

การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH  
สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM

STUDY ON CRYSTALLINE SILICON ETCHING U-SHAPE BY TMAH  
SOLUTION FOR FABRICATION UMSM PHOTODETECTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาคตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-043-085

การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH  
สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM

STUDY ON CRYSTALLINE SILICON ETCHING U-SHAPE BY TMAH  
SOLUTION FOR FABRICATION UMSM PHOTODETECTOR



งามจิต มงคลธนานนท์  
NGARMJIT MONGKONTHANANONT

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ.2559  
KMITL-2016-EN-M-043-085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

STUDY ON CRYSTALLINE SILICON ETCHING U-SHAPE BY TMAH  
SOLUTION FOR FABRICATION UMSM PHOTODETECTOR



NGARMJIT MONGKONTHANANONT

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  
2016  
KMITL-2016-EN-M-043-085

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2016

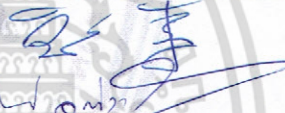
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

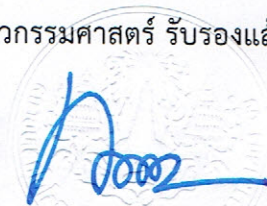
หัวข้อวิทยานิพนธ์ การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH สำหรับตัวตรวจจับแสงแบบ UMSM  
Thesis Title Study on Crystalline Silicon Etching U-shape by TMAH Solution for Fabrication UMSM Photodetector  
นักศึกษา นางสาวงามจิต มงคลนานนท์  
รหัสประจำตัว 57601188  
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ  
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-043-085

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	จิตรุ่งเรือง	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
ผศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559 เวลา 09.00-11.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
โดยไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 7 กรกฎาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปด้วยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM
นักศึกษา	นางสาวงามจิต มงคลธนานนท์
รหัสนักศึกษา	57601188
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2559
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	ผศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) สำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นที่มีระนาบ (100) เวลาในการกัดเป็น 1, 3, 6 และ 9 นาที อุณหภูมิการกัดเท่ากับ  $80^{\circ}\text{C}$  และอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH เป็น 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 อัตราการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนที่มากที่สุดเท่ากับ  $0.59\ \mu\text{m}/\text{min}$  ด้วยอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH เป็น 1:2 แต่ตัวตรวจวัดแสงมีข้อผิดพลาดเป็นอลูมิเนียมอัตราส่วนผสมของสารละลายนี้ทำการกัดอลูมิเนียมมากกว่าซิลิคอนจึงเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH เพื่อลดอัตราการกัดอลูมิเนียมโดยจะมีปริมาณของผงซิลิคอนเป็น 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร อัตราส่วนผสมของสารละลายนั้นคือ สารละลาย TMAH เติมผงซิลิคอน 37.5 กรัมต่อลิตร จะมีอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนเท่ากับ  $0.07\ \mu\text{m}/\text{min}$  และมีอัตราการกัดอลูมิเนียมเท่ากับ  $0.03\ \mu\text{m}/\text{min}$  เป็นอัตราส่วนผสมของสารละลายที่เหมาะสมต่อการนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย อัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ต่างๆ จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป สารละลาย TMAH เติมผงซิลิคอนเท่ากับ 37.5 กรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 12.3 การศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย พบว่าการวัดลักษณะสมบัติกระแส - แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ตัวตรวจวัดแสงมีค่ากระแสเท่ากับ 2.3 mA ที่ 5 V และขณะได้รับความเข้มแสง 20,000 lux ตกกระทบ พบว่าตัวตรวจวัดแสงสามารถตอบสนองแสง ค่ากระแสเท่ากับ 4.7 mA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่ออ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	STUDY ON CRYSTALLINE SILICON ETCHING U-SHAPE BY TMAH SOLUTION FOR FABRICATION UMSM PHOTODETECTOR
<b>Student</b>	Miss Ngarmjit Mongkonthananont
<b>Student ID</b>	57601188
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2016
<b>Thesis Advisor</b>	Asst. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

