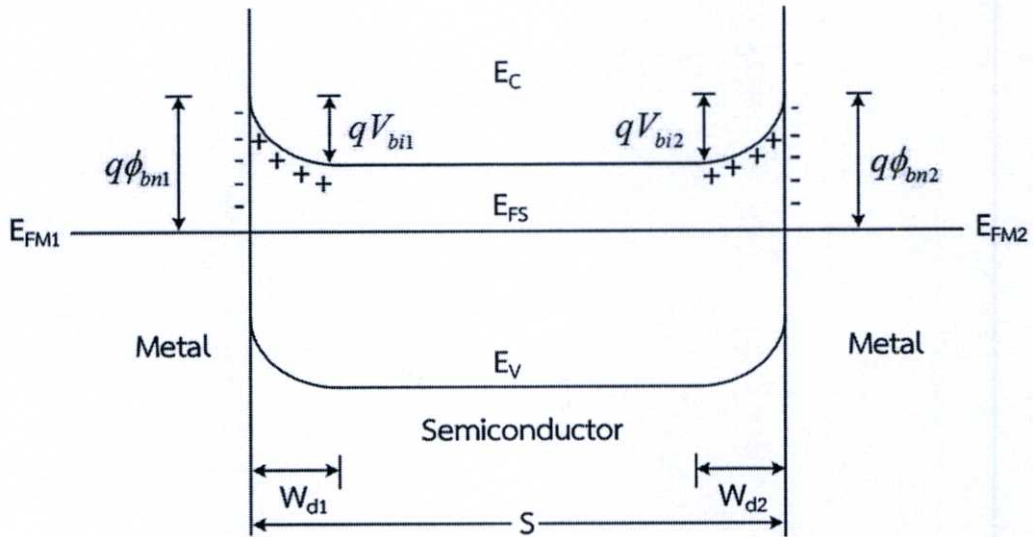
2.5.1 ตัวตรวจวัดแสงในสถานะสมดุล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำจำนวน 2 รอยสัมผัส มีระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสทั้งสอง (S) ซึ่งโดยทั่วไปจะออกแบบให้ระยะห่างรอยสัมผัสมีขนาดแคบๆ เพื่อให้โฟโตไดโอดทำงานด้วยความเร็วสูง โดยสารกึ่งตัวนำที่อยู่ระหว่างรอยสัมผัสทั้งสองจะทำหน้าที่เป็นส่วนรับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในสถานะสมดุลความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.12 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสซีอิตต์กีย์ โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวา กำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) ซึ่งโดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดมักจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ซีอิตต์กีย์ของขั้วแคโทด (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



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.12 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุลความร้อน

(ก) ภาพภาคตัดขวางของโครงสร้าง MSM

(ข) แถบพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อน

2.5.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.13 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดมีลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดมีลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นดังสมการที่ 2.8

$$W_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s (V_{bi} + V_1)}{q N_D}} \quad (2.8)$$

ส่วนที่รอยสัมผัสด้านแอโนด กำแพงศักย์ภายในมีค่าลดลงเป็น $V_{bi} - V_2$ และบริเวณหลอดพาหะด้านแอโนด (W_A) มีขนาดแคบลง ดังสมการที่ 2.9

$$W_A = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V_2)}{qN_D}} \quad (2.9)$$

โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

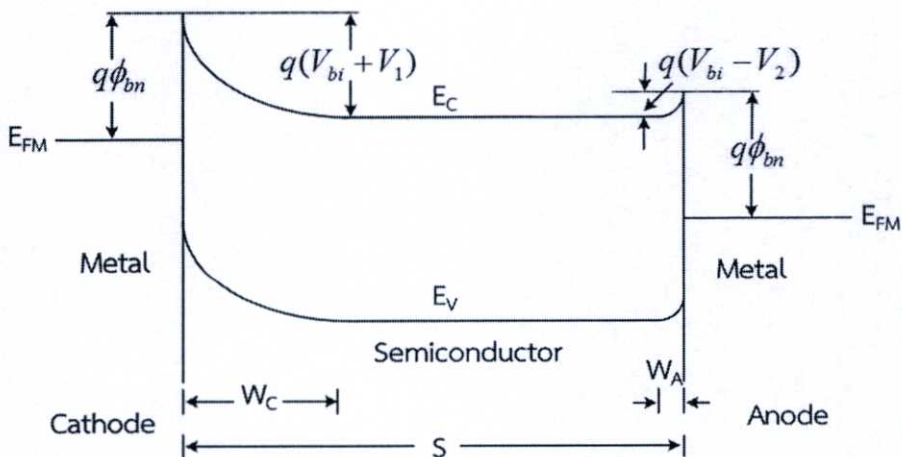
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ

เนื่องจากการไบอัสย้อนกลับและมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากทางด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคตติกียไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้า ซึ่งมีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วของรอยสัมผัสช็อคตติกีย ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้น เนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคตติกีย จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัส ด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก

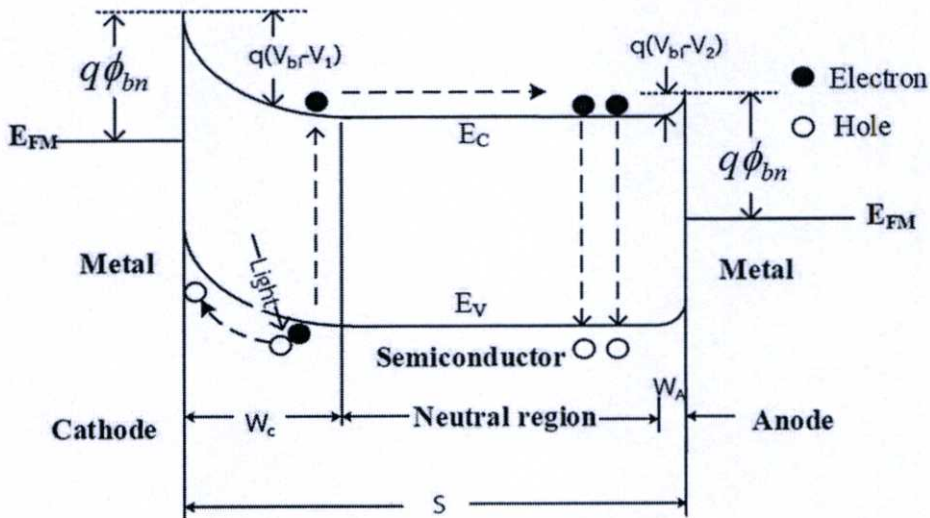
ซึ่งความกว้างบริเวณหลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคตติกีย กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้มีความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณหลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณหลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

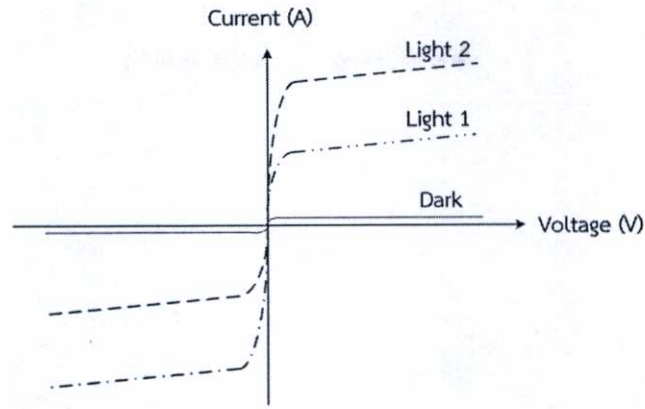
2.5.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบบ

เมื่อโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน ได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง จะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้ การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของตัวตรวจวัด เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบบ

เมื่อแสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณ นิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ จะเกิด การกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะ จะถูกสนามไฟฟ้าที่ มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้ว แคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะ เคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณ นิวทรัล ในบริเวณ นิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เช่นเดียวกับในบริเวณ ปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อ แสงตกกระทบบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมาก ขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการ เคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นสูงไปยังความหนาแน่นต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮล ส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วน ในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอน ในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากใน ชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลใน ที่ที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมี ขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [19,20]



รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

2.5.4 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโครงสร้าง MSM

ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.16 โดยความจุไฟฟ้ารวม (C_T) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสองประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านแคโทด (C_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับและความจุไฟฟ้าทางด้านแอโนด (C_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.10, 2.11 และ 2.12

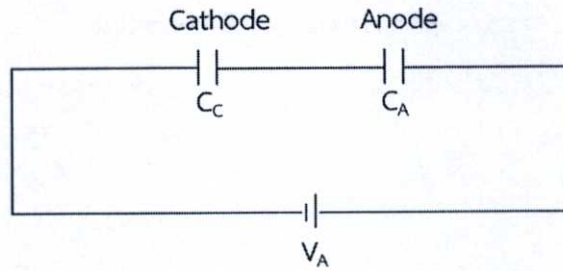
$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \quad (2.10)$$

โดยที่

$$C_C = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.11)$$

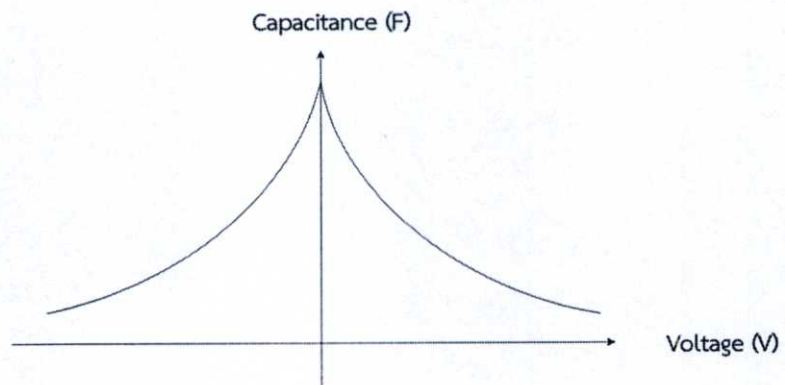
$$C_A = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.12)$$

โดย	ϵ_s	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ
	N_D	คือ	อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si
	V_{bi}	คือ	กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ
	V_A	คือ	แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัสด้านแคโทด



รูปที่ 2.16 ความจุไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

จากรูปที่ 2.17 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส โดยความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นและมีความสมมาตรกันเมื่อได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 2.17 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของ MSM

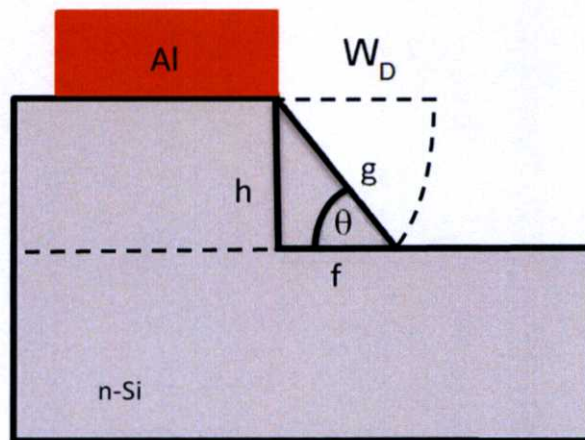
บทที่ 3

กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะเป็นการกล่าวถึงกระบวนการสร้างและการทดลองของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบร่องรูปตัวยู หรือ U-MSM โดยสารละลายที่ใช้ในการกัดตัวตรวจวัดแสงคือ สารละลาย TMAH และสารลดแรงตึงผิว เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM

3.1 การออกแบบและสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง

อย่างแรกในการออกแบบลวดลายของตัวตรวจวัดแสงนั้นคือเงื่อนไขที่ใช้ทำการศึกษาและทำการคำนวณหาค่าความลึกที่เหมาะสมในการกัด โดยอ้างอิงจากการคำนวณความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งบริเวณปลอดพาหะจะเป็นตัวกำหนดความลึกของตัวตรวจวัดแสง U-MSM งานวิจัยนี้ใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω -cm ใช้โลหะอะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้า ดังรูปที่ 3.1 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM จะเห็นว่า W_D คือ ส่วนที่บริเวณปลอดพาหะสามารถขยายไปถึงได้ ด้าน f คือ ด้านที่เปรียบเสมือนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ ด้าน g คือ ส่วนที่ใช้เป็นพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM และ h คือ ความลึกของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะแสดงใน ตารางที่ 3.1 พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซึ่งมีระนาบการกัดที่แน่นอน ทำให้ทราบถึงมุมในการกัดอยู่ที่ 54.7 องศา จะเห็นว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM นั้นมีพื้นที่รับแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ 1.73 เท่า ไม่ว่าจะมีความลึกเท่าใดก็ตาม ในส่วนของบริเวณปลอดพาหะนั้นเราได้คำนวณค่าสภาพต้านทานไฟฟ้าอยู่ 2 ค่า ซึ่งเป็นค่าสูงสุดและต่ำสุดของแผ่นที่นำมาใช้ เมื่อพิจารณาสภาพต้านทานไฟฟ้าที่ค่าสูงสุดที่แรงดันไบอัส 10 V บริเวณปลอดพาหะจะขยายไป 5.48 μm ทำให้รู้ว่าถ้ากัดแผ่นซิลิคอนลึกกว่านี้ก็ไม่มีผลต่อกระแสแสงแล้ว กัดไปก็ทำให้เสียเวลาในส่วนของกระบวนการสร้าง



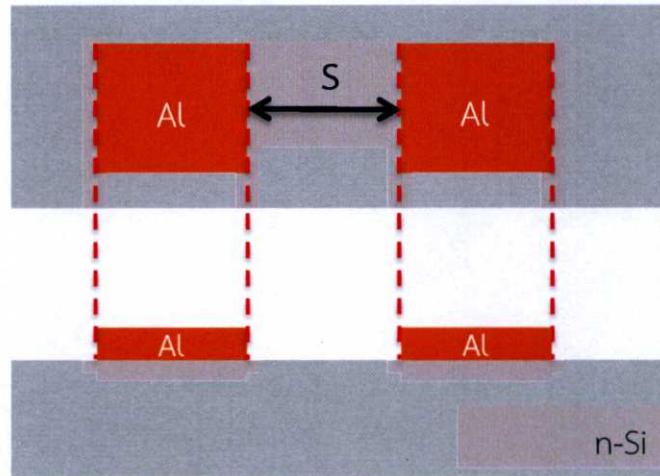
รูปที่ 3.1 ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง U-MSM

ตารางที่ 3.1 พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงและความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

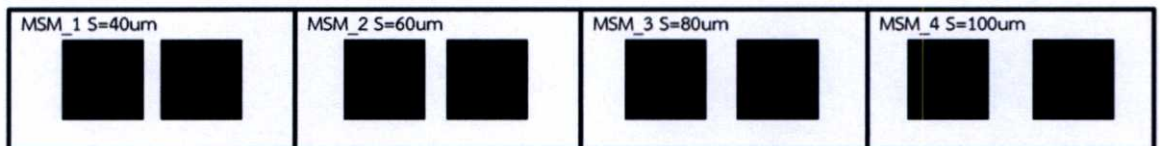
มุม 54.7 องศา				ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ		
ความลึก (μm)	g (μm)	f (μm)	g/f (เท่า)	Voltage	5 Ω -cm (μm)	10 Ω -cm (μm)
1	1.22	0.70	1.73	0	0.79	1.11
2	2.45	1.41		1	1.43	2.03
3	3.67	2.12		2	1.86	2.64
4	4.90	2.83		3	2.21	3.14
5	6.12	3.54		4	2.51	3.57
6	7.35	4.24		5	2.78	3.96
7	8.57	4.95		6	3.03	4.31
8	9.80	5.66		7	3.25	4.63
9	11.02	6.37		8	3.46	4.93
10	12.25	7.08		9	3.66	5.21
				10	3.85	5.48

แล้วจึงเริ่มทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบที่ใช้สร้างตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของการกระบวนการสร้างทั้งหมด การออกแบบลวดลายนั้นจะต้องคำนึงถึงเงื่อนไข และข้อจำกัดต่างๆที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive photoresist) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X5 Graphic จากนั้นนำข้อมูลที่ทำการสร้างเสร็จแล้วยิงลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสงด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ (Printer Laser) และนำแผ่นฟิล์มที่ได้นั้นมาติดกับกระจกใส เพื่อใช้เป็นกระจกต้นแบบในกระบวนการสร้างต่อไป

โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นแบบ $\text{Al}/n\text{-Si}/\text{Al}$ ซึ่งประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะของอะลูมิเนียม (Al) ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า กับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) เป็นรอยสัมผัสชนิดต่อกัน 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากัน 1 mm^2 มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีค่าตามระยะ S ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และรูปที่ 3.3 แสดงลักษณะโครงสร้างและลวดลายของกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



รูปที่ 3.2 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



รูปที่ 3.3 ลวดลายของกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง

3.2 กระบวนการสร้าง

ในส่วนของการกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างชิ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค้นคว้าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนชั้นฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) โดยเลือกศึกษาบนแผ่นซิลิคอนชนิด CZ ที่มีสภาพต้านทาน 5-10 Ω -cm และความหนา 625 μ m เพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพและผลของคุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสง

ในขั้นตอนของการกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยชนิด Al/n-Si/Al ประกอบด้วยกระบวนการสร้าง 5 กระบวนการคือ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, กระบวนการอาร์เอสพีเตอร์ริงเพื่อสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม, กระบวนการ PECVD เพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายตัวตรวจวัดแสง และกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH โดยแต่ละขั้นตอนนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

ก่อนจะนำไปทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยนั้นต้องทำความสะอาดสิ่งสกปรกที่ติดมากับแผ่น ถ้าแผ่นไม่สะอาดอาจส่งผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่จะสร้างและเป็นขั้นตอนแรกของการกระบวนการสร้างทั้งหมด โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อัลตราโซนิคใน DI 1 แก้ว
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

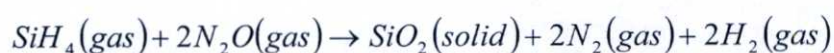
- ต้มในกรดไนตริก (nitric acid:HNO₃) จำนวน 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- จุ่มในน้ำ DI 1 แก้ว
- ต้มในน้ำ DI 2 แก้ว แก้วละ 5 นาที (กรด Nitric ละลายในน้ำร้อนได้ดี)
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทิลีน (Trichloroethylene) 5 นาที เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกคราบไขมัน
- อัลตราโซนิคในอะซิโตน (Acetone) 3 นาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่ม HF 5% เป็นเวลา 10-30 วินาที เพื่อลอกชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

2. กระบวนการสเปตเตอริง

กระบวนการอาร์เอฟสเปตเตอริง (RF sputtering) เป็นกระบวนการที่ใช้สร้างชั้นของโลหะอะลูมิเนียมมีความหนาประมาณ 2 μm โดยที่หลักการของการสร้างชั้นอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการสเปตเตอริงมีดังนี้ ทำการสร้างในระบบสุญญากาศจะประกอบไปด้วยแผ่นคู่ขนาน ด้านหนึ่งคือเป้าอะลูมิเนียมหรือขั้วแคโทด ส่วนอีกด้านหนึ่งคือฐานรองซิลิคอนหรือขั้วแอโนด เมื่อป้อนก๊าซอาร์กอนหรือจ่ายกำลังงานให้เกิดการสร้างพลาสมาเพื่อให้เกิดอาร์กอนไอออน ในบริเวณพลาสมา อาร์กอนไอออนจะถูกเร่งเข้าสู่เป้าอะลูมิเนียม ระหว่างที่อาร์กอนไอออนถูกเร่งจะได้รับโมเมนตัมและเข้าชนเป้าอะลูมิเนียม อะตอมของอะลูมิเนียมเมื่อถูกอาร์กอนไอออนชนก็จะได้รับการถ่ายเทโมเมนตัมและหลุดออกมาจากเป้าวิ่งเข้าสู่แผ่นฐานรองซิลิคอนควบแน่นเป็นชั้นฟิล์มบางอะลูมิเนียม

3. กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ด้วยกระบวนการ PECVD

PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor) เป็นการปลูกฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมาใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ $<400^{\circ}\text{C}$ เป็นวิธีปลูกชั้นฟิล์มบางที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสถานะก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์ การปลูกฟิล์มวิธีนี้ใช้หลักการพลาสมาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ จึงทำให้สามารถปลูกชั้นฟิล์มได้ที่อุณหภูมิต่ำ ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างชั้นฟิล์มของซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ปฏิกิริยาเคมีของการปลูกชั้นฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ [25]



4. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

เป็นการสร้างลวดลายของชิ้นงานโดยผ่านกระจกต้นแบบ เรียกว่า โฟโตมาสก์ (photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีลวดลายที่ได้ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วอยู่ที่กระจกจากนั้นฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบไปยังชิ้นงานที่ต้องการจะขึ้นลวดลาย แสงที่ฉายไปนั้นส่วนที่แสงสามารถผ่านกระจกต้นแบบไปได้และสัมผัสกับชั้นของน้ำยาไวแสงนั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมี-แสง ซึ่งจะให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไปตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นชิ้นงานไปล้างในน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บริเวณบางส่วนของน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนชิ้นงานนั้นจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้บริเวณที่มีน้ำยาไวแสงอยู่ถูกกัดออกไป เมื่อลอกน้ำยาไวแสงออกจะปรากฏลวดลายตามที่ได้ออกแบบไว้ โดยขั้นตอนมีดังนี้

- อบแผ่นซิลิคอนเพื่อไล่ความชื้นออกจากแผ่น ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ด้วยความเร็ว 500 รอบต่อวินาทีเป็นเวลา 10 วินาที และ 2000 รอบต่อวินาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (Pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้งเป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยเครื่องปรับช้อนมาร์ก (Mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 25 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (Post bake) ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- กัดชั้นที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างลวดลายโดยใช้สารละลายในการกัด
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในอะซิโตน 2 แก้ว แก้วละ 1 นาที เพื่อลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

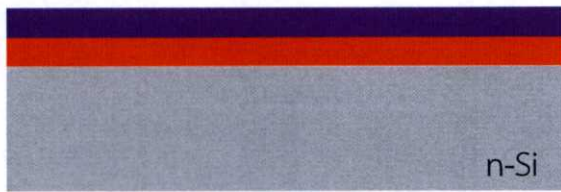
โดยกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงสามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังรูปที่ 3.4



ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น เพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนผิวของแผ่นซิลิคอน

สร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมที่ด้านหน้าแผ่นซิลิคอนหนา 2 μm

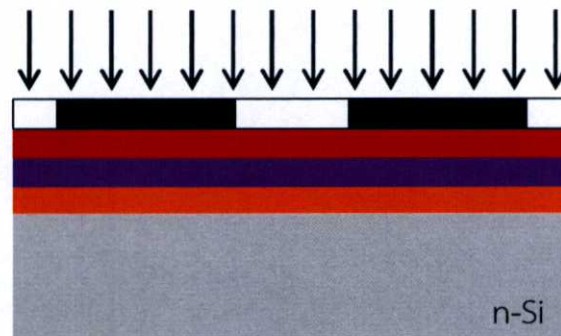
รูปที่ 3.4 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM



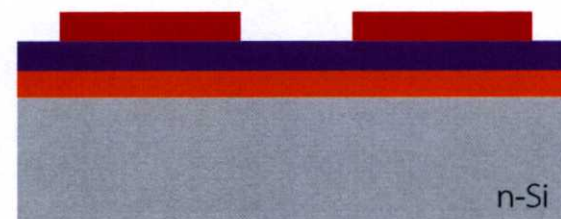
สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหน้าแผ่นบน
ชั้นอะลูมิเนียม ด้วยกระบวนการ PECVD



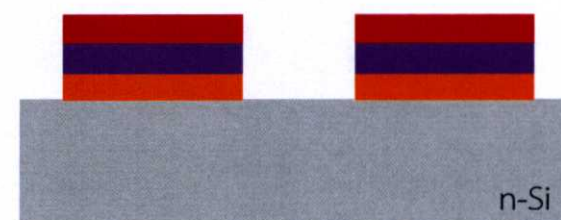
เคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหน้าแผ่น



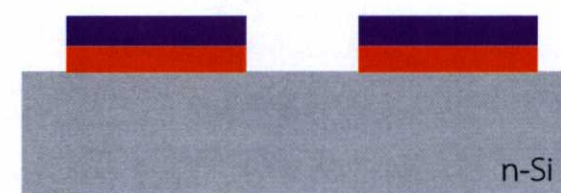
ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ



ชั้นลวดลายของน้ำยาไวแสง โดยการแช่ใน
น้ำยาชั้นลวดลาย Developer



กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมใน
ส่วนที่ไม่ต้องการออก



ลอกน้ำยาไวแสงส่วนที่เหลือออก



รูปที่ 3.4 (ต่อ)กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

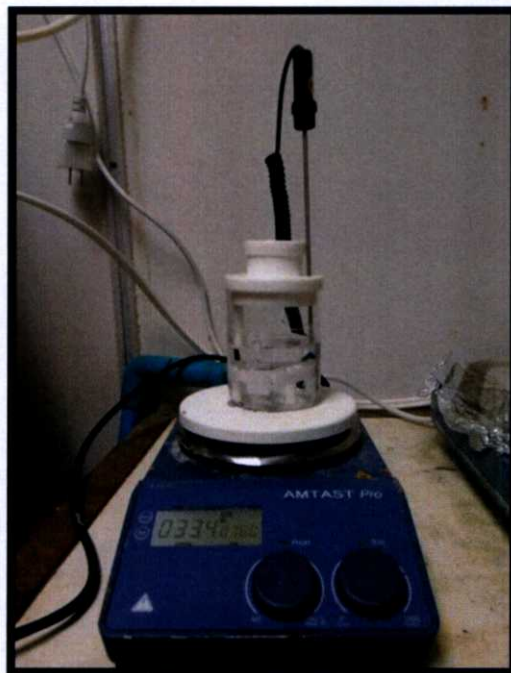
5. กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน

กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH โดยงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนโดยสารละลาย TMAH:H₂O ที่ความเข้มข้นต่างๆ อุณหภูมิค่าต่างๆ ความเร็วรอบในการกวนสารที่ความเร็วต่างๆ สารลดแรงตึงผิว IPA ที่ปริมาตรต่างๆ ใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง ซึ่งงานวิจัยดังกล่าวได้ศึกษาความลึกในการกัดเพื่อหาอัตราการกัดซึ่งยังไม่ได้ศึกษาและสภาพของพื้นผิวของแผ่นซิลิคอน และใช้เงื่อนไขการกัดดังนี้

- (1) ทำการกัดแผ่นโดยใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 wt%
- (2) ทำการกัดแผ่นโดยใช้อุณหภูมิ 40, 60 และ 80 °C
- (3) ทำการกัดแผ่นโดยใช้ความเร็วรอบในการกวนสาร 150, 250, 350 และ 450 rpm
- (4) ทำการกัดแผ่นโดยใช้สารลดแรงตึงผิว 10, 20 และ 30 vol%

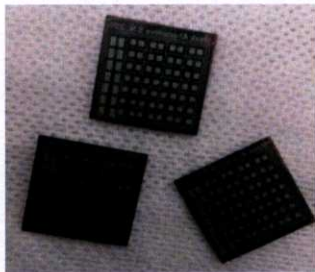
โดยมีขั้นตอนการทำดังนี้

- ต้มสารละลาย TMAH, TMAH+IPA
- นำแผ่น n-Si/SiO₂ ที่ได้หลังจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาทำการกัดซิลิคอน
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์
- จุ่มในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

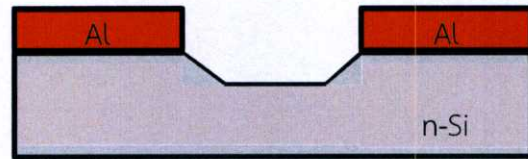


รูปที่ 3.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด

ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการสร้างดังกล่าวในรูปที่ 3.4 และผ่านกระบวนการกัดในรูปที่ 3.5 มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 3.6 และชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำมาเชื่อมต่อขา ดังแสดงในรูปที่ 3.7



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) ตัวอย่างชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัด (ข) ภาพจำลองชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัด



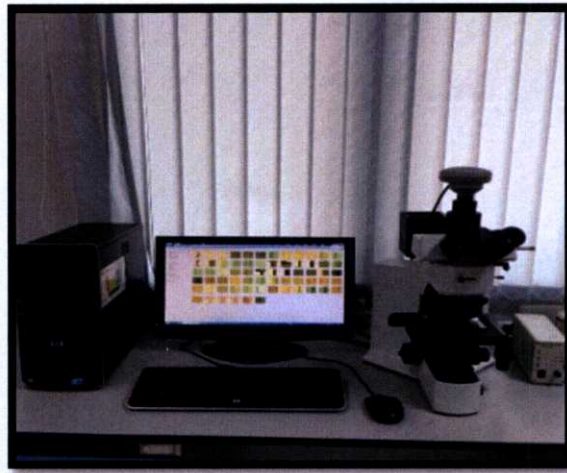
รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำมาเชื่อมต่อขา

3.3 การทดลอง

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างนั้นมาทดสอบลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ด้วยวิธีต่างๆ ดังนี้

3.3.1 ดูพื้นผิวด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง

กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (Light microscope) ในปัจจุบันกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงได้รับการพัฒนาให้มีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้นกว่าในอดีต กล้องจุลทรรศน์ในปัจจุบันมีกำลังขยายมากกว่าอดีตหลายเท่า เป็นกล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบเชิงประกอบ (compound light microscope) เป็นกล้องจุลทรรศน์ชนิดที่ใช้เลนส์หลายอันและมีกำลังขยายต่างๆ กันจะเห็นภาพวัตถุได้โดยมีการสะท้อนแสงจากวัตถุเข้าสู่เลนส์ ประกอบด้วย เลนส์ 2 ชุด คือ เลนส์ใกล้ตา (objective lens) และเลนส์ใกล้ตา (ocular lens หรือ eyepiece) กำลังขยายของภาพคือ ผลคูณของกำลังขยายของเลนส์ใกล้วัตถุกับกำลังขยายของเลนส์ใกล้ตา ความสามารถในการแจกแจงรายละเอียดของภาพของกล้องจุลทรรศน์ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของเลนส์และแสงต้นกำเนิด [26] ดังแสดงในรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 กล้องจุลทรรศน์ใช้แสง รุ่น OLYMPUS BX51

3.3.2 วัดความลึกด้วยเครื่อง Surface Profilometer

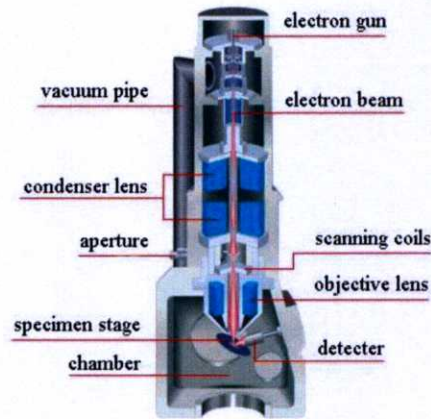
เครื่อง Surface Profilometer แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยเครื่องมือวัดความหยาบผิว (Surface Roughness) โดยใช้ปลายเข็มขนาดเล็กลงบนพื้นผิววัสดุที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด ลักษณะการสปริงขึ้นลงของปลายเข็มเมื่อลากผ่านผิวไม่เรียบ จะถูกแปลงเป็นสัญญาณไฟฟ้าผ่านระบบการวิเคราะห์สัญญาณ เครื่องจะแสดงผลออกมาในรูปกราฟและค่าความหยาบผิว [27]



รูปที่ 3.9 เครื่อง surface profilometer

3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของวัสดุชิ้นงานในระดับจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายมากกว่า 3,000 เท่าถึงระดับ 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 – 100 นาโนเมตร นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยังใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี [28]



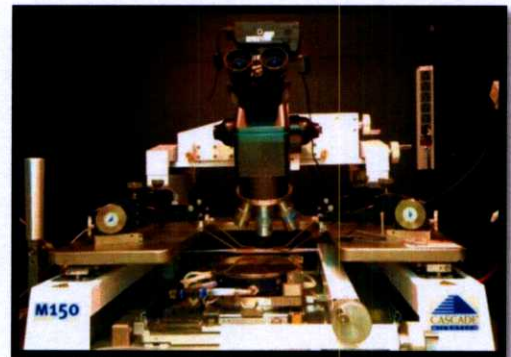
รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

3.3.4 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็น Al/n-Si/Al เมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการวัดค่ากระแส-แรงดัน และความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A และ Cascade Microtech Model M150 probe station ดังรูปที่ 3.11 ก. และ ข. ตามลำดับ ซึ่งได้รับการสนับสนุนเครื่องมือการวัดจากศูนย์วิจัยไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ในการวัดค่ากระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งจะป้อนแรงดันไฟฟ้า ตั้งแต่ -10 ถึง 10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 mV และในการวัดความจุไฟฟ้า-แรงดัน จะป้อนแรงดันไฟฟ้า ตั้งแต่ 0 ถึง -10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 50 mV และใช้ความถี่ 100 kHz



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.11 (ก) เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ Agilent รุ่น B1500A
(ข) เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station

3.3.5 การวัดการตอบสนองทางแสง

การวัดการตอบสนองทางแสงนั้น ทำการวัดโดยใช้ หลอดฮาโลเจน ที่สามารถปรับสว่างของแสงที่ตกกระทบชิ้นงานได้ตั้งแต่ช่วง 5000 lux ถึง 25000 lux โดยการวัดการตอบสนองทางแสง ทำการเก็บข้อมูลทั้งตัวตรวจวัดแสงแบบฟลานาร์และแบบร่องรูปตัวยู โดยทำการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง -10 ถึง 10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 V ทำการวัดกระแสที่ได้จากการไบอัสในช่วงต่างด้วยเครื่อง KEITHLEY 2400 นอกจากนี้ยังทำการวัดขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบโดยใช้หลักการจ่ายแรงดันแบบเดียวกันกับขณะได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลองของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AV/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω -cm มีความหนา 625 μm โดยทำการศึกษาลักษณะของพื้นผิวในการกัด ซึ่งจะทำการศึกษาโดยกำหนดเงื่อนไขในการศึกษาเป็น 4 ส่วน คือ ส่วนที่หนึ่งจะเป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนขณะมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ส่วนที่สองนั้นจะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในการกัด ส่วนที่สามจะทำการทดสอบความเร็วรอบรอบในการกววนสารที่ค่าความเร็วต่างๆ กันและส่วนสุดท้ายจะทำการศึกษาการเติมสารลดแรงตึงผิวในปริมาณต่างๆ จากนั้นทำการศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย ในหัวข้อนี้จะแบ่งการศึกษาอยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะทำการศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย TMAH และส่วนที่สองจะทำการศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ที่เติมสารลดแรงตึงผิว จากนั้นจะทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AV/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อทดสอบลักษณะทางกายภาพครั้งสุดท้ายก่อนจะทำการศึกษาคคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AV/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยแบ่งการศึกษาเป็น 3 ส่วน ดังนี้ ส่วนแรกจะทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ในส่วนที่สองนั้นจะทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงตกกระทบในความเข้มแสงต่างๆ โดยใช้หลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงและส่วนสุดท้ายจะทำการศึกษาความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AV/n-Si/Al

4.1 การศึกษาลักษณะของพื้นผิวที่กัด

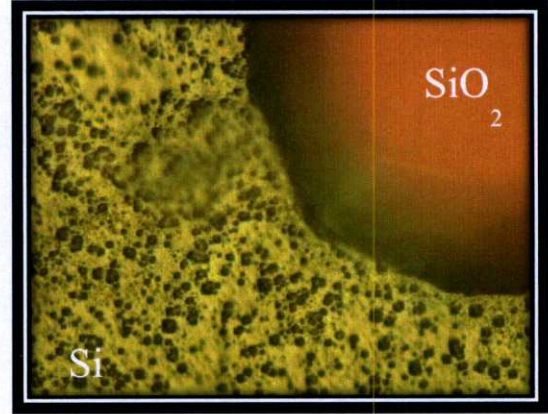
ในหัวข้อนี้จะศึกษาพื้นผิวของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ให้เกิดเป็นร่องรูปตัวยู ซึ่งคุณสมบัติของสารละลาย TMAH จะมีการกัดระนาบ (100) > (111) โดยกำหนดเงื่อนไขต่างๆ กัน เพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของการกัดในเงื่อนไขต่างๆ กัน โดยต้องการให้ผิวที่ทำการกัดนั้นมีความเรียบที่ใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสงแบบ-พลาสมาให้ได้มากที่สุด เพื่อลดปัจจัยต่างๆ ที่จะใช้ในการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าระหว่างตัวตรวจวัดแสงแบบพลาสมาและตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ในหัวข้อนี้จะทำการดูพื้นผิวแผ่นซิลิคอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์ใช้แสงแบบเชิงประกอบในการตรวจสอบพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่มีเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้

4.1.1 ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH

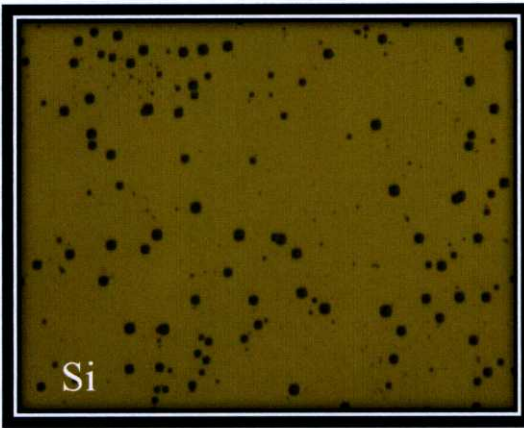
ในหัวข้อนี้จะเป็นการทดสอบการกัดแผ่นซิลิคอนโดยจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ซึ่งในหัวข้อนี้นั้นจะทำการกัดแผ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ตั้งแต่ความเข้มข้นสารละลาย 5 wt%, 10 wt%, 15 wt%, 20 wt% และ 25 wt% เพื่อดูพื้นผิวที่เกิดขึ้นหลังการกัด โดยใช้อุณหภูมิคงที่ในการกัดอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกววนสารอยู่ที่ 250 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง เท่ากันทุกเงื่อนไข โดยภาพพื้นผิวที่ถูกกัดนั้นจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.1 ซึ่งเป็นการถ่ายจากกล้องไมโครสโคป จะเห็นได้ว่าพื้นผิวหลังการกัดของแต่ละความเข้มข้นนั้น มีความเรียบและความขรุขระไม่เท่ากัน ซึ่งจะเห็นว่าความเข้มข้นของสาร



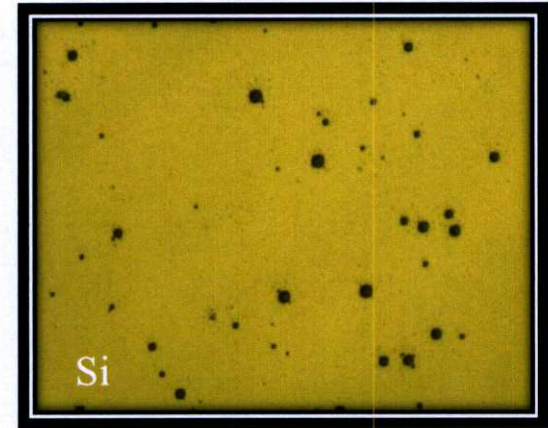
(ก)



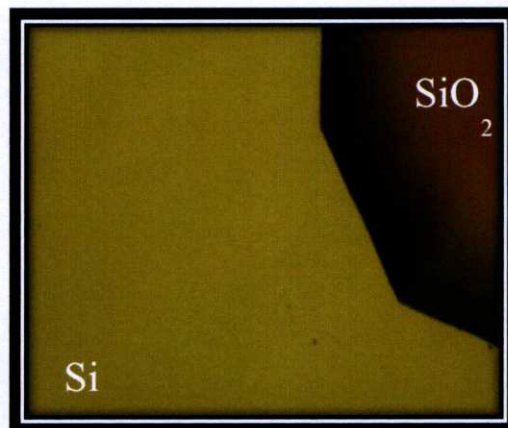
(ข)



(ค)



(ง)



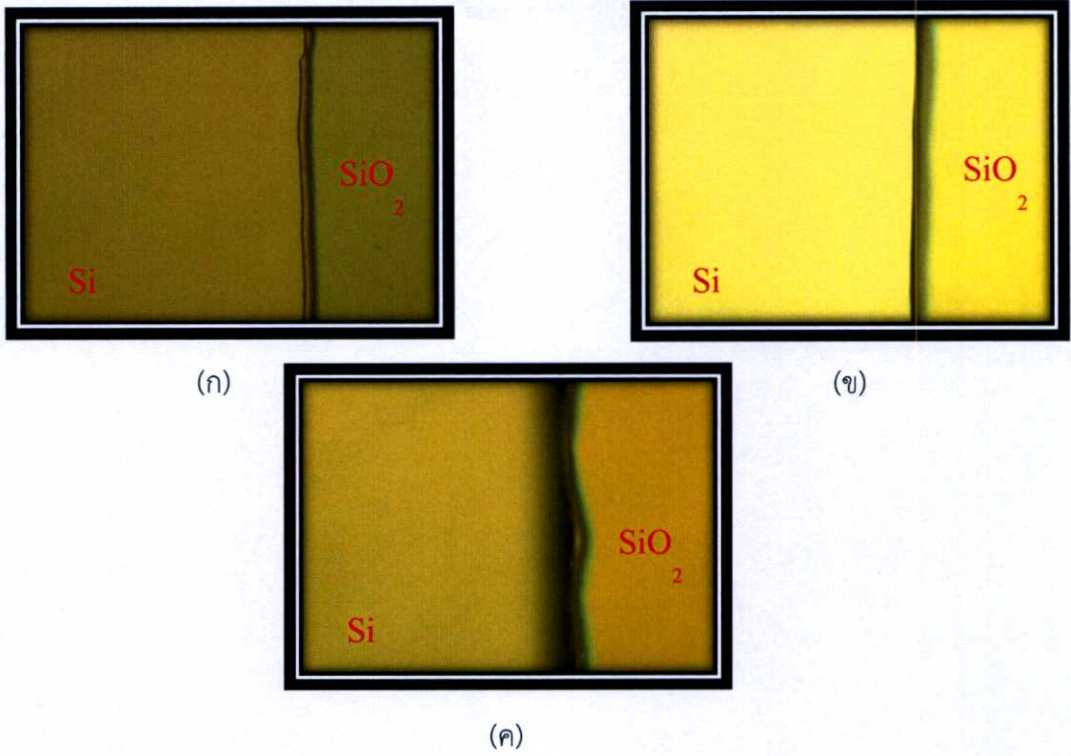
(จ)

รูปที่ 4.1 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น (ก) 5 wt%, (ข) 10 wt%, (ค) 15 wt%, (ง) 20 wt%, (จ) 25 wt% ที่กำลังขยาย 500 เท่า

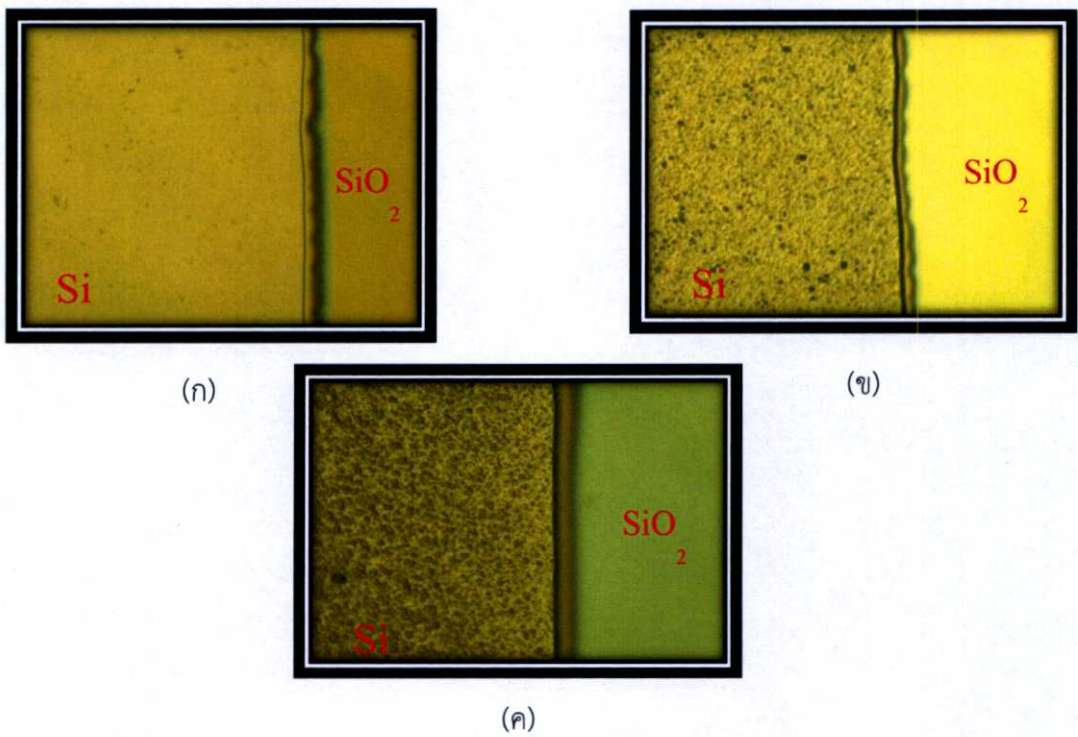
ละลายมากก็จะมีระเบียบที่มากกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นน้อย อันเนื่องมาจากปัจจัยหลายๆ อย่าง ไม่ว่าจะเป็นอัตราการกัดของสารละลายที่มีความเร็วในการกัดไม่เท่ากันขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลาย TMAH และอุณหภูมิในการกัด เมื่อทำการกัดที่ผิวของซิลิคอนนั้นอัตราการกัดที่ใช้กัดซิลิคอน ถ้าอัตราการกัดเร็วเมื่อกัดไปพบจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนก็จะทำให้เกิดพีระมิดขึ้นมาได้ จุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนนี้ก็เปรียบเสมือนชั้นป้องกันการกัดของสารละลาย TMAH อัตราการกัดที่เร็วขึ้นจะทำให้ขนาดของพีระมิดมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเนื่องจากเมื่อพบจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนระนาบการกัดจะเปลี่ยนไปและเพราะอัตราการกัดที่เร็วขึ้นการเจาะร่องใต้จุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนจึงช้ากว่าการกัดผิวในแนวตั้ง หรือ ระนาบ (100) จึงเป็นเหตุผลอย่างหนึ่งที่ทำให้พีระมิดมีขนาดที่ใหญ่ อัตราการกัดที่ช้าเมื่อกัดไปพบเข้ากับจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนก็จะเปลี่ยนระนาบการกัดเช่นกันแต่เพราะมีอัตราการกัดที่ช้าเลยทำให้เกิดการกัดเจาะเข้าไปข้างใต้ของจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนซึ่งอาจทำให้จุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนที่เป็นชั้นป้องกันโดยธรรมชาตินั้นหลุดออกจากผิวที่ถูกกัดอาจไม่เกิดพีระมิดขึ้นหรือถึงแม้ถ้าเกิดก็จะได้พีระมิดที่มีขนาดเล็กกว่าสารละลาย TMAH ที่มีอัตราการกัดที่เร็ว

4.1.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด

ในหัวข้อนี้ก็จะกล่าวถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองในการกัดของสารละลาย TMAH ซึ่งใช้มีความเข้มข้นของสารละลาย TMAH อยู่ 2 ความเข้มข้นโดยใช้หลักการเลือก คือ สารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 10 wt% นั้น จะมีอัตราการกัดที่เร็วกว่าสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 25 wt% ซึ่งเป็นอัตราการกัดที่ช้าที่สุดของสารละลายที่ใช้ในการทดลอง จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดโดยอุณหภูมิที่ใช้ คือ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส ใช้ความเร็วรอบในการกววนสารอยู่ที่ 250 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมงเท่ากันทุกเงื่อนไข โดยหน้าที่หลักของอุณหภูมิคือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย TMAH เพื่อให้มีการแตกตัวได้อิออนไฮดรอกไซด์มากขึ้น ซึ่งอิออนไฮดรอกไซด์ตัวนี้จะไปจับกับอะตอมของซิลิคอนและถูกดึงออกสู่สารละลาย อัตราการกัดจึงขึ้นอยู่กับการดึงอะตอมของซิลิคอนได้มากน้อยตามเวลาที่กำหนด โดยภาพพื้นผิวที่ถูกกัดนั้นจะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.2 นั้นจะเป็นการอธิบายในส่วนของสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 25 wt% ที่กัดในอุณหภูมิต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 เท่า จะเห็นได้ว่าสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 25 wt% นั้น มีอัตราการกัดที่ช้าอยู่แล้วซึ่งเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงค่าอุณหภูมิจาก 80 องศาเซลเซียส ลดลงจนถึง 40 องศาเซลเซียส จะทำให้การแตกตัวของได้อิออนไฮดรอกไซด์นั้นลดลง อัตราการกัดก็ลดลงจึงทำให้ผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบและไม่เห็นถึงความแตกต่างถึงแม้จะมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิกก็ตาม แต่ความลึกที่ได้นั้นจะแตกต่างกันเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงย่อมมีอัตราการกัดมากกว่าอุณหภูมิต่ำ ส่วนความสว่างที่ไม่เท่ากันในแต่ละรูปนั้นเกิดจากการปรับความเข้มแสงแบบกึ่งอัตโนมัติ จึงทำให้ภาพที่ได้นั้นมีความสว่างไม่เท่ากัน และรูปที่ 4.3 นั้นจะเป็นการอธิบายในส่วนของสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 10 wt% ที่กัดในอุณหภูมิต่างๆ จะเห็นว่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นั้นจะมีอัตรา



รูปที่ 4.2 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25 wt% ที่อุณหภูมิ (ก) 40, (ข) 60 และ (ค) 80 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า

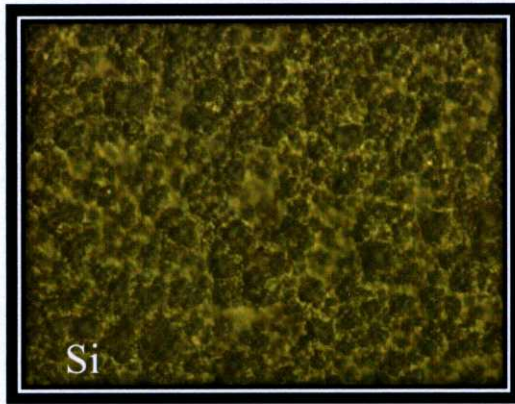


รูปที่ 4.3 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่อุณหภูมิ (ก) 40, (ข) 60 และ (ค) 80 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 500 เท่า

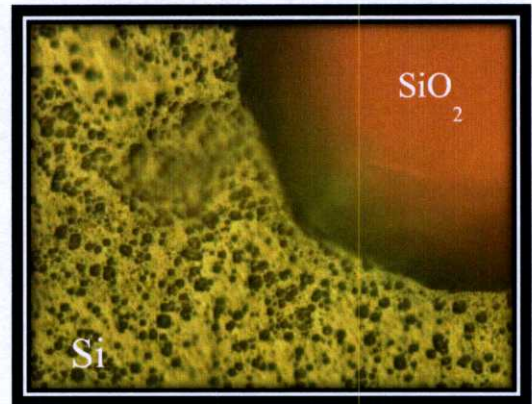
การกัดสูงสุดเนื่องจากการแตกตัวของสารละลาย TMAH ที่ผสมกับน้ำโดยมีความเข้มข้น 10 wt% ซึ่งไอออนไฮดรอกไซด์ที่ได้จะมาจากการแตกตัวของสารละลายและการแตกตัวของน้ำทำให้ได้ไอออนไฮดรอกไซด์มากกว่าสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้นมากกว่า 10 wt% จึงมีอัตราการกัดที่เร็ว จากภาพ (ค) จะเห็นว่าส่วนที่เป็นซิลิคอนไดออกไซด์นั้นมีความเรียบถึงแม้ว่าจะกัดเป็นเวลานานก็ยังเหลือซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นป้องกันอยู่และทำให้เห็นว่าสารละลาย TMAH นั้นมีอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์น้อยกว่าอัตราการกัดผิวของซิลิคอน ที่ผิวของซิลิคอนที่ผ่านการกัดนั้นจะมีความขรุขระมากเพราะอัตราการกัดที่เร็วนั้นจะทำให้เกิดพีระมิดที่กระจายแบบสุ่มโดยไม่สามารถควบคุมการเกิดได้ ซึ่งขนาดของพีระมิดขึ้นอยู่กับขนาดของจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนและอัตราการกัดของซิลิคอน จากภาพ (ข) นั้นพีระมิดจะเล็กลงเพราะอัตราการกัดที่ลดลง ความลึกของการกัดซิลิคอนก็จะลดลง จากภาพ (ก) ก็เช่นกัน โดยจะเห็นได้ชัดว่าอุณหภูมินั้นมีผลต่อความเร็วของพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัด ซึ่งถ้าต้องการผิวที่เรียบนั้นต้องใช้อุณหภูมิที่ต่ำ แต่จะเสียเวลาในการกัดเพิ่มขึ้น

4.1.3 ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH

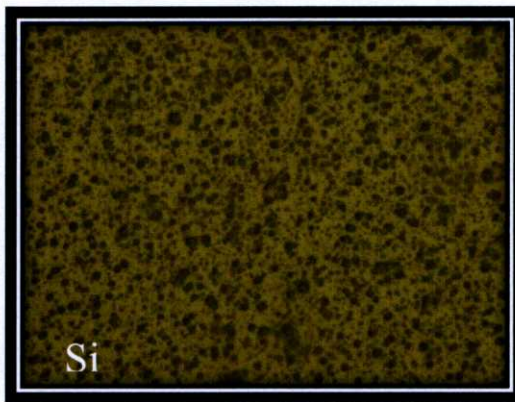
ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความเร็วรอบในการกวนสารเพื่อศึกษาพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัด โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 10 wt% อุณหภูมิที่ใช้อยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง เท่ากันทุกเงื่อนไข โดยจะทำการปรับรอบการหมุนในการกวนสารอยู่ที่ 150, 250, 350 และ 450 รอบต่อนาที ดังรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่ารอบของการกวนสารนั้นก็จะมีผลอยู่บ้าง เนื่องจากเมื่อเริ่มการกัดของสารละลาย TMAH จะทำให้เกิดฟองก๊าซของไฮโดรเจนขึ้น ซึ่งฟองก๊าซไฮโดรเจนเหล่านี้จะเกิดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการกัดของซิลิคอนซึ่งเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเองโดยธรรมชาติ โดยฟองก๊าซไฮโดรเจนนั้นเมื่อเกิดขึ้นแล้วจะลอยอยู่ในสารละลายและอาจไปเกาะอยู่บนผิวซิลิคอนขณะทำการกัดจะส่งผลให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนเปรียบเสมือนชั้นป้องกันโดยธรรมชาติ และจะทำให้เกิดพีระมิดขึ้นถ้าไม่ทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนนั้นหลุดออกไป การปรับความเร็วรอบในการกวนสารนั้นจะเป็นการทำให้ความเข้มข้นของสารมีความเข้มข้นเท่ากันทั้งระบบและช่วยพัดฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกาะอยู่ที่ผิวของแผ่นซิลิคอนหลุดออกมาได้ จากภาพ (ก) ใช้ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH อยู่ที่ 150 รอบต่อนาที จะเห็นว่าความเร็วรอบในการกวนสารยังไม่พอที่จะทำให้ความเข้มข้นสารเท่ากันและไม่สามารถทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนหลุดออกมาได้จึงทำให้พื้นผิวที่กั้นนั้นมีความขรุขระและมีพีระมิดขนาดใหญ่โดยไม่เห็นพื้นผิวที่เรียบเลย จากภาพ (ข) ซึ่งใช้ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH อยู่ที่ 250 รอบต่อนาที จะเห็นว่าเริ่มมีในส่วนที่เป็นพื้นเรียบและเกิดพีระมิดที่มีความหนาแน่นน้อยลง ถึงแม้ว่าความเร็วรอบในการกวนสารพอจะทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนหลุดออกจากผิวของแผ่นซิลิคอนแต่อัตราการกัดและจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกก็ยังก่อให้เกิดเป็นพีระมิดอยู่ จากภาพ (ค) ที่ใช้ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH อยู่ที่ 350 รอบต่อนาที จะเห็นว่ามีความใกล้เคียงกับภาพ (ข) แต่จะเห็นว่าความหนาแน่นของพีระมิดนั้นมากกว่า ซึ่งอาจเกิดจากความเร็วที่เพิ่มขึ้นทำให้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ในระบบมีความเข้มข้นไม่เท่ากัน จากภาพ (ง) ที่ใช้ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH อยู่ที่ 450 รอบต่อนาที จะเห็นว่าพื้นผิวนั้นกลับมาขรุขระเหมือนดังภาพ (ก) อาจเป็นเพราะความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH นั้นเร็วจนเกินไปจนทำให้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ในระบบไม่เท่ากันและทำให้ผิวสัมผัสของสารละลาย TMAH กับแผ่นซิลิคอนน้อยลง



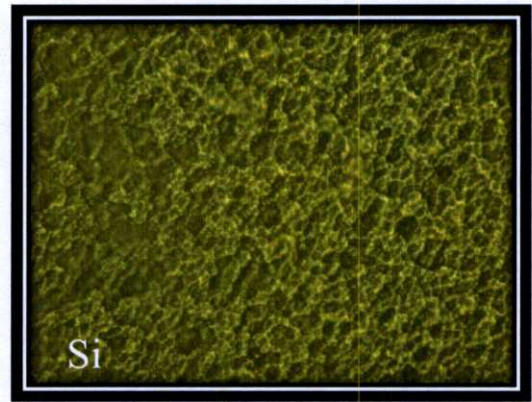
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 % ที่ความเร็วรอบ (ก) 150, (ข) 250, (ค) 350 และ (ง) 450 รอบต่อนาที ที่กำลังขยาย 500 เท่า

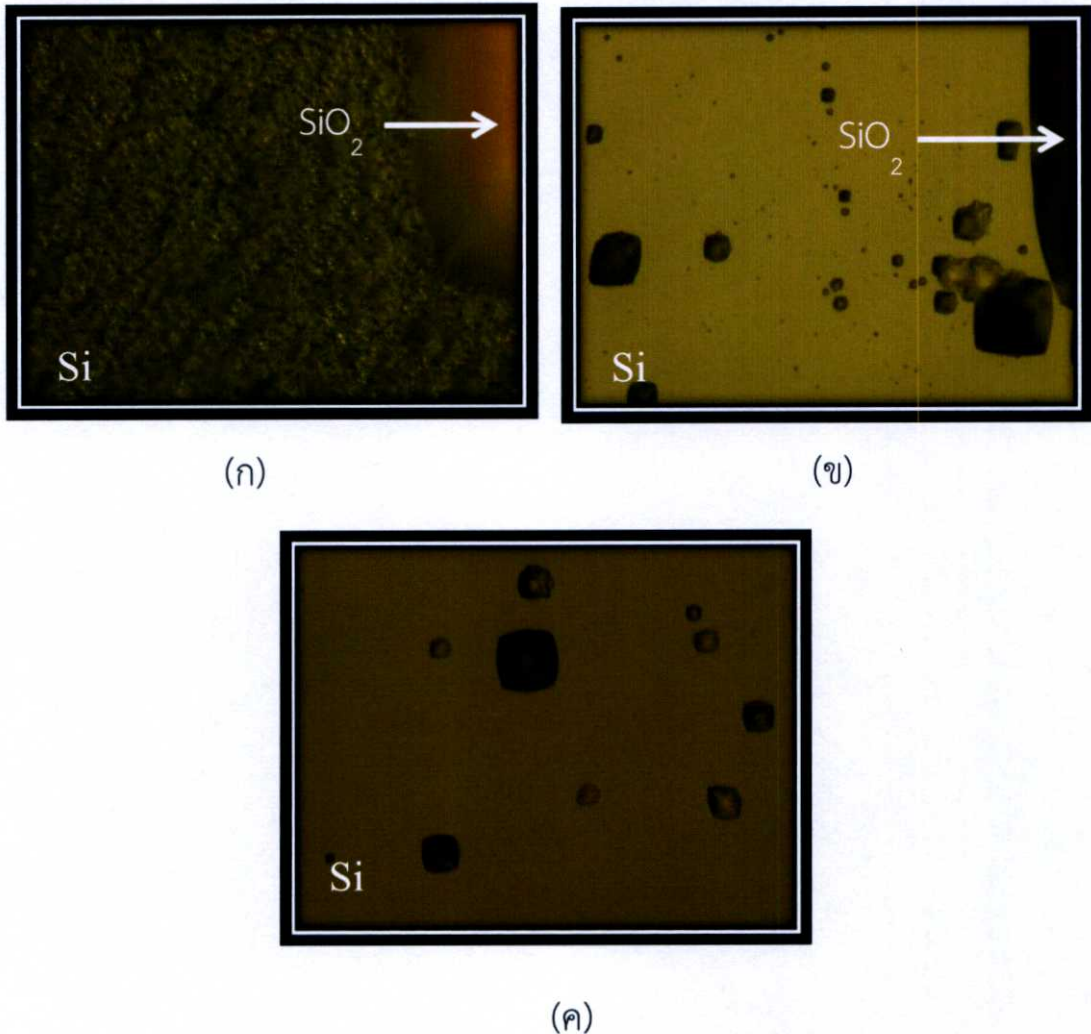
4.1.4 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิว

ในหัวข้อที่ทำการศึกษาพื้นผิวของซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH นั้นพบว่า ความเข้มข้นของสารละลายแต่ละความเข้มข้นนั้นมีอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่แตกต่างกันและจำนวนของพริสมิตที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดและจำนวนที่ต่างกัน ซึ่งผลกระทบที่ทำให้เกิดพริสมิตอย่างหนึ่งนั่นก็คือ ฟองก๊าซไฮโดรเจน ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาการลดจำนวนของพริสมิตโดยการเติมสารลดแรงตึงผิวเข้าไปในสารละลาย TMAH โดยสารลดแรงตึงผิวที่นำมาใช้นั้นเป็นประเภทที่ไม่ให้ประจุ (Nonionic Surfactant) เมื่อละลายน้ำแล้วจะไม่แตกตัวจึงไม่มีประจุ คุณสมบัติของสารกลุ่มนี้จะแตกต่างกันไปตั้งแต่ละลายน้ำได้จนไม่ละลายน้ำสารที่ไม่ละลายน้ำมักใช้เป็นตัวดับฟองก๊าซ โดยสารที่จะนำมาใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวนั้น คือ ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol: IPA) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งที่ไม่ให้ประจุ หาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพงสามารถนำมาใช้เป็นสารลดแรงตึงผิวเพื่อให้ผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนกับสารละลาย TMAH มีผิวสัมผัสมากขึ้นและส่งผลให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนนั้นเกาะที่ผิวของแผ่นซิลิคอนยากขึ้น โดยเลือกความเข้มข้นในการศึกษาอยู่ 3 ความเข้มข้น

คือ 10, 15 และ 20 wt% โดยจะทำการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปที่ 10, 20 และ 30 vol% จึงแบ่งหัวข้อเพื่อให้ง่ายต่อการศึกษาค้นคว้าหลังจากเติมสารลดแรงตึงผิว ดังต่อไปนี้

4.1.4.1 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 10 wt%

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาพื้นผิวที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 10 wt% ใช้อุณหภูมิในการกัด 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวนสารอยู่ที่ 250 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง เท่ากันทุกเงื่อนไข โดยจะทำการเติม IPA ในปริมาณต่างๆที่ 10, 20 และ 30 vol% ดังรูปที่ 4.5 ในภาพ (ก) นั้นจะเห็นว่าปริมาณ IPA ที่เติมเข้าไป 10 vol% นั้นยังไม่เพียงพอที่จะให้



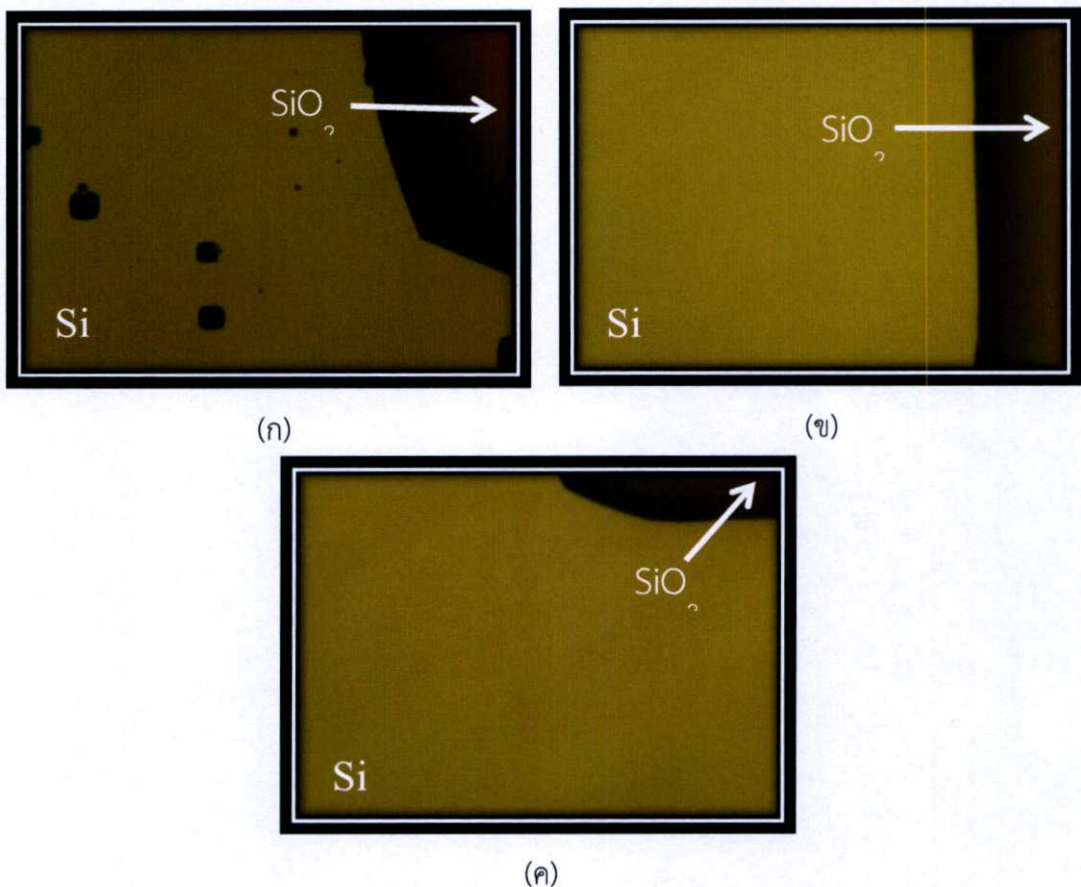
รูปที่ 4.5 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol%, (ข) 20 vol%, (ค) 30 vol% ที่กำลังขยาย 500 เท่า

พื้นผิวของซิลิคอนมีความเรียบ แต่ก็สามารถสังเกตเห็นได้ว่าความขรุขระที่ได้ก็น้อยลง อาจเป็นเพราะผิวสัมผัสที่ดีขึ้นทำให้ผิวของแผ่นซิลิคอนถูกกัดเท่ากัน ภาพที่ (ข) เมื่อเพิ่มปริมาณ IPA เข้าไปในสารละลาย TMAH ที่ปริมาณ 20 vol% จะเห็นได้ชัดว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงขึ้น โดยจะเห็นว่าพื้นผิวที่ถูกกัดนั้นมีพื้นผิวที่เรียบขึ้นมากและเห็นพีระมิดชัดเจนขึ้น ความหนาแน่นของพีระมิดนั้นลดลงและมี

ขนาดเล็กใหญ่แตกต่างกันมาก อาจเกิดจากการเหลือของฟองก๊าซและจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนอยู่บ้าง ภาพที่ (ค) เมื่อเพิ่มปริมาณ IPA เข้าไปในสารละลาย TMAH ที่ปริมาณ 30 vol% จะเห็นว่าพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบและพีระมิดที่เกิดขึ้นนั้นเหลืออยู่เล็กน้อย ซึ่งพีระมิดที่เหลืออยู่นี้อาจเกิดจากจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอน ซึ่งผลจากการเติม IPA นี้ทำให้ทราบว่า IPA ช่วยทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนหลุดออกจากผิวของแผ่นซิลิคอนและทำให้ผิวที่กัดมีความเรียบขึ้น

4.1.4.2 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15 wt%

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาพื้นผิวที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15 wt% ใช้อุณหภูมิในการกัด 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวนสารอยู่ที่ 250 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง เท่ากันทุกเงื่อนไข โดยจะทำการเติม IPA ในปริมาณต่างที่ 10, 20 และ 30 vol% ดังรูปที่ 4.6



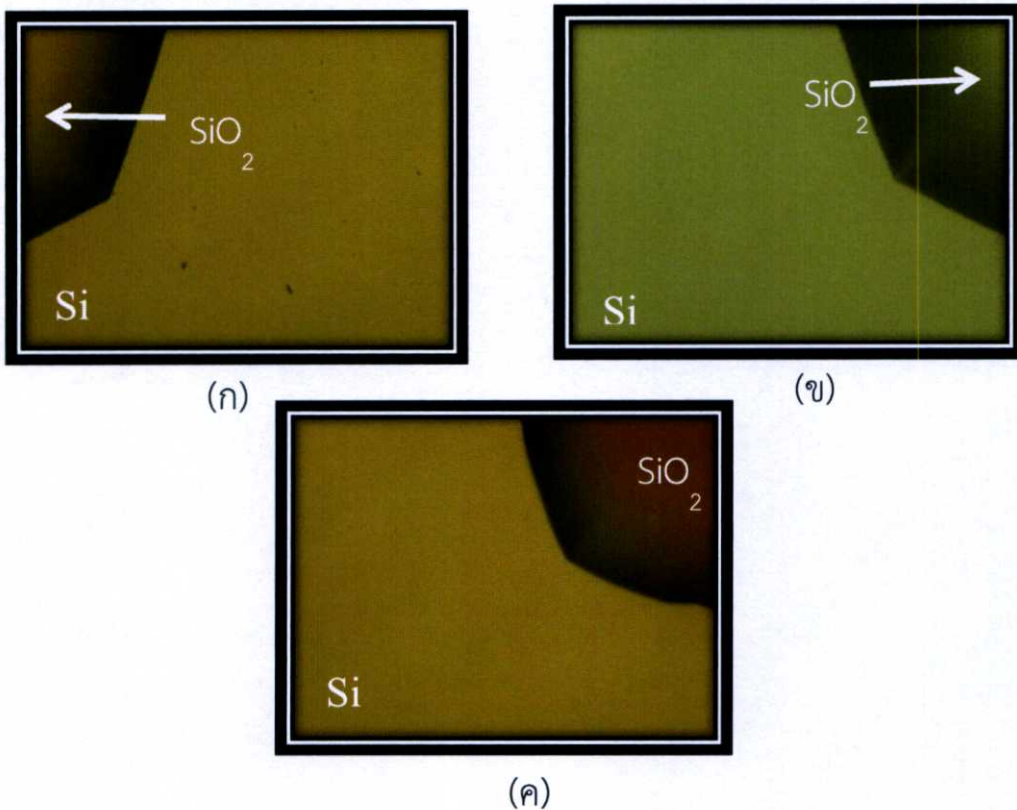
รูปที่ 4.6 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol%, (ข) 20 vol%, (ค) 30 vol% ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จะเห็นว่าอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15 wt% นั้นน้อยกว่าอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 10 wt% พีระมิดที่เกิดขึ้นนั้นย่อมมีขนาดและจำนวนน้อยกว่าเช่นกัน เมื่อทำการเติม IPA ในปริมาณ 10 vol% ไปนั้นจะเห็นได้ว่าพีระมิดที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดเล็กลง มีขนาดที่ใกล้เคียงกันและมีจำนวนที่ไม่มาก ใกล้เคียงกับผิวที่เรียบแล้วแต่ก็ยังมีจุดที่เห็นเล็กๆอยู่บ้าง

พอเดาได้ว่าสิ่งที่เห็นเป็นจุดเล็กๆ นั้น คือ ยอดของพีระมิดที่กำลังจะเกิดขึ้นดัง ภาพที่ (ก) ซึ่งก็ยังไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผิวของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ที่ไม่มีการกัดพื้นผิวเหมือนตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู เมื่อทำการเติม IPA ในปริมาณ 20 และ 30 vol% จะเห็นว่าพื้นผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบและไม่ปรากฏพีระมิดบนพื้นผิวเลยแม้แต่น้อย ทำให้ทราบว่าปริมาณ IPA นั้นเพียงพอต่อการกำจัดฟองก๊าซไฮโดรเจนและเพียงพอในการช่วยให้ผิวสัมผัสของสารละลาย TMAH กับแผ่นซิลิคอนดีซีขึ้น จึงทำให้การกัดเซาะจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนนั้นดีขึ้น ดังภาพ (ข) และ (ค) ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ทำการเติมเข้าไปในระบบนี้อาจจะทำให้อัตราการกัดของสารละลาย TMAH ลดลงบ้างแต่ก็ไม่ทำให้อัตราการกัดลดมากจนเกินไป

4.1.4.3 ปริมาณของสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 20 wt%

หัวข้อนี้เป็นการศึกษาพื้นผิวที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 20 wt% ใช้อุณหภูมิในการกัด 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวนสารอยู่ที่ 250 รอบต่อนาที ใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง เท่ากันทุกเงื่อนไข โดยจะทำการเติม IPA ในปริมาณต่างที่ 10, 20 และ 30 vol% ดังรูปที่ 4.7



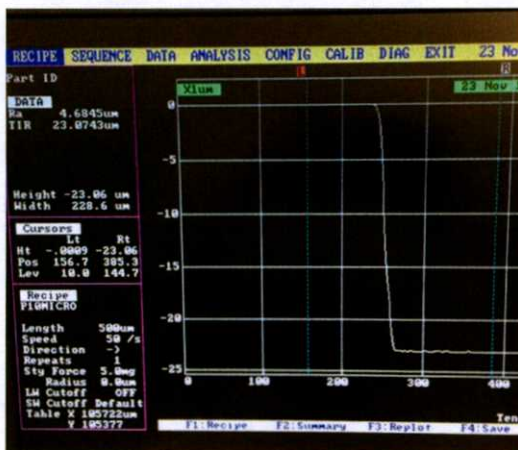
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายชิ้นงานหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 10 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol%, (ข) 20 vol%, (ค) 30 vol% ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จะเห็นว่าอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 20 wt% นั้นน้อยกว่าอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15 wt% พีระมิดที่เกิดขึ้นย่อมมีขนาดและจำนวนน้อยกว่าเช่นกัน เมื่อทำการเติม IPA ในปริมาณ 10 vol% ไปนั้นจะเห็นได้ว่ามีความใกล้เคียงกับผิวที่เรียบแต่ก็ยังมีจุดที่เห็นเล็กๆ อยู่บ้าง และสิ่งที่เห็นเป็นจุดเล็กๆ นั้น คือ ยอดของพีระมิดที่กำลังจะเกิดขึ้นดัง

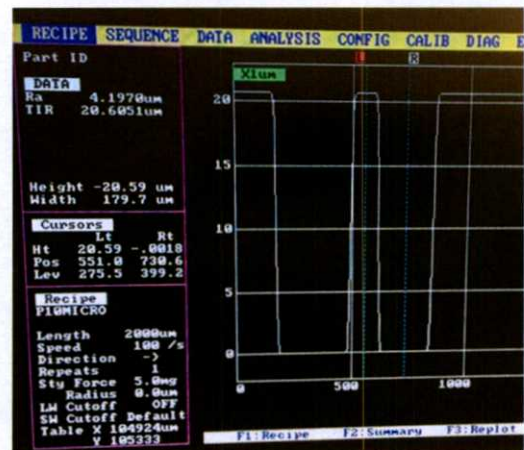
ภาพที่ (ก) ซึ่งก็ยังไม่เพียงพอที่จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับผิวของตัวตรวจวัดแสงแบบพลาสมาที่ไม่มี การกัดพื้นผิวเหมือนตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู เมื่อทำการเติม IPA ในปริมาณ 20 และ 30 vol% จะเห็นว่าพื้นผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบและไม่ปรากฏพีระมิตบนพื้นผิวเลยแม้แต่น้อยทำให้ ทราบว่าปริมาณ IPA นั้นเพียงพอต่อการกำจัดฟองก๊าซไฮโดรเจนและเพียงพอในการช่วยให้ผิวสัมผัส ของสารละลาย TMAH กับแผ่นซิลิคอนดีซี้น จึงทำให้การกัดเซาะจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของ ซิลิคอนดีซี้น ดังภาพ (ข) และ (ค) ปริมาณสารลดแรงตึงผิวที่ทำการเติมเข้าไปในระบบนี้อาจจะทำให้ อัตราการกัดของสารละลาย TMAH ลดลงบ้างแต่ก็ไม่ทำให้อัตราการกัดลดมากจนเกินไป ซึ่งอัตรา การกัดนี้จะกล่าวถึงในหัวข้อต่อไป

4.2 การศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย

ในหัวข้อนี้จะศึกษาเกี่ยวกับความลึกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นซิลิคอนด้วย สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ และความลึกของการกัดเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวใน สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน ในเวลาที่ทำกรกัดเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยแผ่น ซิลิคอนนั้นจะมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยู ซึ่งกันหลุมนั้นมีระนาบเป็น (100) และพื้นที่ราบเอียงนั้นมี ระนาบเป็น (111) โดยจะทดสอบความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแล้วด้วยเครื่อง surface profilometer จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.8



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.8 ตัวอย่างการวัดความลึกของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วย เครื่อง surface profilometer

(ก) สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt%, เติมน้ำ 10 vol%

(ข) สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt%, เติมน้ำ 30 vol%

ซึ่งจากรูปที่ 4.8 จะเห็นว่าความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดนั้น จะสามารถเห็น ได้อย่างชัดเจนในด้านซ้ายของกราฟความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดในสารละลาย TMAH แล้ว แสดงให้เห็นถึงค่าความลึกในการกัดแผ่นซิลิคอน จากรูปที่ 4.8 (ก) สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt%, เติมน้ำ 10 vol% อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนนั้นจะมากที่สุดมีค่าความลึก

เท่ากับ $23.06 \mu\text{m}$ แต่เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวเพิ่มเข้าไปในระบบ $30 \text{ vol}\%$ อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนลดลงน้อยลง โดยมีค่าความลึกเท่ากับ $20.59 \mu\text{m}$ ซึ่งเป็นเพราะสารละลาย TMAH ที่เติมสารลดแรงตึงผิวเข้าไปนั้นทำให้ปริมาณในระบบนั้นเพิ่มขึ้น จึงทำให้อัตราการกัดของแผ่นซิลิคอนนั้นลดลงไปด้วย ซึ่งในงานวิจัยนี้เราต้องการกัดแผ่นซิลิคอนให้มีความลึกโดยให้มีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูและมี ความลึกเท่ากับบริเวณปลอดพาหะที่ขยายออกไปเมื่อมีการไปอัสให้กับตัวตรวจวัดแสงจึงเลือกที่จะ ทำการศึกษาหาอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ต่างๆ ถึงแม้ว่า สารละลาย TMAH นั้นจะกัดอะลูมิเนียมที่มากจึงทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อป้องกันไม่ให้ สารละลาย TMAH กัดขั้วโลหะอะลูมิเนียม