## ABSTRACT

This study is presented crystalline silicon anisotropic etching by tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) solution for the fabrication of photodetectors U-shaped structure. The n-type crystalline silicon with the plane (100) was etched with in 1, 3, 6 and 9 minutes with 80°C temperature. And the mixed ratios of TMAH solution are 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 and 1:5. The highest etch rate of crystalline silicon is 0.59  $\mu\text{m}/\text{min}$  with 1:2 a mixing ratio of the TMAH solution. Because the photodetectors electrode is an aluminum and this solution can etch an aluminum more than silicon, so we decided to add a silicon powder into the TMAH solution to decrease an etching rate of aluminum in concentration of 15, 25, 37.5 and 50 g/l. The TMAH solution mixed with silicon powder in 37.5 g/l concentration has silicon and aluminum etching rates are 0.07 and 0.03  $\mu\text{m}/\text{min}$ , respectively. This mixing solution is appropriated to support the fabrication of U-shaped photodetectors. The different ratio of TMAH solution can cause the change of solution pH. This cause has an effect on the surface of silicon crystal. TMAH solution mixed with silicon powder in 37.5 g/l concentration has a pH is 12. From the study of electrical properties and the optical response of U-shaped photodetectors, we found that the current – voltage characteristics of photodetectors that were not illuminated had a photodetector current was 2.3 mA at 5 V. And photodetectors that illuminated from 20,000 lux of light intensity. It was found that the U-shaped photodetector could well responses and it had a photodetector current is 4.7 mA.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อ||อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนให้ความรู้ อบรมสั่งสอน จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

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

ขอขอบคุณ ดร. อัมพร โพธิ์ไย, ดร. จิรวัฒน์ ปราบเขต, นักวิจัย และ เจ้าหน้าที่นักวิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในการทดลองบางส่วน ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ ดร.กอบศักดิ์ ศรีประภา, ดร. ทวีวัฒน์ กระจ่างสังข์, ดร. จรรย์ ศรีธาราธิคุณ, นักวิจัย และเจ้าหน้าที่นักวิจัย ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) ทุกท่าน สำหรับการเอื้ออำนวยเครื่องมือวัด Profilometer ในการทดลองและคำแนะนำต่างๆ

ขอขอบคุณ ดร.ราชศักดิ์ ศักดานุภาพ, คุณภววรรณตรี บ่อไทย และเจ้าหน้าที่งานศูนย์เครื่องมือ วิทยานวัตกรรมการจัดการข้อมูล สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง สำหรับการเอื้ออำนวยเครื่องมือวัด Scanning Electron Microscope ในการทดลองงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณไอลดา สุวรรณชาติ ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ และขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆ ทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน

สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือและแนะนำสิ่งต่างๆ ในชีวิต รวมถึงบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำงานวิจัยฉบับนี้ สำเร็จไปด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัย จนกระทั่งจบการศึกษา

งามจิต มงคลนายนนท์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต่อ|||อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# 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 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์การศึกษา.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย.....	4
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	6
2.1 การกัด.....	7
2.1.1 การกัดแบบเปียก.....	7
2.1.2 การกัดแบบแห้ง.....	10
2.2 สารละลายต่างๆ ที่ใช้การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นผลึกซิลิคอน.....	13
2.2.1 การกัดเปียกแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย KOH.....	13
2.2.2 การกัดเปียกแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย EDP.....	14
2.2.3 การกัดเปียกแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH.....	15
2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก.....	17
2.3.1 ปฏิกิริยาการกัดซิลิคอน.....	17
2.3.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน.....	18
2.3.3 ปฏิกิริยาการกัดออลูมิเนียม.....	20
2.4 ตัวตรวจวัดแสง.....	21
2.4.1 ตัวตรวจวัดแสงในภาวะสมดุล.....	21
2.4.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	22
2.4.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสง.....	23

เอกสารนี้ บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง..... 25

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.1 ลวดลายสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสง .....	25
3.2 กระบวนการสร้าง .....	26
3.3 การทดลอง .....	31
3.3.1 เครื่องมือวัดค่าความลึก Profilometer .....	31
3.3.2 เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง .....	32
3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	33
3.3.4 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า .....	34
3.3.5 การวัดการตอบสนองทางแสง .....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง .....	36
4.1 การศึกษาการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยการกัดของสารละลาย TMAH ..	36
4.1.1 การกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O โดยการวัดค่าความลึกด้วยเครื่อง Profilometer .....	36
4.1.2 การกัดซิลิคอนโดยเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O .....	40
4.2 การศึกษาการกัดและการลดการกัดต่อลุ่มิเนียมด้วยสารละลาย TMAH .....	41
4.3 การเปรียบเทียบการกัดระหว่างซิลิคอนและอลูมิเนียม .....	42
4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ต่อ การกัดและทางกายของแผ่นซิลิคอน .....	44
4.4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ไม่เติมผงซิลิคอน .....	44
4.4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่างๆ .....	45
4.4.3 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของ สารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่ออัตราการกัดแผ่นซิลิคอน .....	47
4.4.4 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของ สารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่ออัตราการกัดต่อลุ่มิเนียม .....	48
4.4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ต่อทางกายภาพของแผ่นซิลิคอน .....	49
4.5 การศึกษาลักษณะตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) .....	50
4.5.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) .....	50
4.5.2 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงด้วย การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่อพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสง .....	51

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ในชื่อของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.5.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง	
แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) .....	52
4.5.3.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง	
แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	52
4.5.3.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง	
แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ .....	54
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ .....	56
เอกสารอ้างอิง .....	58
ภาคผนวก ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	62
ประวัติผู้เขียน .....	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดВИ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย KOH .....	13
2.1 (ต่อ)การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย KOH .....	14
2.2 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย EDP .....	14
2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH.....	15
2.3 (ต่อ)การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH.....	16
2.4 เปรียบเทียบอัตราการกัดของสารละลาย .....	16
4.1 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนโดยสารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O ต่างๆ.....	39
4.2 เปรียบเทียบอัตราการกัดของซิลิคอนและอลูมิเนียมเมื่อเติมผงซิลิคอน .....	43



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัดVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบร่องรูปตัวยู..... 2
1.2	อัตราการกัดลุ่มิเนียมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมผงซิลิคอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ... 2
2.1	ตัวอย่างการกัดแผ่น PCB ลายวงจรรีเลย์ทรอนิกส์..... 6
2.2	ตัวอย่างพื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด..... 7
2.3	ลักษณะการกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก ..... 8
2.4	ลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก ..... 8
2.5	แผนผังของพันธะซิลิคอน (A) ระนาบ (100) และ (B) ระนาบ (111)..... 9
2.6	การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอน h คือ ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ สี่เหลี่ยม คือ อะตอมซิลิคอนบนพื้นผิว และ A คือ สารละลายใช้ในการกัด ..... 10
2.7	ลักษณะการกัดแห้ง..... 11
2.8	การกัดด้วยพลาสมา อะตอมของซิลิคอนระเหยออกจากพื้นผิว ..... 11
2.9	การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอออนปฏิกิริยาบนพื้นผิว 12
2.10	การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา..... 12
2.11	พันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบ (100), ระนาบ (110) และระนาบ (111)..... 19
2.12	ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีขนาดของมุม $54.7^\circ$ ..... 20
2.13	แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุลความร้อน ..... 21
2.14	แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ..... 22
2.15	แถบพลังงานของตัวตรวจวัด เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ ..... 23
2.16	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ..... 24
3.1	ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM..... 25
3.2	ลวดลายกระจกต้นของตัวตรวจวัดแสง..... 26
3.3	กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM..... 28
3.3	(ต่อ) กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM..... 29
3.4	อุปกรณ์ใช้สำหรับกระบวนการกัดตัวตรวจวัดแสง ..... 30
3.5	ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดแบบเปียก ..... 30
3.6	ตัวตรวจวัดแสงหลังจากผ่านกระบวนการกัด..... 31
3.7	ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำไปเชื่อมต่อขา..... 31
3.8	เครื่อง Profilometer บริษัท Veeco รุ่น Dektak 150 ..... 32
3.9	เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง รุ่น Model PH900..... 33
3.10	ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ..... 33
3.11	เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ..... 34