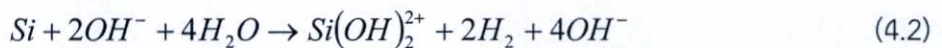
ในทางกายภาพการกัดแผ่นซิลิคอนทางไมโครเทคนิคเป็นอัตราการกัด (etch rate, r) ซึ่งเป็น อัตราส่วนของความหนาของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด (material thickness, h_{etch}) และ เวลาในการกัด (etching time, t_{etch}) [29] เป็นดังสมการที่ 4.1

$$r = h_{\text{etch}} / t_{\text{etch}} \quad (4.1)$$

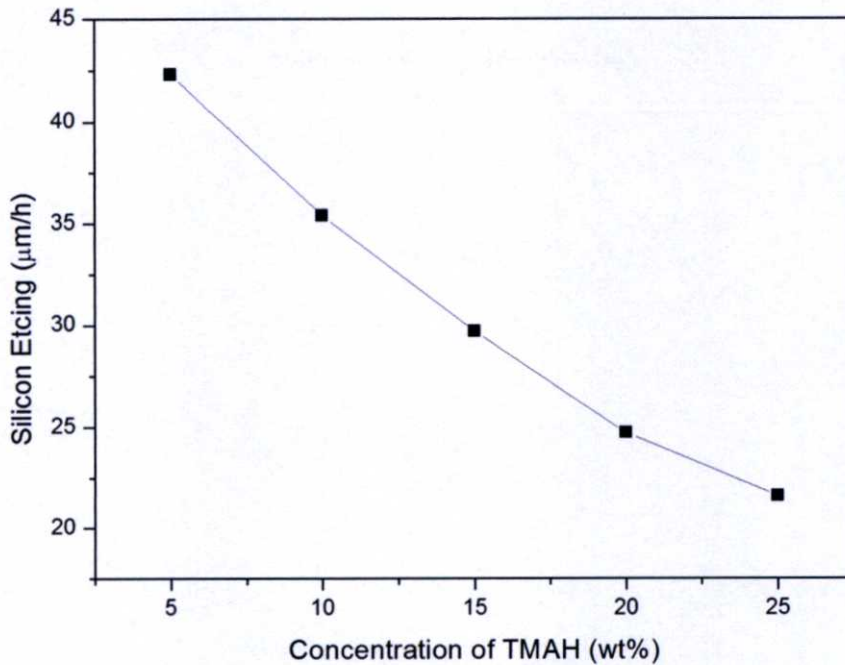
การศึกษาเกี่ยวกับอัตราการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH นั้น สามารถอธิบายได้เป็น 2 ส่วน คือ ส่วนแรกนั้นเป็นอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น ต่างๆ และส่วนที่สองเป็นอัตราการกัดของสารละลาย TMAH เมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน

4.2.1 อัตราการกัดของสารละลาย TMAH

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอัตราการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นซิลิคอนด้วย สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ เนื่องจากการจะลดความเข้มข้นของสารละลายนั้นจะต้องเติม น้ำในสารละลาย TMAH จึงทำให้มีการแตกตัวของน้ำเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไอออนไฮดรอกไซด์ (OH^-) เพิ่มขึ้นด้วย ไอออนไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิคอน ซึ่งจะทำให้อะตอมซิลิคอนหลุดออกมา รวมตัวกับไอออนไฮดรอกไซด์กลายเป็น $\text{Si}(\text{OH})_2^{+2}$ หรือ SiOH^3 (เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์) เมื่อ ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและถูกดึงออกสู่สารละลาย และกรด Orthosilic acid แตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นฟองก๊าซไฮโดรเจนซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ (4.2) ดังที่กล่าวเอาไว้ในบทที่ 2 สมการที่ (2.5)



การกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH และสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น $25 \text{ wt}\%$ นั้นจะมีอัตราการกัดน้อยกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้น $20 \text{ wt}\%$ ของสารละลายลงไป เนื่องจากมีไอออนไฮดรอกไซด์มากแต่ไอออนไฮดรอกไซด์นั้นจะไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ ที่เกิดจากการรวมตัวของไอออนไฮดรอกไซด์กับซิลิคอนที่หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน มากกว่าทำให้เกิดเป็นกรด Orthosilic acid ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น



รูปที่ 4.9 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนกับความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ตารางที่ 4.1 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH (wt%)	อัตราการกัดแผ่นซิลิคอน (µm/min)
5	0.70
10	0.59
15	0.49
20	0.41
25	0.36

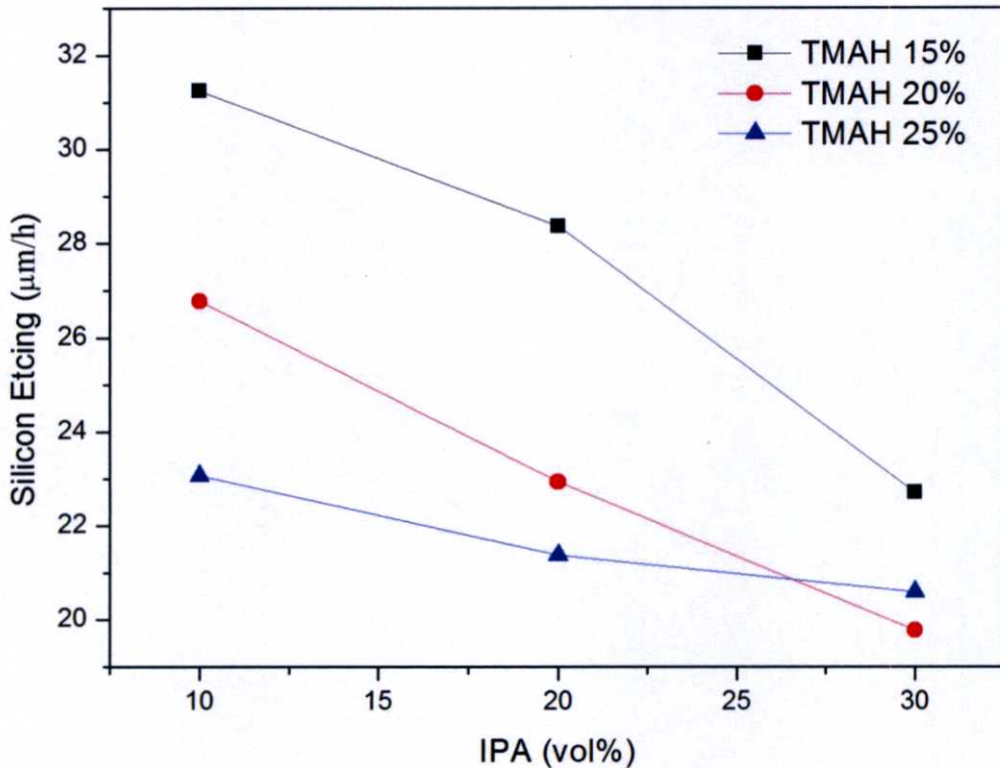
เมื่อเติมน้ำในสารละลายน้อยลง เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH มากขึ้น อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลายจะเริ่มน้อยลง เนื่องจากไอออนไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากแตกตัวของน้ำน้อยลงส่งผลกระทบต่อให้การกัดแผ่นซิลิคอนน้อยลง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.9 เป็นการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ และตารางที่ 4.1 แสดงอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ดังนั้นในการศึกษาอัตราการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลอง เพื่อหาค่าความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดจึงแสดงให้เห็นได้ชัดเจนดังตารางที่

4.1 ด้วยอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ จะมีอัตราการกัดที่เพิ่มขึ้น เมื่อเติมน้ำในสารละลายมากขึ้น เพื่อทำให้ความเข้มข้นของสารละลายลดลง

4.2.2 อัตราการกัดของสารละลาย TMAH ที่เติมสารลดแรงตึงผิว

ในหัวข้อนี้จะศึกษาเกี่ยวกับความลึกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นซิลิคอนเมื่อเติมสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน จากการศึกษาความลึกของแผ่นซิลิคอนด้วยการเติมน้ำในสารละลาย TMAH เพื่อลดความเข้มข้นของสารละลายลดลง ได้นำมาศึกษาต่อ ในการเติมสารลดแรงตึงผิวลงไปยังสารละลาย TMAH เพื่อเป็นการช่วยให้ผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนกับสารละลายดีขึ้นและลดการเกาะของฟองก๊าซไฮโดรเจนบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอน



รูปที่ 4.10 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ

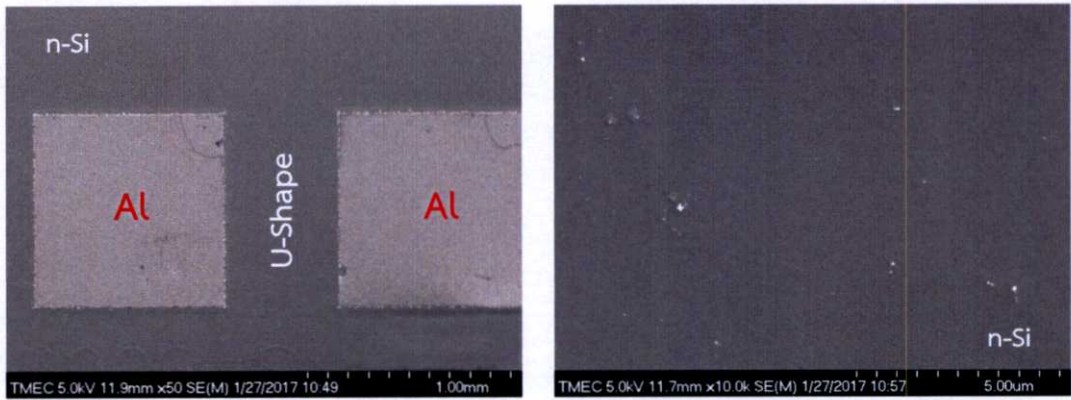
ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย TMAH โดยการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA ด้วยปริมาณที่เท่ากับ 10, 20 และ 30 vol% แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.10 การเติมสารลดแรงตึงผิว IPA ทำให้อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TMAH นั้นลดลง และตารางที่ 4.2 แสดงอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในสารละลาย TMAH ความเข้มข้นสารละลาย 15, 20 และ 25 wt% จะเห็นได้ว่าการเติมสารลดแรงตึงผิวที่มีปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนนั้นน้อยลง เนื่องจากการที่เติมสารลดแรงตึงผิวในสารละลาย TMAH ทำให้ปริมาณของสารละลายในระบบเพิ่มขึ้นซึ่งความเข้มข้นในระบบจะลดลงทำให้การแตกตัวของไอออนไฮดรอกไซด์ลดลงไป จึงส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดแผ่นซิลิคอนนั้นลดน้อยลงไปด้วย

ตารางที่ 4.2 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ

ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH (wt%)	ปริมาณสารลดแรงตึงผิว IPA (vol%)	อัตราการกัดแผ่นซิลิคอน ($\mu\text{m}/\text{min}$)
15	10	0.52
	20	0.47
	30	0.37
20	10	0.44
	20	0.38
	30	0.33
25	10	0.38
	20	0.35
	30	0.34

4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

ในงานหัวข้อนี้หลังจากได้ทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงจากแบบพลา-นาร์ เนื่องจากโครงสร้างแบบพลาแนร์นั้นมีบริเวณพื้นที่รับแสงจำกัดอยู่ที่บริเวณพื้นที่รับแสงหรือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น จึงได้มีแนวความคิดในการเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยการกัดเป็นร่องรูปตัวยูขึ้นในบริเวณของขั้วไฟฟ้า ซึ่งในหัวข้อนี้นั้นได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูหรือ UMSM ขึ้นโดยใช้กระบวนการกัดแบบเปียกในสารละลาย TMAH ซึ่งสารละลาย TMAH นี้มีคุณสมบัติในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก คือเป็นการกัดแบบกัดระนาบใดระนาบหนึ่งได้เร็วกว่าระนาบหนึ่ง โดยจะกัดระนาบ (100)>(111) โดยมีเงื่อนไขคือพื้นผิวที่ผ่านกระบวนการกัดนั้นจะต้องมีความเรียบให้ได้ใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์และมีความลึกตามที่ต้องการได้ โดยใช้เงื่อนไขในหัวข้อต่างๆ ดังที่ได้กล่าวมาแล้วนั้นสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM แสดงดังรูปที่ 4.11



(ก)

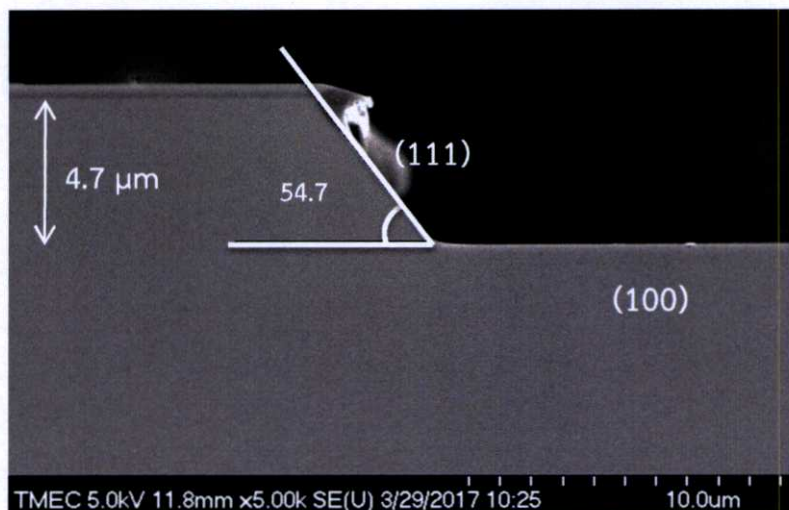
(ข)

รูปที่ 4.11 ภาพถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt%, เติมน้ำ IPA 30 vol%

(ก) ภาพถ่ายตัวตรวจวัดแสง UMSM กำลังขยาย 50 เท่า

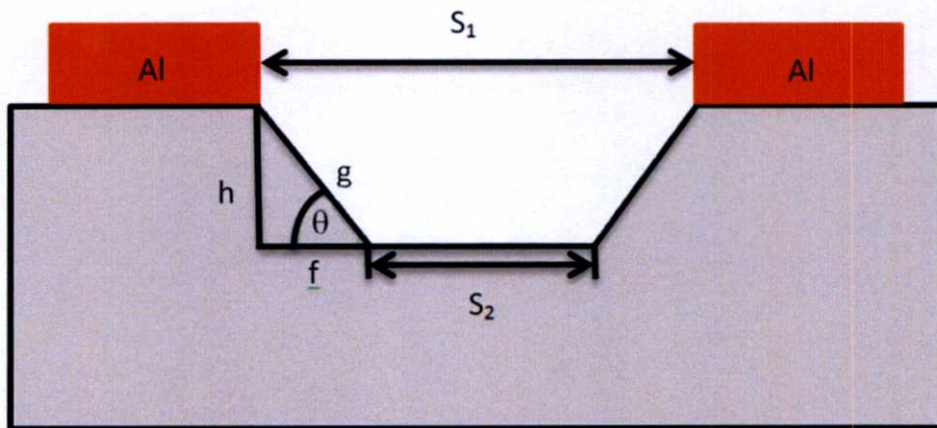
(ข) ภาพถ่ายพื้นผิวที่ก้นหลุมของตัวตรวจวัดแสง UMSM กำลังขยาย 10,000 เท่า

จากรูปที่ 4.11 (ก) แสดงถึงภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 50 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ได้ทำการสร้างขึ้นโดยใช้มาสก์แผ่นเดียวเป็นต้นแบบในการกัดร่องรูปตัวยูโดยใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt% ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% ผสมลงไปในการละลาย โดยใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวาดสาร 250 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการกัด 15 นาที รูปที่ 4.11 (ข) แสดงถึงภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 10,000 เท่า พบว่าบริเวณผิวของซิลิคอนมีลักษณะราบเรียบ ซึ่งภาพแสดงลักษณะร่องรูปตัวยูจะแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ภาคตัดขวางจากการถ่ายภาพด้วย SEM ที่มีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูที่กำลังขยาย 5,000 เท่า

จากรูปที่ 4.12 นั้นเป็นภาพตัดขวางที่เกิดจากการถ่าย SEM ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า พบว่าลักษณะการกัดแผ่นซิลิคอนมีลักษณะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งมีลักษณะการกัดทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าอีกทิศทางหนึ่ง จากรูปที่ 4.12 จะเห็นว่าแผ่นซิลิคอนที่ระนาบ (111) และ (100) นั้นถูกสารละลาย TMAH กัดออกไป โดยที่ระนาบ (100) จะถูกกัดออกไปมากที่สุด เนื่องจากอะตอมของซิลิคอนที่ถูกสารละลาย TMAH กัดจะมีอยู่สองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่อะตอมที่ผิวหน้าถูกดึงออกไปจะต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะด้วยกัน ส่วนแผ่นซิลิคอนที่ระนาบ (111) จะถูกสารละลาย TMAH กัดน้อยกว่า เนื่องจากในระนาบ (111) นั้นมีอะตอมสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า จึงทำให้เป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุดที่ทำให้เกิดพื้นที่ลาดเอียงขึ้น จากปฏิกิริยาดังกล่าวจึงทำให้เกิดเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู หรือ ลักษณะแบบ UMMSM ตามวัตถุประสงค์ จากรูปที่ 4.12 พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมีความลึก 4.7 μm จากการคำนวณพื้นที่ส่วนที่ราบเอียง (g) จาก $g=h/\sin\theta$ จะได้พื้นที่ราบเอียงเท่ากับ 5.7 μm ที่วัดได้จาก SEM ได้ 5.9 μm ในส่วนพื้นที่ด้าน f จาก $f=h/\tan\theta$ มีขนาด 3.3 μm ซึ่งที่วัดได้จาก SEM มีขนาด 3.4 μm ซึ่งค่า f และ g ที่คำนวณได้ถือว่ามีค่าใกล้เคียงกันมากกับค่าที่วัดได้จาก SEM แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ส่วนที่ราบเอียง (g) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 1.7 เท่าของด้าน f แสดงดังรูปที่ 4.13 ซึ่งได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 2 รูปที่ 2.11



รูปที่ 4.13 ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีขนาดของมุม 54.7°

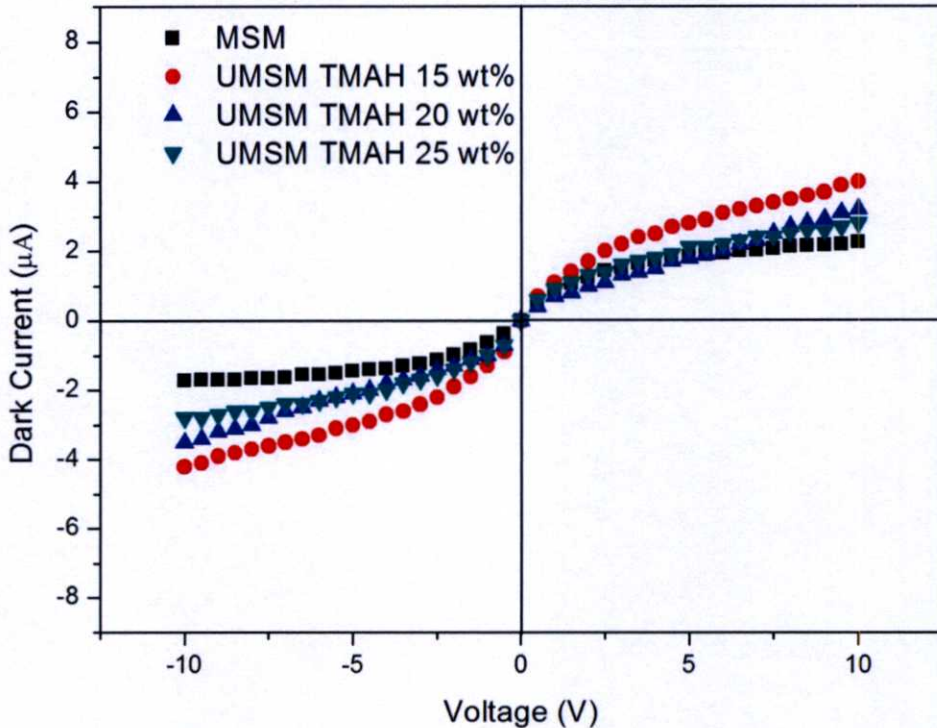
4.4 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

ในการทดลองในหัวข้อนี้คือการทดสอบการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูหรือ UMMSM ซึ่งผ่านกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH และตัวตรวจวัดแสงแบบพลาสมา แล้วนั้นในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบบนเพื่อหากระแสรั่วหรือกระแสมืดที่เกิดจากตัวตรวจวัดแสง UMMSM และในขณะที่มีความเข้มแสงตกกระทบบน โดยในส่วนของความเข้มแสงนั้นมีการทดสอบประสิทธิภาพทั้งในขณะที่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสกับความเข้มแสง เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการตรวจวัดแสงทั้งในขณะที่ความเข้มแสงน้อยและความเข้มแสงมาก โดยการวัดจากคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น คุณสมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) และ คุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V characteristics) เป็นต้น

4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบบน

ตัวตรวจวัดแสง UMMSM ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีขั้วโลหะที่สร้างจากโลหะชนิดเดียวกัน คือ อะลูมิเนียม (Al) ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงในภาวะสมดุล ตัวตรวจวัดแสง UMMSM นั้นจะมีความสูงของกำแพงศักย์ขั้วต่อตักขั้วของขั้วโลหะทางด้านแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วโลหะทางด้านแอโนด (ϕ_{bn2}) นั้นจะมีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วโลหะทางด้านแคโทด (V_{bi1}) และขั้วโลหะทางด้านแอโนด (V_{bi2}) จะมีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะของขั้วโลหะทางด้านแคโทด (W_{d1}) และขั้วโลหะทางด้านแอโนด (W_{d2}) นั้นจะมีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบบนแต่มีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยให้ขั้วโลหะด้านหนึ่งได้รับไบอัสตรง และขั้วโลหะอีกด้านได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้ จะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะเคลื่อนตัวข้ามกำแพงศักย์ขั้วต่อตักขั้วไปยังด้านของสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่ว หรือเรียกว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง มีทิศทางจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{sm}) ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดการเกิดกระแสมืดในตัวตรวจวัดแสงได้ คือกำแพงศักย์ขั้วต่อตักขั้ว ซึ่งทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนจากด้านโลหะเคลื่อนตัวข้ามไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้โดยง่าย ซึ่งค่าความสูงกำแพงศักย์ขั้วต่อตักขั้วนั้นสามารถกำหนดได้จาก ชนิดของขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงและสารกึ่งตัวนำที่นำมาสัมผัสกัน ลักษณะกระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่สร้างขึ้นนั้น ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และแบบร่องรูปตัวยูขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากรูปที่ 4.14 พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH มีค่ากระแสรั่วเพิ่มขึ้นจากเดิมเล็กน้อย เนื่องจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH นั้นจะเป็นกระบวนการกัดแบบเปียกโดยใช้สารเคมีในการกัด ซึ่งกระบวนการกัดแบบนี้จะมีความสกปรกมากกว่ากระบวนการกัดแบบแห้งที่ใช้ก๊าซในการกัด ซึ่งสารละลายที่ทำการกัดนั้นอาจทิ้งประจุตกค้างหลังการกัด โดยค่ากระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูนั้นจะทำการวัดอยู่ 3 เงื่อนไข คือ ตัวตรวจวัดแสง UMSM ที่ใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15, 20 และ 25 wt% โดย 3 ความเข้มข้นนั้นได้เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในปริมาณ 30 vol% ที่แรงดันไบอัส 10 V เท่ากับ 2.3 μA , 4.0 μA , 3.2 μA และ 2.8 μA ตามลำดับ

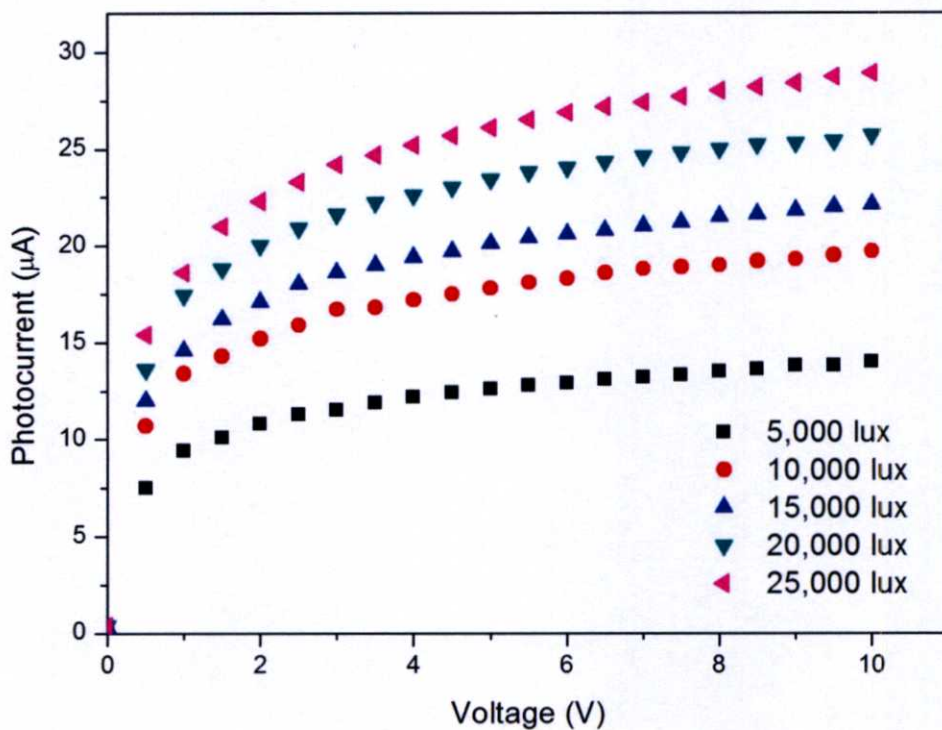
4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาคูสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงโดยมีการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในการทดสอบคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดัน เพื่อหาค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน (halogen lamp) ผลการทดสอบคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยทำการวัดที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000, 20,00 และ

25,000 lux ที่แรงดัน -10 ถึง 10 V แสดงดังรูปที่ 4.15 – 4.18 ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.15 – 4.18 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน โดยที่กระแสแสง (I_{photo}) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.3 คือ

$$I_{photo} = I_{mea} - I_{dark} \quad (4.3)$$

สำหรับกระแสแสง (I_{photo}) หาได้จากกระแสที่ได้จากการวัด (I_{Mea}) ลบด้วยกระแสมืด (I_{dark}) หรือกระแสรั่ว ตามสมการที่ (4.3) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงแบบฟลานาร์ ดังแสดงในรูปที่ 4.15

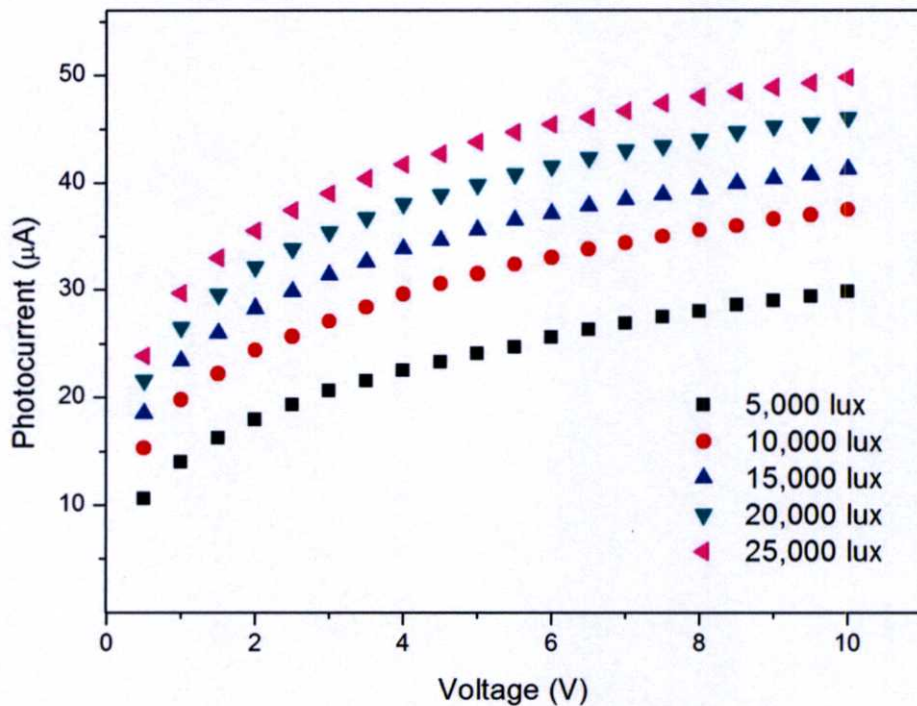


รูปที่ 4.15 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบฟลานาร์

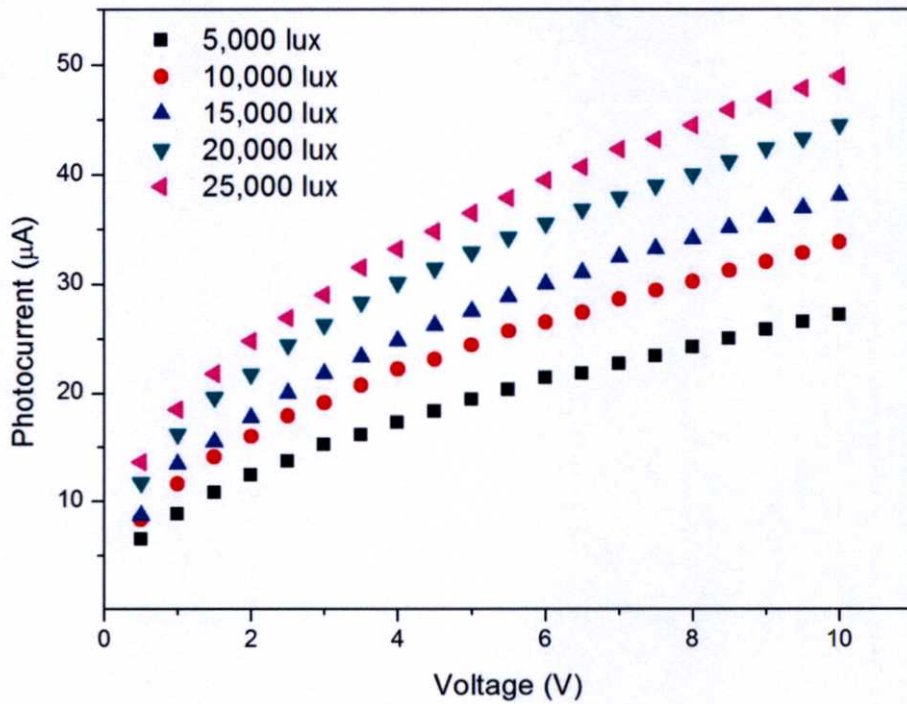
เมื่อผ่านกระบวนการกัดของสารละลาย TMAH โดยตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูนั้นจะทำการวัดอยู่ 3 เงื่อนไข คือ ตัวตรวจวัดแสง UMSM ที่ใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15, 20 และ 25 wt% โดย 3 ความเข้มข้นนั้นได้เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในปริมาณ 30 vol% ดังแสดงในรูปที่ 4.16 – 4.18 ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากระแสที่ความเข้มข้นค่าเดียวกัน เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลาย TMAH จะมีค่าเกือบเท่ากัน และกระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นอาจพิจารณาได้ว่าความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ไม่มีผลต่อกระแสแสงที่เกิดขึ้น แต่จะมีผลในการกระแสรั่วของตัวอุปกรณ์มากกว่า

จากรูปที่ 4.15 – 4.18 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถตอบสนองต่อแสงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มแสงที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสงที่เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย ดังนั้นจึงทำให้กระแสแสงที่วัดได้นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบบ โดยความเข้มแสง 5,000 lux, 10,000 lux, 15,000 lux, 20,000 lux และ 25,000 lux ที่แรงดันไบอัส 10 V จะมีค่ากระแสแสงอยู่ที่ประมาณ 28.9 μA , 49.8 μA , 49.0 μA และ 50.6 μA ตามลำดับ

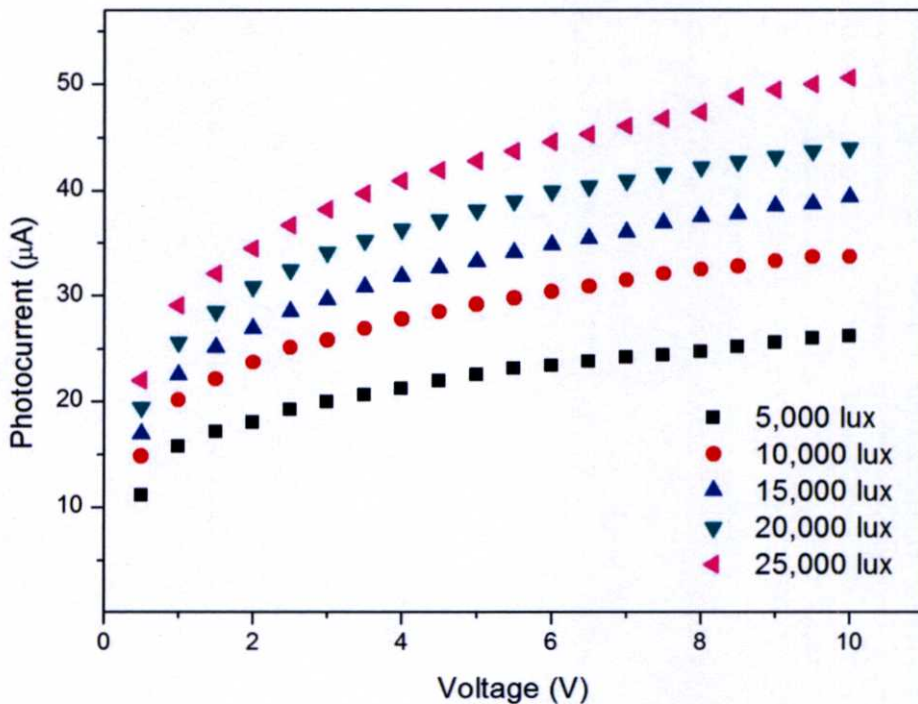
ผลการทดลองที่แสดงในรูปที่ 4.16 - 4.18 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดี และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ในเงื่อนไขการสร้างที่แตกต่างกัน ที่แรงดันไบอัส 10 V ดังแสดงในรูปที่ 4.19



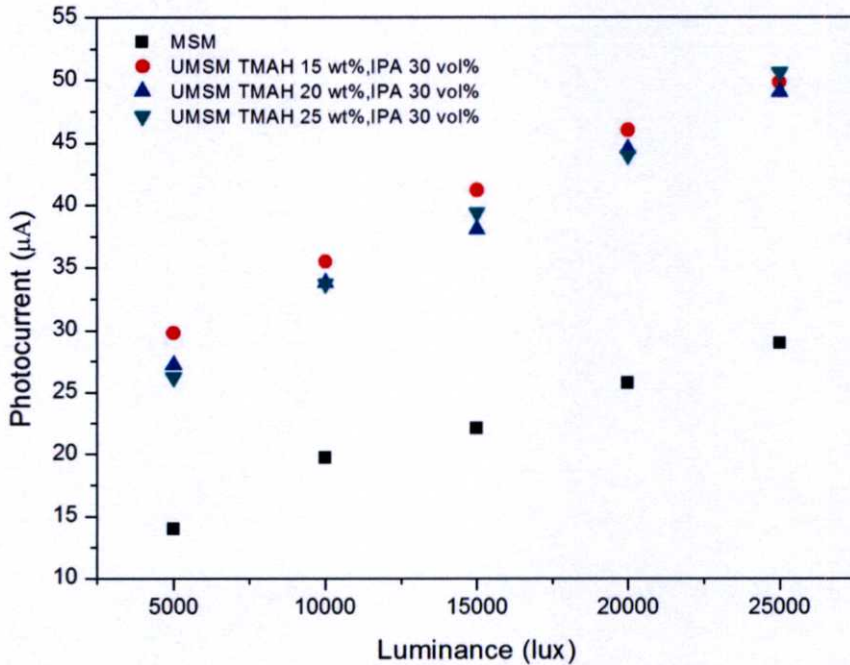
รูปที่ 4.16 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 15 wt%



รูปที่ 4.17 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 20 wt%



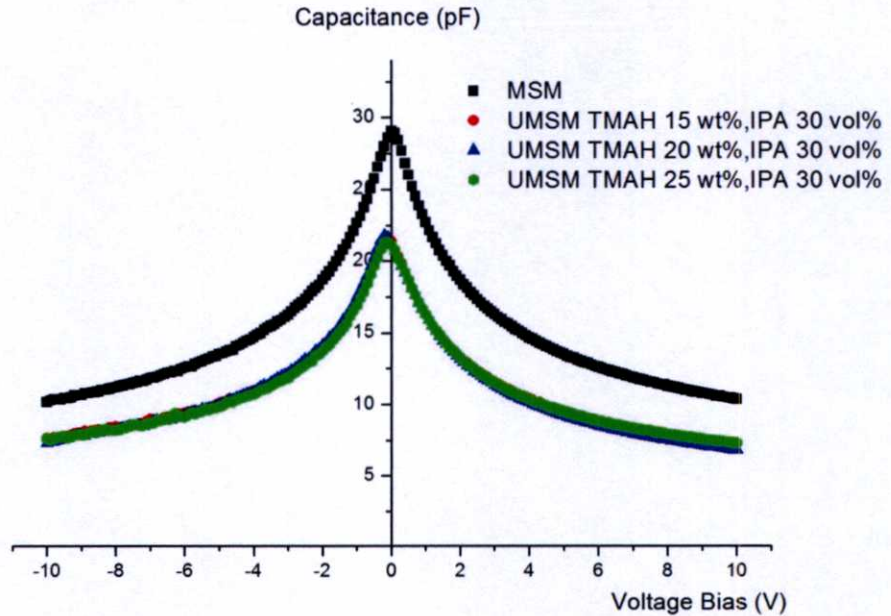
รูปที่ 4.18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25 wt%



รูปที่ 4.19 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงที่แรงดันไบอัส 10 V

4.4.3 ลักษณะคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

เมื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาสมาและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA ลงไปในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15, 20 และ 25 wt% โดย 3 ความเข้มข้นนั้นได้เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในปริมาณ 30 vol% แล้วทำการหาความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ขณะที่ไม่ได้แสงตกกระทบกับตัวตรวจวัดแสง คุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบพลาสมาและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยมีการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA ลงไปในสารละลาย TMAH เมื่อได้รับแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 V แสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่าโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยตัวเก็บประจุที่บริเวณรอยสัมผัสทั้งสองซึ่งเป็นบริเวณปลอดภัยต่อกันแบบอนุกรม ดังนั้นค่าความจุไฟฟ้าของโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ จะมีค่าความจุไฟฟ้าใกล้เคียงกันทั้งสองด้านไม่ว่าจะเป็นด้านที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ



รูปที่ 4.20 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

ซึ่งจากรูปที่ 4.20 พบว่าคุณสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ มีความสมมาตรกันซึ่งจะมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัสตั้งความสัมพันธ์ของสมการที่ (4.4) คือเมื่อแรงดันไบอัสมีค่าเพิ่มมากขึ้นจะทำให้มีค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลง โดยที่แรงดันไบอัส 10 V ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงมีค่าประมาณ 10.4, 7.2, 6.8 และ 7.3 pF ตามลำดับ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองด้านไม่ว่าจะเป็นด้านที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ และที่แรงดันไบอัส 0 V ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงมีค่าประมาณ 29.0, 21.4, 21.2 และ 21.1 pF ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าที่ความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีค่าลดลงเนื่องจากพื้นที่บริเวณปลอดพาหะรอบข้างของขั้วไฟฟ้าถูกกัดออกไป จึงส่งผลให้มีค่าความจุไฟฟาลดต่ำลงตามความลึกของตัวตรวจวัดแสง