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตั้ง VIII ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 การวัดความลึกของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โดยมีอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ต่างๆ ด้วยเครื่อง Profilometer (ก) สารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:2 (ข) สารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:3 (ค) สารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:4 และ (ง) สารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:5.....	37
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O ที่มีอัตราส่วนและเวลาในการกัดซิลิคอน .....	39
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดซิลิคอนในสารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O ไม่ได้และเติมผงซิลิคอนเป็น 3, 5, 7.5 และ 10 กรัมในเวลาต่างๆ ที่ทำการกัดซิลิคอน .....	40
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดอลูมิเนียมในสารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O เติมผงซิลิคอนเป็น 3, 5, 7.5 และ 10 กรัมในเวลาต่างๆ ที่ทำการกัดอลูมิเนียม .....	42
4.5 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนและอลูมิเนียมของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนในปริมาณ 3, 5, 7.5 และ 10 กรัม.....	43
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H <sub>2</sub> O.....	44
4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TAMH โดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆ.....	45
4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ ที่เติมในสารละลาย TMAH.....	46
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TAMH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ.....	47
4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดอลูมิเนียมของสารละลาย TAMH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ.....	48
4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนและอลูมิเนียมของสารละลาย TAMH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ.....	49
4.12 พื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH โดยการ SEM ที่มีกำลังขยายเป็น 1,000 เท่า (ก) ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 12 (ข) ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 13.....	50
4.13 ภาคตัดขวางจากการ SEM ที่เป็นลักษณะร่องรูปตัวยูและมืออลูมิเนียมที่ยังคงเหลืออยู่บนแผ่นซิลิคอน (ก) กำลังขยาย 3,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า.....	51

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.14	ภาคตัดขวางจากการ SEM ที่เป็นลักษณะร่องรูปตัวยูและมือลูมิเนียมที่ยังคงเหลืออยู่บนแผ่นซิลิคอน (ก) กำลังขยาย 3,000 เท่า (ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า..	52
4.15	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	53
4.16	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบด้วยความเข้มแสง 5,000 lux, 10,000 lux, 15,000 lux และ 20,000 lux.....	55
4.17	ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) เมื่อได้รับการไบอัส 5 V.....	55

## รายการคำย่อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตัด X บ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$E_C$	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
$E_F$	คือ	ระดับเฟอร์มิ
$E_{FM}$	คือ	ระดับเฟอร์มิ
$E_{FS}$	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำ
$E_g$	คือ	ช่องว่างพลังงาน
$E_i$	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
$E_V$	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
$I_0$	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
$I_F$	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง
$I_{MS}$	คือ	กระแสไฟฟ้่าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
$I_R$	คือ	กระแสไฟฟ้่าด้านไบอัสย้อนกลับ
$I_{SM}$	คือ	กระแสไฟฟ้่าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
$I_P$	คือ	กระแสแสง
$I_C$	คือ	กระแสคอนดัคเตอร์
$R$	คือ	อัตราการก่ตในแนวตั้งของซิลิคอน
$V_A$	คือ	แรงดันไบอัส
$V_{bi}$	คือ	แรงดันภายใน
$W_d$	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
$\phi_{bn}$	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ขั้วตักยี้
$\phi_M$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_S$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต่อXIIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
การกัด	Etching
การกัดแบบเปียก	Wet etching
การกัดแบบแห้ง	Dry etching
การกัดแบบพลาสมา	Plasma etching
การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง	Chemical dry etching
การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา	Reactive Ion Etching
การเกิดส่วนไวต่อปฏิกิริยา	Active Species Generation
การดูดซับ	Adsorption
การแพร่กระจาย	Diffusion
การโยกย้าย	Migration
กรดไฮโดรฟลูออริก	Hydrofluoric acid
กรดไนตริก	nitric acid
กรดปรีนยา	Piranha
กลไกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก	Mechanism of Anisotropic Etching
กระบวนการดูดกลืนแสง	Absorption process
กระบวนการสปัตเตอริง	RF sputtering
กระแสมืด	Dark current
กระแสรั่วไหล	Leakage current
กระแสแสง	Photocurrent
การไบอัสไปข้างหน้า	Forward bias
การไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
ขั้วแคโทด	Cathode
ขั้วแอโนด	Anode
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	Depletion width
ช่องว่างแถบพลังงาน	Energy gap
ไดโอดพี-เอ็น	P-N diode
ตัวตรวจวัดแสง	Photodetectors
ไตรโคลเอทรีลีน	Trichloroethylene
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี XIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค(ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
แถบวาเลนซ์	Valence band
เนื้อสารกึ่งตัวนำ	Bulk
น้ำยาขึ้นลวดลาย	Developer
น้ำยาไวแสง	Photoresist
ปฏิกิริยารีดอกซ์	redox reaction
พันธะหลัก	back-bond
โฟโตมาร์ก	Photo mask
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ภาคตัดขวางการจับยึด	Capture cross section
รอยสัมผัสชนิดชอตต์กี	Schottky contact
รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	Metal-semiconductor contact
ระดับพลังงานเฟอร์มิ	Fermi energy
รีดักชัน-ออกซิเดชัน	Reduction-oxidation
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
อะซิโตน	Acetone
แอนไอโซทรอปิก	Anisotropic
ไอโซทรอปิก	Isotropic