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

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH และการทำให้ผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AV/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 3 ส่วนด้วยกัน คือ ในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเงื่อนไขในการกัดของสารละลาย TMAH และสารลดแรงตึงผิว IPA ในส่วนที่สองนั้นจะเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์ และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเงื่อนไขในการกัดของสารละลาย TMAH และสารลดแรงตึงผิว IPA เพื่อหาเงื่อนไขที่ทำให้ผิวของตัวตรวจวัดแสงนั้นมีพื้นที่ราบเรียบ โดยเงื่อนไขที่ทำการศึกษาพื้นผิวนั้นจะมี 4 ส่วน คือ ส่วนแรกนั้นจะเป็นส่วนของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5, 10, 15, 20 และ 25 wt% โดยเห็นว่าพื้นผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น ส่วนที่สองนั้นจะเป็นการศึกษาอุณหภูมิในการกัด โดยใช้ความเข้มข้น 10 และ 25 wt% ซึ่งมีความเร็วในการกัดที่แตกต่างกัน โดยใช้อุณหภูมิในการกัดอยู่ที่ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส จะเห็นว่าอุณหภูมิที่ลดลงจะทำให้พื้นผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบมากขึ้น ในส่วนที่สามจะเป็นความเร็วรอบในการกวนสาร โดยใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 10 wt% ใช้ความเร็วรอบในการกวนสารอยู่ที่ 150, 250, 350 และ 450 รอบต่อนาที โดยจะเห็นว่าความเร็วรอบที่เพิ่มขึ้นจะทำให้พื้นผิวที่ถูกกัดนั้นเรียบขึ้นแต่เมื่อถึงความเร็วรอบค่าหนึ่งจะทำให้ผิวที่ถูกกัดนั้นกลับมาขรุขระเพิ่มขึ้น ในส่วนสุดท้ายจะเป็นการใช้สารลดแรงตึงผิวเข้ามาช่วยทำให้ผิวซิลิคอนมีความเรียบขึ้นเมื่อมีการใช้สารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้นต่ำ ซึ่งจะทำให้การกัดโดยใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 10, 15 และ 20 wt% จากนั้นจึงทำการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA ที่ปริมาณ 10, 20 และ 30 vol% ในแต่ละความเข้มข้น ผลที่ได้นั้นจะสรุปได้ว่าที่สารลดแรงตึงผิว IPA ที่ปริมาณ 30 vol% ทำให้พื้นผิวที่ถูกกัดมีความราบเรียบมากที่สุดในสารละลายทุกๆ ความเข้มข้น

ในส่วนที่สองของงานวิจัยจะเป็นการศึกษาอัตราการกัดและลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในส่วนของอัตราการกัดนั้นจะเป็นการศึกษาเพื่อให้ทราบถึงความเร็วในการกัดของสารละลายที่นำมาใช้เพื่อให้ได้ความลึกให้ใกล้เคียงกับบริเวณปลดพาหะตามที่ต้องการ ส่วนต่อมาเป็นการยืนยันลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 15, 20 และ 25 wt% ที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ปริมาณ 30 vol% เพื่อให้ทราบว่าตัวตรวจวัดแสงที่ทำการสร้างมานั้นตรงตามเงื่อนไขที่ต้องการหรือไม่ด้วยการถ่ายภาพ SEM พื้นที่ทำการกัดนั้นมีความเรียบและมุมที่ได้มีค่าเท่ากับมุมของคุณสมบัติของสารละลาย TMAH

ในส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยการวัดคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบนนั้นเพื่อหาค่ากระแสรั่ว หรือกระแสมืด

ที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงมีค่ากระแสเท่ากับ 2.3 μA , 4.0 μA , 3.2 μA และ 2.8 μA ตามลำดับ ที่แรงดันไบอัส 10 V ซึ่งเป็นค่ากระแสมืดที่เพิ่มขึ้นสำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู อาจเกิดจากการผ่านกระบวนการกัดซึ่งคาดว่ามีความจุไอออนของสารละลายยังคงเหลืออยู่บนแผ่นซิลิคอน และการทดสอบคุณสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับความเข้มแสง 5,000 – 25,000 lux พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูสามารถตอบสนองแสงในช่วงดังกล่าวได้เป็นอย่างดี ค่ากระแสแสงเท่ากับ 28.9 μA , 49.8 μA , 49.0 μA และ 50.6 μA ตามลำดับ ที่แรงดันไบอัส 10 V และความเข้มแสงอยู่ที่ 25,000 lux ซึ่งค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์ 1.7 เท่า ซึ่งเกิดจากพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้น และความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีความสมมาตรกันไม่ว่าจะให้แรงดันไบอัสตรงหรือแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยที่แรงดันไบอัส 10 V ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงมีค่าประมาณ 10.4, 7.2, 6.8 และ 7.3 pF ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นมีความจุไฟฟ้าลดลง เนื่องจากพื้นที่บริเวณปลอดพาหะรอบข้างของขั้วไฟฟ้าถูกกัดออกไป จึงส่งผลให้มีความจุไฟฟ้าลดลงตามความลึกของตัวตรวจวัดแสง

เอกสารอ้างอิง

- [1] Cletus J. Kaiser, "The PN Junction Diode" [Online]. Available : http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_3.html
- [2] Joseph S. Braley, "Photo Detectors" [Online]. Available : http://www.ele.uri.edu/Courses/ele432/spring08/photo_detectors.pdf
- [3] Excelitas Technologies, "Avalanche photodiode" [Online]. Available : http://www.excelitas.com/downloads/app_avalanchephotodiodesusersguide.pdf
- [4] บุศรา นรารักษ์, "การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโพโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [5] ธเนศ โชะเหม, "การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548
- [6] งามจิต มงคลธนานนท์, "การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปด้วยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559
- [7] Li-Hong Laih, "A U-Grooved Metal-Semiconductor-Metal Photodetector (UMSM-PD) with an i-a-Si:H Overlayer on a [100] P-Type Si Wafer" IEEE, and Jyh-Wong Hong
- [8] Darling R.B. "Wet and Dry Etching" [Online]. Available : <http://www.mrsec.harvard.edu/education/ap298r2004/Erli%20chen%20Fabrication%20III%20-%20Etching.pdf>
- [9] ดร. ญัฐพันธ์ ศุภกา, "MEMS & NEMS" [Online]. Available : http://www.tpa.or.th/publisher/pdfFileDownloadS/tn227b_p37-42.pdf
- [10] Li-Hong Laih, "A U-Grooved Metal-Semiconductor-Metal Photodetector (UMSM-PD) with an i-a-Si:H Overlayer on a [100] P-Type Si Wafer" IEEE, and Jyh-Wong Hong
- [11] Ki-Wha Jun, Byung-Min Kim, Jung-Sik Kim, "Silicon etching characteristics for tetramethylammonium hydroxide-based solution with additives" Micro & Nano Letters, 2015, Vol. 10, Iss. 10, pp. 487-490 doi: 10.1049/mnl.2015.0161
- [12] Bo Cui. "Microfabrication and thin film technology" [Online]. Available : <http://ece.uwaterloo.ca/~bcui/>. 2015
- [13] ศรีเมฆ รัตน์ชัย, "เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิกอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง" วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [14] Avinash P. Nayak, Logeeswaran VJ and M. Saif Islam “Wet and Dry Etching” University of California, Davis. California
- [15] D. Xuefeng, “Microfabrication Using Bulk Wet Etching with TMAH” Master Degree Thesis of McGill University. 2005
- [16] Xiaoge Gregory Zhang “Electrochemistry of Silicon and Its Oxide” Cominco Ltd. Mississauga, Ontario, Canada and McMaster University Hamilton, Ontario, Canada
- [17] K. Biswas, S. Das., “Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for aluminum passivation and smooth surface” Microelectronics Journal 37 (2006) 321–327
- [18] J. LACONTE., “Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration” Intersema Sensoric SA, Bevaix, Switzerland
- [19] บุศรา นรารักษ์, “การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมแพลตตินัม”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [20] สุรดา เอื้อมานะพงษ์., “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si(pt-Doped)/Cr”, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2556
- [21] chemipan. “Surfactant” [Online]. Available : <https://content.chemipan.net/home/index.php/634-บทความ/666-บทความสารเคมี/484-สารลดแรงตึงผิว-surfactant.html>
- [22] Siman ltd. “Isopropyl alcohol” [Online]. Available : https://www.alibaba.com/product-detail/Isopropyl-alcohol-Supplier-Dealer-Providers-At_50017427122.html
- [23] Logsdon, John E. and Loke, Richard A. (December 4, 2000). "Isopropyl Alcohol". Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. John Wiley & Sons, Inc.
- [24] Sigma-Aldrich Pte Ltd. “เอกสารข้อมูลความปลอดภัย” [Online]. Available : <http://www.chemtrack.org/MSDSSG/Trf/msdst/msdst67-63-0.html>
- [25] ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์, “การวิเคราะห์ข้อมูล” [Online]. Available : digi.library.tu.ac.th/thesis/it/0119/11CHAPTER_4.pdf
- [26] ผศ.ปรียา อุนพงษ์องอาจ, “กล้องจุลทรรศน์ (Microscope)” [Online]. Available : http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_29.htm
- [27] Kosaka Laboratory Ltd, “Profilometer” [Online]. Available : <http://www.dent.psu.ac.th/unit/ddm/images/stories/profilometer.pdf>

เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [28] Nano technology., “**Scanning Electron Microscope : SEM**”, [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [29] Chog Barugkin, Thomas Allen, “**Light trapping efficiency comparison of Si solar cell textures using spectral photoluminescence**”, Optics Express Vol. 23, Issue 7, pp. A391-A400 (2015)
- [30] mcmurry castellion, “**fundamentals of general organic and biological chemistry**”, [Online]. Available : <http://wps.prenhall.com/wps/media/objects/376/385232/Media-Portfolio/index.html>
- [31] Nissa Garcia, “**What is Isopropyl Alcohol?**”, [Online]. Available : <http://study.com/academy/lesson/what-is-isopropyl-alcohol-uses-structure-formula.html>

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] วุฒิไกร คำอ่อน, ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, จีรวัดน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 508-511, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560

- [2] ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, วุฒิไกร คำอ่อน, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาการกัดผิวซิลิคอนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยเทคนิคการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลาย TMAH” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 556-559, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560



The 9th Conference of Electrical Engineering Network
of Rajamangala University of Technology

งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

EENET 2017

"การพัฒนานวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างยั่งยืน"

Sustainable Development of Innovation for Industry and Agriculture

2-4 May 2017, K.P. Grand Hotel Chanthaburi

Conference Topics

- Electrical Power (PW)
- Power Electronics (PE)
- Energy and Energy Saving (ES)
- Control Systems and Instrumentation (CT)
- Computer and Information Technology (CP)
- Electric Communication (CM)
- Electronics (EL)
- Digital Signal Processing (DS)
- Innovation and Invention (IN)
- General Electrical Engineering (GN)



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (ENNET 2017)

การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว U

Comparison of the electrical properties of the U-shaped photodetector

วุฒิ ไทรคำอ่อน¹ ทิพนพร อัครรัตน์² อีร์วิพันธ์ ปรามงคล³ สุรศักดิ์ นิยมเจริญ⁴

¹สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง kmrwsara@kmitl.ac.th

²ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) montree.saeenlamol@necetec.or.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการนำเสนอการเปรียบเทียบคุณสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว U โดยใช้สารละลายเอทเชอร์เมทริวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ผสมกับไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เพื่อใช้ลดแรงตึงผิวระหว่างแผ่นซิลิคอนกับสารละลายเพื่อให้ผิวที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบใกล้เคียงกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์ โดยใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω-cm โดยการวัดค่ากระแส-แรงดันนั้นจะแบ่งเป็นสองส่วน โดยส่วนแรกนั้นจะทำการวัดค่าของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบนเพื่อหากระแสรั่วและส่วนที่สองนั้นจะทำการวัดค่าของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงตกกระทบบนเพื่อหากระแส ซึ่งตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพลาแนร์มีกระแสรั่วและกระแสแสงอยู่ที่ 2.3 μA, 26.7 μA ตามลำดับ และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว U มีกระแสรั่วและกระแสแสงอยู่ที่ 8.9 μA, 46.1 μA ตามลำดับ

คำสำคัญ: ตัวตรวจวัดแสง, ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์, สารละลายเอทเชอร์เมทริวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

Abstract

This research has made presentations to compare current-voltage of planar photodetectors and U-shaped photodetectors by tetramethyl ammonium hydroxide(TMAH) solution mixed with isopropyl alcohol(IPA) to reduce the surfactant between the silicon and solution for the etched surface is smooth nearby with planar photo detectors. Using by n-type silicon resistant 5-10 Ω-cm. Measurement by the current-voltage is divided into two parts. The planar photodetectors with leakage current and photocurrent at 2.3 μA, 26.7 μA, respectively, The U-shaped photodetectors with leakage current and photocurrent at 8.9 μA, 46.1 μA respectively.

Keywords: Photodetector, Isopropyl alcohol, tetramethyl ammonium hydroxide solution

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีแนวโน้มการใช้ชีวิตอย่างสะดวกสบายมากขึ้นกว่าอดีตที่ผ่านมา ด้วยการพัฒนาประดิษฐ์คิดค้นสิ่งต่าง ๆ มากมายเพื่อใช้พัฒนาพื้นฐานความเป็นอยู่ให้ดียิ่งขึ้น ได้มีการสร้างอุปกรณ์หลากหลายขึ้นมาเพื่อเติมเต็มความต้องการ ซึ่งในอุปกรณ์เหล่านั้นประกอบไปด้วยวงจรต่างๆภายในตัวอุปกรณ์และทำหน้าที่แตกต่างกันไป ซึ่งภายในวงจรเหล่านั้นก็ประกอบไปด้วยสิ่งประดิษฐ์ตัวกึ่งตัวนำมากมายและหนึ่งในนั้นคือตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มแสงโดยสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า ตัวตรวจวัดแสงนั้นมีโครงสร้างหลายลักษณะซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ โครงสร้างแบบ MSM[1] เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในกลุ่มซีคกิตีไอไดโอด[2] มีโครงสร้างแบบพลาแนร์ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อนจนเกินไป[3] แต่โครงสร้างแบบพลาแนร์นั้นมีข้อจำกัดตรงที่พื้นที่รับแสงนั้นขึ้นอยู่กับขนาดของขั้วไฟฟ้า งานวิจัยนี้จึงทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงด้วยการกัดผิวของตัวตรวจวัดแสง โดยใช้สารละลายเอทเชอร์เมทริวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์(tetramethyl ammonium hydroxide, TMAH)[4] สารละลาย TMAH นั้นจะกัดแบบแอนไอโซทรอปิก(anisotropic etching) ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องรูปตัว U[5] และทำให้ผิวที่กัดมีความเรียบมากขึ้นด้วยการเติมสารลดแรงตึงผิว ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์(isopropyl alcohol, IPA)[6] จากนั้นจึงทำการศึกษาคูสมบัติกระแส-แรงดัน เพื่อเปรียบเทียบกับ โครงสร้างแบบพลาแนร์

2. กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในส่วนของการสร้างและการทดลองนั้นเราจะเริ่มจากการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω-cm จากนั้นสร้างขั้วโลหะที่ด้านหน้าแผ่นซิลิคอนหนา 2 μm สร้างชั้นป้องกันการกัดด้วยซิลิคอนไดออกไซด์(SiO₂) จากนั้นก็เข้าสู่กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายตัวตรวจวัดแสงและกัดชั้น

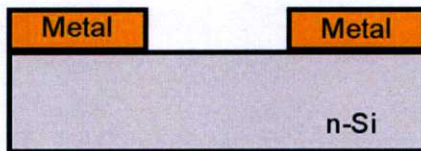
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

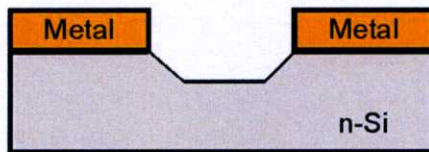
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (ENET 2017)

ที่ไม่ต้องการออกและเข้าสู่กระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH 25 wt%+IPA 30 vol% จึงได้ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

ในส่วนของการทดลองนั้นเมื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงเสร็จแล้ว จึงทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยทำการวัดกระแสแรงดันและวัดการตอบสนองทางแสง ทำการวัดโดยใช้หลอดฮาโลเจน ที่สามารถปรับความสว่างของแสงที่ตกกระทบบนตัวตรวจวัดแสงได้ ซึ่งบทความนี้ได้ใช้แสงตกกระทบบนในช่วง 5,000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux โดยทำการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง -10 ถึง 10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 V แล้วทำการวัดกระแสที่ได้จากการไบอัสในช่วงต่างๆ ด้วยเครื่อง KEITHLEY 2400 นอกจากนี้ยังทำการวัดตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบน โดยใช้หลักการจ่ายแรงดันแบบเดียวกับขณะได้รับแสงตกกระทบบนเพื่อหาค่าของกระแสที่เกิดขึ้นภายในตัวตรวจวัดแสง



(ก)



(ข)

รูปที่ 1 (ก) ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาเนียร์

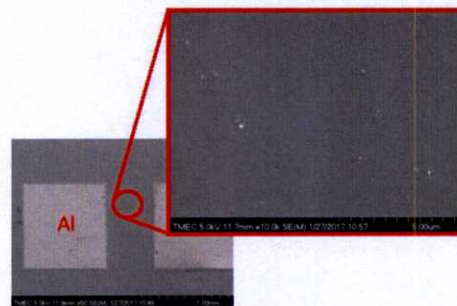
(ข) ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

3. ผลการทดลอง

ผลการทดลองของตัวตรวจวัดแสงบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 Ω-cm ความหนา 625 μm โดยมีเงื่อนไข คือการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาเนียร์(MSM) และสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู(U-MSM) เพื่อพิจารณาคุณสมบัติกระแส-แรงดัน มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองดังต่อไปนี้

เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงที่ได้ทำการสร้างขึ้นมานั้นมีส่วนประกอบพื้นฐานมาจากรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำที่เกิดจากการสัมผัสกัน

ของซิลเวอร์อะลูมิเนียม (Aluminum ; Al) และสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ตามกระบวนการสร้างที่ได้กล่าวถึงไปแล้วนั้นเราจะทำการตรวจสอบว่าตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดมาแล้วนั้นพื้นผิวที่กัดมีความเรียบมากน้อยเพียงใด ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ดังแสดงในรูปที่ 2 โดยมีสองส่วน ในส่วนแรกนั้นมีกำลังขยายอยู่ที่ 50 เท่า โดยจะแสดงให้เห็นภาพรวมของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูหนึ่งตัวจากทั้งหมดและในส่วนที่สองนั้นจะแสดงพื้นผิวที่ถูกกัดด้วยสารละลายที่กัดลงขยาย 10,000 เท่า จะเห็นได้ว่ามีขนาดของพิระมิดจำนวนเล็กน้อย มีขนาดประมาณ 140 nm ถือได้ว่ามีขนาดเล็กและเรียบพอที่จะนำไปเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาเนียร์



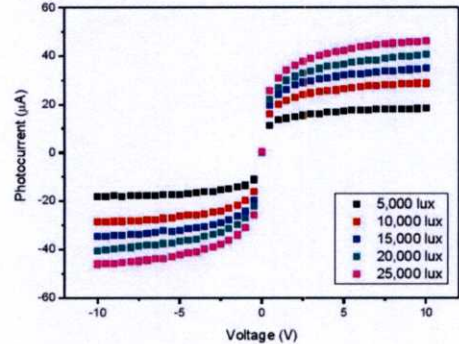
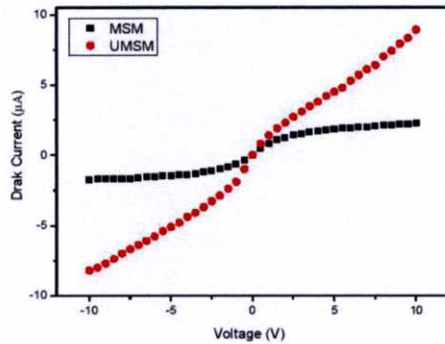
รูปที่ 2 ภาพ SEM ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

ซึ่งในการทดลองนี้จะทำการทดสอบหาค่ากระแสรั่วและกระแสแสง โดยการจ่ายแรงดันไบอัสตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V จากการทดลองคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงทั้งสอง โครงสร้าง ในขณะตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบบนแต่มีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยให้ซิลเวอร์ด้านหนึ่งได้รับแรงดันไบอัสตรงและซิลเวอร์อีกด้านได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับซึ่งซิลเวอร์ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้จะส่งผลให้เกิดการขยายของบริเวณปลดปล่อย ทำให้อิเล็กตรอนมีการเคลื่อนที่จากทางด้านของซิลเวอร์ข้ามกำแพงศักย์ช็อคครีทไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแสรั่วหรือเรียกว่ากระแสแถมของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งจากรูปที่ 3 พบว่าตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นมีค่ากระแสรั่วมากกว่าตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาเนียร์ เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในกระบวนการกัดจึงทำให้มีประจุจากสารเคมีตกค้างได้ และที่แรงดันไบอัส 10 V ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาเนียร์กับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูจะมีค่าความไวที่ 1