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และตี XIV ึ่งอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

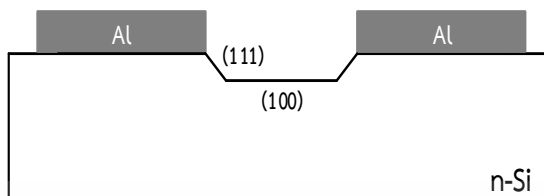
ความก้าวหน้าของเทคโนโลยีในปัจจุบันได้พัฒนาอย่างรวดเร็ว และมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการดำเนินชีวิตของมนุษย์ โดยเฉพาะเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ซึ่งเทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำนี้ มีความสามารถและทำให้เกิดผลดีของตัวอุปกรณ์มากมาย เช่น การทำงานที่รวดเร็ว การประหยัดพลังงาน และการทำงานที่แม่นยำ เป็นต้น การใช้สารกึ่งตัวนำสร้างอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีผลต่อการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ซึ่งมีผลมาจากความต้องการที่จะพัฒนาในรูปแบบของวงจร เพื่อให้ได้อุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้เข้ามามีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของเราโดยมีการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย อาทิเช่น ด้านการรักษาความปลอดภัย ด้านการแพทย์ ด้านการทดสอบทางวิทยาศาสตร์ และด้านการสื่อสารทางแสง เป็นต้น จนมาถึงความสะดวกที่อยู่ใกล้ตัวของตัวเราไม่ว่าจะเป็นประตูเปิด-ปิดแบบอัตโนมัติตามซูเปอร์มาร์เก็ตทั่วไป เครื่องอ่านบาร์โค้ด การควบคุมระยะไกลด้วยรีโมทคอนโทรลของทีวีและเครื่องเล่นวิดีโอ [1-2] การนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เหล่านี้คือ ตัวตรวจจับแสง (Photodetector)

ตัวตรวจจับแสงเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มของแสงโดยสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้โดยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น ตัวตรวจจับแสงมีโครงสร้างหลายลักษณะด้วยกันขึ้นอยู่กับการใช้งาน เช่น พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode)[3], พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode)[4] และตัวตรวจจับแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal: MSM) เป็นต้น โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มของซีดตีก็ยไคโอด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจจับแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสซีดตีก็ย 2 รอยสัมผัสต่อกันเชื่อมกัน โดยมีคุณสมบัติเด่น คือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาแนร์ กระบวนการสร้างง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM [5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมาตัวตรวจจับแสงที่มีโครงสร้างแบบเชิงราบหรือพลาแนร์เป็นโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งมีกระบวนการสร้างที่ง่ายไม่ยุ่งยากซับซ้อน[6] แต่ในโครงสร้างแบบเชิงราบนั้นจะมีพื้นที่รับแสงที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับแสงโดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้วิธีของกระบวนการกัด (etching) พื้นผิวของพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับแสง โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethyl ammonium hydroxide, TMAH) การกัดโดยสารละลาย TMAH จะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching)

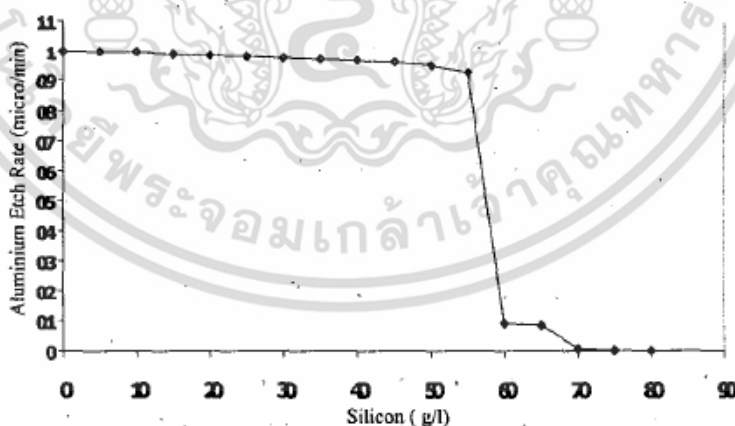
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูหรือ u-shape [7] การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเป็นการกัดเลือกระนาบและทิศทางในการกัดซิลิคอน ซึ่งอัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้  $(110) > (100) > (111)$  [8] จะทำให้เราได้โครงสร้างที่เราต้องการดังรูปที่ 1.1