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)



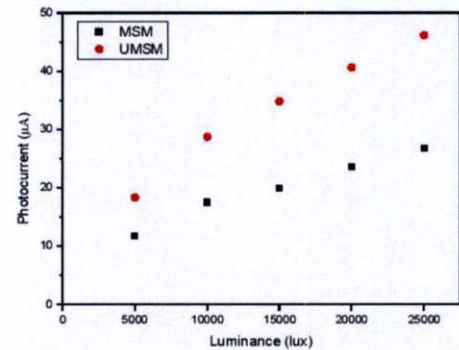
EL

รูปที่ 3 ลักษณะ สมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างสองรอยต่อสัมผัสชนิดกึ่งยวดยิ่งที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

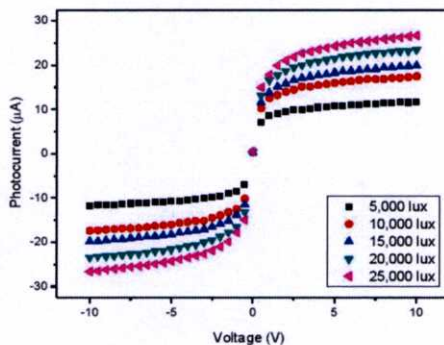
รูปที่ 5 คุณสมบัตินกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

จากนั้นทำการทดลองการตอบสนองทางแสง โดยการจ่ายแรงดันไบอัสตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V และฉายแสงที่มีความเข้มแสงที่แตกต่างกัน ตั้งแต่ 5,000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux ลงบนตัวตรวจวัดแสง โดยลักษณะกระแสแสงที่ได้ นั้นมีความสมมาตรกันไม่ว่าเราเน้นจ่ายแรงดันไบอัสตรงหรือ ไบอัสย้อนกลับ

จากรูปที่ 4-5 เป็นภาพความสัมพันธ์ระหว่างกระแส-แรงดัน จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถตอบสนองทางแสงได้เป็นอย่างดี แต่พบว่าตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นค่ากระแสที่ได้มีค่ามากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์ เนื่องจากมีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงที่แรงดันไบอัส 10 V



รูปที่ 4 คุณสมบัตินกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์

และความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงต่อความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนในเงื่อนไขการสร้างที่แตกต่างกัน ที่แรงดันไบอัส 10 V ดังแสดงในรูปที่ 6 โดยค่ากระแสที่แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับความเข้มแสงที่ 25,000 lux ดังแสดงในตารางที่ 1

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

ตารางที่ 1 ค่ากระแสที่แรงดันไบอัส 10 V ขณะ ได้รับความเข้มแสง 25,000 lux และค่ากระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสง

เงื่อนไขการสร้าง	กระแสรั่ว (μ A)	กระแสแสง (μ A)
ตัวตรวจวัดแสงแบบพลาแนร์	2.3	26.7
ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู	8.9	46.1

3. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาค่าของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู คอคุณสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงจะไม่ได้รับแสงตกกระทบนั้น ค่ากระแสรั่วหรือกระแสรั่วที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู มีค่ากระแสรั่วเพิ่มขึ้นเป็น 3.9 เท่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์ โดยค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู เท่ากับ 2.3 และ 8.9 μ A ตามลำดับ ในลำดับต่อไปคือตัวตรวจวัดแสงขณะ ได้รับความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000, 20,000 และ 25,000 lux พบว่าตัวตรวจวัดแสงสามารถตอบสนองแสงในช่วงดังกล่าวได้เป็นอย่างดีและพบว่าตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่ความเข้มแสง 25,000 lux มีค่ากระแสแสงเป็น 1.7 เท่าเมื่อเทียบกับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์ โดยค่ากระแสที่แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบพลาแนร์และตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูเท่ากับ 26.7 และ 46.1 μ A ตามลำดับ

4. ถัดกิจกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังและศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ช่วยเหลือในด้านเทคโนโลยีการสร้างและอุปกรณ์วัดชิ้นงาน ขอขอบคุณอาจารย์รวมถึงนักศึกษาปีที่ 3 ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2558.
- [2] สมเกียรติ ศุกเกษ, "เซมิคอนดักเตอร์ที่ไวซ์", คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2551.
- [3] ธนesh โชะเหม, "การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al_{0.5}-Si/Al แบบพลาแนร์", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548.
- [4] งามจิต มงคลขนานนท์, "การศึกษารกิดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสภาวะละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
- [5] Li-Hong Loh, "A U-Grooved Metal-Semiconductor-Metal Photodetector (UMSM-PD) with an i-a-Si:H Overlayer on a [100] P-Type Si Wafer" IEEE, and Jyh-Wong Hong
- [6] Ki-Wha Jun, Byung-Min Kim, Jung-Sik Kim, "Silicon etching characteristics for tetramethylammonium hydroxide-based solution with additives", Micro & Nano Letters, 2015, Vol. 10, Iss. 10, pp. 487-490

EL

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

การศึกษาการกัดผิวซิลิคอนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วย

โดยเทคนิคการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลาย TMAH

Study of etching silicon for use in fabrication UMSM photodetector

By Adding IPA technique in TMAH solution

กัญฉพร จันทร์เพ็ญ, วุฒิไกร คำอ่อน, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และสุรศักดิ์ นิยมเจริญ

ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 E-mail: knsuras@kmitl.ac.th

DL

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการกัดแผ่นซิลิคอนโดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) สำหรับใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปด้วย และทำการศึกษาด้านเทคนิคเพื่อลดความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด โดยทำการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) ซึ่งใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นป้องกันการกัด เพื่อตรวจสอบสภาพของผิวซิลิคอนที่ถูกกัดไปด้วยกล้องไมโครสโคปที่ค่าแสงขยายค่าต่างๆ พบว่าพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยสารละลาย TMAH เมื่อไม่มีการเติม IPA ลักษณะพื้นผิวค่อนข้างขรุขระ และเมื่อทำการเติม IPA เท่ากับ 10%, 20% และ 30% จะส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีลักษณะเรียบขึ้น

คำสำคัญ : ตัวตรวจวัดแสง, เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์, ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

Abstract

This study is presented silicon etching by tetra methyl ammonium hydroxide (TMAH) solution for the fabrication of photodetectors U-shaped structure. Technical studies to reduce the surface roughness of the silicon by the addition of isopropyl alcohol (IPA). Using n-type silicon wafers these have resistivity as 5-10 ohm-cm by using SiO₂ was protect layer for anti-etching. Study morphology of etched silicon surface by Microscope at each of magnification values found that the surface of the silicon is etched by TMAH solution without the addition of IPA surface is quite rough when you add IPA was 10%, 20% and 30% will result in a smoother surface of the silicon.

Keywords : Photodetector, TMAH, IPA

1. บทนำ

ในปัจจุบันสารกึ่งตัวนำอิเล็กทรอนิกส์มีความสำคัญอย่างมากในการดำเนินชีวิตของมนุษย์ ซึ่งสิ่งประดิษฐ์เหล่านี้มีความสามารถทั้งการทำงานที่รวดเร็ว การประหยัดพลังงานและการทำงานที่แม่นยำ ซึ่งมีผลมาจากความต้องการที่จะพัฒนาในรูปแบบวงจร เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงและหนึ่งในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่จะนำมาใช้งานวิจัยนี้คือ ตัวตรวจวัดแสง (photodetector)

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มของแสง โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยพาหะอิสระ ทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น โดยตัวตรวจวัดแสงที่ทำการศึกษานี้ในงานวิจัยนี้มีโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal: MSM) เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มซีดอคคีย์ไวด์ โดยมียุคประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสซีดอคคีย์ 2 รอยสัมผัส โดยมีคุณสมบัติเด่น คือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาเนอร์ กระบวนการสร้างที่ง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM [1]

จากงานวิจัยที่ผ่านมานั้นตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบเชิงราบหรือแบบพลาเนอร์เป็นโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อนจนเกินไป [2] แต่ในโครงสร้างแบบเชิงราบนั้นจะมีพื้นที่รับแสงที่ขึ้นอยู่กับขนาดของขั้วไฟฟ้าทั้งสองข้างเท่านั้นและในงานวิจัยที่ทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง โดยในงานวิจัยนี้จะทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยใช้วิธีของกระบวนการกัด (etching) พื้นผิวของพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง

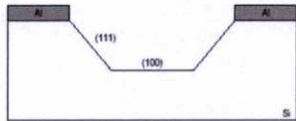
2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560 โรงแรม เคที การ์ด จันทบุรี อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

โดยใช้สารละลายเตรเมอร์เมซิลแอม โมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethyl ammonium hydroxide, TMAH) [3] การกัดโดยสารละลาย TMAH จะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องรูปตัว U [4] การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเป็นการกัดเลือกระนาบและทิศทางในการกัดซิลิคอน ซึ่งอัตราการกัดของ TMAH ในหลักซิลิคอนระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ $(110) > (100) > (111)$ และมีการเพิ่มเทคนิคการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (IPA) เพื่อลดความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดให้ดียิ่งขึ้น



รูปที่ 1 ตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM แบบ U-Shape

2. กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในส่วนของการสร้างและการทดลองที่จะนำไปใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัว U โดยการสร้างขึ้นของซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นชั้นป้องกันในการกัดของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 กระบวนการสร้าง

เริ่มจากการนำแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีสภาพด้านหน้าไฟฟ้า 5-10 โอห์ม-ซมติเมตร ผ่านกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน โดยต้องทำความสะอาดถึงตกปรกที่ติดมากับแผ่น ถ้าแผ่นไม่สะอาดอาจส่งผลต่อคุณสมบัติของอุปกรณ์ที่จะสร้างขึ้นและเป็นขั้นตอนแรกของการกระบวนการสร้างทั้งหมด จากนั้นเป็นการสร้างขึ้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อใช้สำหรับหน้าที่สำคัญในกระบวนการสร้างซึ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำเพื่อเป็นส่วนปกคลุมผิวของซิลิคอนป้องกันสิ่งเจือปนจากภายนอกที่ไม่ต้องการไม่ให้ไปทำปฏิกิริยากับผิวซิลิคอน (passivation layer) เป็นหน้าที่ปกป้องการแพร่สารเจือเข้าไปในส่วนที่ไม่ต้องการ และใช้เป็นส่วนที่เรียกว่าเกตออกไซด์ซึ่งเป็นส่วนที่มีความสำคัญอย่างมากในอุปกรณ์ประเภทมอสเฟต เนื่องจากเป็นส่วนที่เหนี่ยวนำให้เกิดช่องทางเดินกระแส ขั้นตอนต่อไปจะเป็นกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเป็นการสร้างลวดลายของชิ้นงาน โดยผ่านกระบวนการใช้แม่พิมพ์ (photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็นฟิล์มที่มีลวดลายที่ได้ออกแบบเสร็จเรียบร้อยแล้วเมื่อลอกน้ำยาไวแสงออกจะปรากฏลวดลายตามที่ได้ออกแบบไว้ และขั้นตอนสุดท้ายจะเป็นกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน

ในกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน ใช้สารละลาย TMAH ในการกัดและอัตราส่วน TMAH : H₂O เท่ากับ 1 : 2 [3] และมีการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ดังนี้ ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH เท่ากับ 5,10,15,20 และ 25 หน้ค่าลำดับ ปริมาตรของ IPA เท่ากับ 10,20 และ 30 vol% ค่าลำดับ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส และเครื่องกวาดสารละลายหมุนด้วยความเร็วรอบเท่ากับ 250 รอบต่อนาที

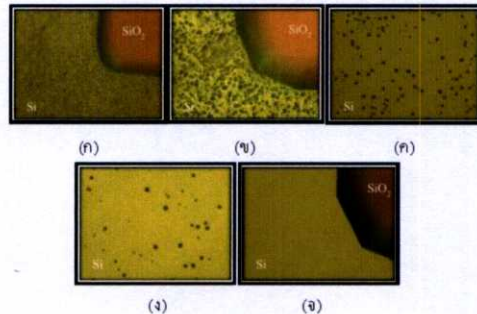
2.2 การทดลอง

การทดสอบลักษณะ สมบัติทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างโดยกล้อง Microscope ยี่ห้อ OLYMPUS และ เครื่อง TENCOR P-10 SURFACE PROFILOMETER

3. ผลการทดลอง

3.1 ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่กัดโดยสารละลาย TMAH เมื่อไม่มีการเติม IPA

จากการศึกษาลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอน หลังผ่านกระบวนการกัดแล้ว โดยใช้สารละลาย TMAH : H₂O ในอัตราส่วน 1:2 เมื่อทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอน จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า ดังรูปที่ 2 พบว่าพื้นผิวของซิลิคอนจะมีลักษณะของเนินพีระมิดเกิดขึ้นซึ่งอาจเนื่องมาจากปริมาณฟองแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัด ซึ่งเป็นปฏิกิริยารีดักชันของการแตกตัวของน้ำ [5] เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย TMAH เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวมีขรุขระน้อยลง และพื้นผิวของซิลิคอนจะมีความเรียบปราศจากเนินของพีระมิดเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH เท่ากับ 25 หน้ค่า



รูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า ที่กัดโดยสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น (ก) 5 หน้ค่า (ข) 10 หน้ค่า (ค) 15 หน้ค่า (ง) 20 หน้ค่า (จ) 25 หน้ค่า



บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

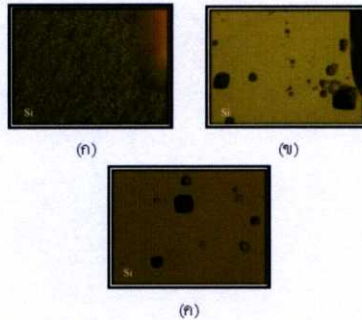
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

3.2 ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่กัดโดยสารละลาย TMAH เมื่อไม่มีการเติม IPA

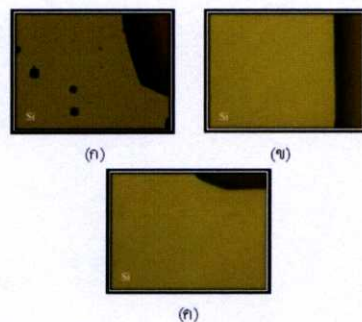
จากรูปที่ 2 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า พบว่าพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่กัดโดยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 wt%, 15wt% และ 20 wt% เกิดพีระมิดแบบตุ่มที่กระจายตัวกัน จึงเป็นเหตุผลที่ในงานวิจัยนี้ นำเอาเงื่อนไขของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นเท่ากับ 10 wt%, 15wt% และ 20 wt% มาดำเนินการ โดยการเติม IPA เท่ากับ 10 vol% , 20 vol% และ 30 vol% ต่อไป

โดยลักษณะ พื้นผิวของซิลิคอนที่กัด โดยสารละลาย TMAH 10 wt% + IPA 10,20,30 vol% , TMAH 15 wt% + IPA 10,20,30 vol% และ TMAH 20 wt% + IPA 10,20,30 vol% แสดงดังรูปที่ 3,4 และ 5 ตามลำดับ

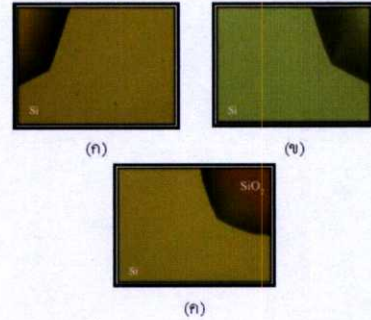
EL



รูปที่ 3 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า ที่กัด โดยสารละลาย TMAH 10 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol% (ข) 20 vol% (ค) 30 vol%



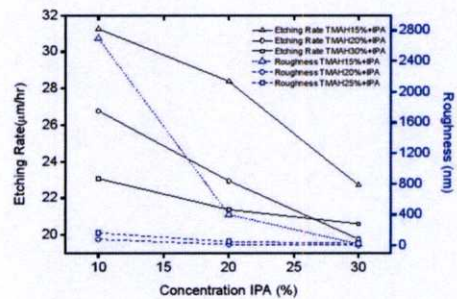
รูปที่ 4 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า ที่กัด โดยสารละลาย TMAH 15 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol% (ข) 20 vol% (ค) 30 vol%



รูปที่ 5 ลักษณะพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ได้จากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า ที่กัด โดยสารละลาย TMAH 20 wt% ที่เติม IPA (ก) 10 vol% (ข) 20 vol% (ค) 30 vol%

จากรูปที่ 3,4 และ 5 พบว่าเมื่อมีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ ในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนมีความขรุขระ น้อยลงอย่างเห็นได้ชัดซึ่งผลของการเติม IPA ทำให้แรงดึงผิวของสารละลายลดลงจึงทำให้ฟองแก๊สไฮโดรเจนขนาดใหญ่ออกไปได้ง่ายจึงทำให้การกัดผิวของซิลิคอนเรียบมากกว่าการกัดโดยสารละลาย TMAH เมื่อไม่มีการเติม IPA [6]

อัตราการกัดของสารละลาย TMAH โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่ 15%wt, 20%wt, 25%wt และทำการเติม IPA 10,20,30 vol% ในทุกเงื่อนไขและทำการกัดผิวซิลิคอนเป็นเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ IPA มากขึ้นทำให้อัตราการกัดลดลงซึ่ง IPA เป็นสารช่วยลดแรงดึงผิวของสารละลายจึงอาจจะส่งผลทำให้อัตราการกัดผิวของซิลิคอนลดลงไปด้วย ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กราฟแสดงอัตราการกัดและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่กัดโดยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 15,20,25 wt% และเติม IPA 10,20,30 vol%

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

4. สรุป

จากการศึกษากระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนโดยใช้สารละลายเตตระเอทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) สำหรับใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู และทำการศึกษาด้านเทคนิคเพื่อลดความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด โดยทำการเติม ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) พบว่าลักษณะผิวซิลิคอนที่กัดโดยสารละลาย TMAH เมื่อไม่มีการเติม IPA จะมีความขรุขระน้อยที่สุดเมื่อความเข้มข้นของสารละลาย TMAH เท่ากับ 25wt% และเมื่อเพิ่มเทคนิคการเติม IPA เข้าไปซึ่ง IPA จะทำให้แรงดึงผิวของสารละลายลดลงจึงทำให้ฟองแก๊สไฮโดรเจนขนาดใหญ่หลุดออกไปได้ง่ายจึงทำให้การกัดผิวของซิลิคอนเรียบมากกว่าการกัดโดยสารละลาย TMAH เมื่อไม่มีการเติม IPA อย่างไรก็ดีตามเมื่อทำการเติม IPA เข้าไป จะส่งผลต่ออัตราการกัด ซึ่งทำให้อัตราการกัดของซิลิคอนช้าลงเช่นกัน

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ต้องขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และสุดท้ายขอขอบคุณอาจารย์และทีมงานวิจัยทุกท่าน

เอกสารอ้างอิง

- [1] บุศรา นรารักษ์, "การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [2] บุศรา นรารักษ์, "การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [3] งามจิต มงคลธนานันต์, "การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559
- [4] Li-Hong Laih, "A U-Grooved Metal-Semiconductor-Metal Photodetector (UMSM-PD) with an i-a-Si-H Overlayer on a [100]P-Type Si Wafer" IEEE, and Jyh-Wong Hong
- [5] กิตติศักดิ์ อมรสุรินทร์วงศ์ ดร.พิชญ์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ "ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีผิวเคลือบพีระมิด" การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6
- [6] Irean Zubei, Malgorzata Krankowska, The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (100) Si surface etched in KOH and TMAH solutions

EL

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายวุฒิไกร คำอ่อน
วัน เดือน ปีเกิด	12 พฤษภาคม 2534
ที่อยู่	86 ม.1 ตำบลนากลาง อำเภอนากลาง จังหวัดหนองบัวลำภู 39170
ประวัติการศึกษา	2556 วิทยาศาสตร์ สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] วุฒิไกร คำอ่อน, ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, จีรวัดน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 508-511, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560
- [2] ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, วุฒิไกร คำอ่อน, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาการกัดผิวซิลิคอนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยเทคนิคการเติมไอโซโทปฟอสฟอรัสลงในสารละลาย TMAH” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 556-559, 2-4 พฤษภาคม พ.ศ. 2560