รูปที่ 1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบร่องรูปตัวยู

สารละลาย TMAH นี้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิปอสได้แตกต่างจากสารละลาย KOH ซึ่งอาจทิ้งโลหะอัลคาไลน์ (alkali metal) ของโพแทสเซียมซึ่งทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมอส (MOS) และชิปอส (CMOS) ได้ [9] ส่วนสารละลาย TMAH นั้นเป็นสารละลายหนึ่งที่แตกตัวแล้วจะได้ไฮดรอกไซด์และไม่มีโลหะอัลคาไลน์ สามารถเจือจางไปกับน้ำได้ง่ายต่อการกำจัดทิ้ง อีกทั้งยังสามารถที่จะระเหยออกไปจากสารละลายเมื่อใช้อุณหภูมิสูง แต่ในขณะที่ทำการกัดซิลิคอนให้เป็นเกิดร่องรูปตัวยูนั้น สารละลาย TMAH จะทำการกัดขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่เป็นอลูมิเนียม อลูมิเนียมจะถูกกัดด้วยอัตราที่เร็วกว่าในเวลาที่สูงๆ ทำให้อลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอนหมดไปจึงต้องหาวิธีการที่จะกัดซิลิคอนให้มีค่าความลึกที่มาก แต่กัดอลูมิเนียมด้วยอัตราที่น้อยลง โดยมีการศึกษาการเติมผงซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 1.2 การกัดอลูมิเนียมของสารละลาย TMAH เมื่อเติมผงซิลิคอนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อัตราการกัดของอลูมิเนียมจึงลดลง [10]



รูปที่ 1.2 อัตราการกัดอลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงเมื่อมีการเติมผงซิลิคอนในปริมาณที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาเพื่อหาอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH สำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงในรูปแบบโครงสร้างที่เป็นร่องรูปตัวยู (U-shape MSM) โดยใช้กระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง การเติมผงซิลิคอนลงไปในสารละลาย TMAH เพื่อลดอัตราการกัดอลูมิเนียมลง ซึ่งอลูมิเนียมถูกใช้เป็นชั้นโลหะหรือขั้วไฟฟ้าในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ ส่วนใหญ่ของงานวิจัยนี้ เมื่ออยู่ใต้เงื่อนไขเบเซปรีเซชันนี้ การศึกษาไม่ว่าการณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กทรอนิกส์อย่างกว้างขวางจึงเป็นแนวคิดในการศึกษากระบวนการกัดเพื่อที่จะนำไปใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วยโครงสร้าง Al/n-Si/Al โดยการสร้างจะใช้ต้นแบบเพียงต้นแบบเดียวเพื่อเป็นการลดขั้นตอนกระบวนการสร้างและหลีกเลี่ยงปัญหาในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี การขึ้นลวดลายด้วยน้ำยาไวแสงจะทำให้ความหนาของน้ำยาไวแสงไม่เท่ากันซึ่งในร่องรูปด้วยนั้นจะมีความหนาของน้ำยาไวแสงที่มากกว่าบริเวณอื่นๆ ไม่ต้องใช้หน้ากากป้องกันการกัดอลูมิเนียม และง่ายต่อกระบวนการสร้าง การใช้สารละลาย TMAH ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วยโครงสร้าง Al/n-Si/Al จึงสามารถนำไปใช้ในการสร้างเป็นวงจรรวมได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้จะนำเสนอการศึกษากระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย (UMSM)

1. ศึกษาการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH บนแผ่นผลึกซิลิคอนเพื่อหาอัตราการกัดด้วยความลึก
2. ศึกษาการลดการกัดอลูมิเนียมของสารละลาย TMAH ที่เป็นขี้ไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงด้วยการเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH
3. ศึกษาความเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวของแผ่นซิลิคอน
4. ศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยที่มีผลต่อกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง
5. ศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยที่มีผลต่อกระแส-แรงดันไฟฟ้าขณะได้รับความเข้มแสงในช่วง 5,000 – 20,000 lux เพื่อทดสอบการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะที่แสงมากน้อยแตกต่างกัน

## 1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

จากวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ที่ต้องศึกษากระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH เพื่อนำข้อมูลกระบวนการกัดสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยทำการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง เพื่อเป็นแนวทางในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในอนาคตต่อไป การศึกษาแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนแรกศึกษาการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกและสารละลายที่ใช้สำหรับการกัดแผ่นซิลิคอนให้มีลักษณะเป็นร่องรูปด้วยหรือ U-shape เพื่อจะกำหนดอัตราส่วนผสมที่ใช้สำหรับการกัดและนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย

ส่วนที่สองทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง เพื่อใช้ในงานวิจัยโดยสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยโดย

ใช้เครื่อง Profilometer วัดความลึกที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH และสารละลายเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TMAH ที่ผสมผงซิลิคอนเพื่อลดอัตราการกัดต่อลุ่มิเนียมใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เพื่อศึกษาพื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด

ส่วนสุดท้ายการทดสอบตัวตรวจวัดแสงด้วยการวัดสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง โดยจะศึกษาสมบัติกระแส - แรงดัน ซึ่งในกรณีที่ไม่งแสงตกกระทบ เรียกกระแสที่เกิดขึ้นว่า กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด และทำการทดลองวัดสมบัติทางไฟฟ้าในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ โดยมีความเข้มแสงเปลี่ยนแปลงในช่วง 5,000 – 20,000 lux เพื่อทดสอบการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง และจะนำไปสู่การวิเคราะห์กระแสแสงที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงได้ในโอกาสต่อไป

#### 1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย

1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลายจากเทคนิคการกัดแบบเปียกซึ่งทำให้เกิดเป็นร่องรูปตัวยู
2. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดทีก็ย
3. ความรู้ความเข้าใจผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ต่อพื้นผิวของแผ่นซิลิคอน
4. ความรู้เกี่ยวกับวิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ด้วยการวัดค่ากระแส - แรงดัน ซึ่งในกรณีที่ไม่งแสงตกกระทบและในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

#### 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยจะศึกษากระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกแผ่นซิลิคอนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท มีรายละเอียดดังนี้

**บทที่ 1** บทนำ จะกล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่องรูปตัวยู และเหตุผลสนับสนุนต่องานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของงานวิจัย ขั้นตอนของการศึกษาและประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยในครั้งนี้

**บทที่ 2** ทฤษฎีและหลักการ จะกล่าวถึงกระบวนการกัดในรูปแบบต่างๆ รวมถึงการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกแผ่นซิลิคอน การเปรียบเทียบสารละลายต่างๆ เพื่อนำมาใช้ในกระบวนการกัด และทฤษฎีของตัวตรวจวัดแสง

**บทที่ 3** กระบวนการสร้างและการทดลอง จะกล่าวถึงการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสง กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขั้นตอนการทดลองและทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทที่ 4** ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วย ผลของความถี่ของซิลิคอนด้วยการกัดของสารละลาย TMAH และผลของการลดการกัดต่อลุ่มิเนียมที่เป็นขั้วไฟฟ้า ผลการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ต่อพื้นผิวของซิลิคอน และผลลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยู

**บทที่ 5** สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลอง และแนวทางการพัฒนาตัวตรวจวัดแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการ

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบร่องรูปตัวยู หรือ U-shape ด้วยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethyl ammonium hydroxide, TMAH) ที่มีผลต่อพื้นผิวของพันธะหลักของซิลิคอนที่เกิดปฏิกิริยากับสารละลาย TMAH และลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ดังนั้นในบทนี้ได้กล่าวถึงทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้

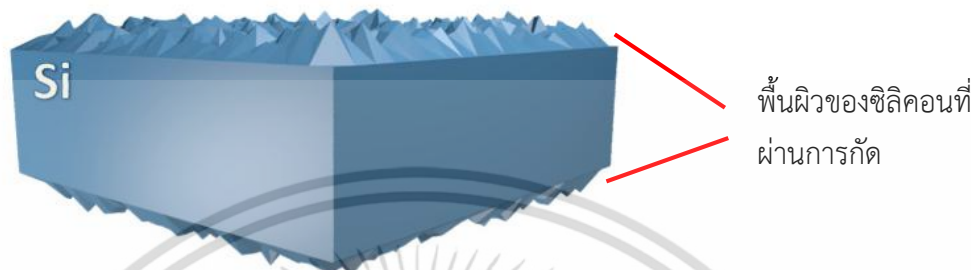
ในปัจจุบันเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์มีความก้าวหน้าและพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยเฉพาะเทคโนโลยีทางด้านอิเล็กทรอนิกส์เชิงประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ในสารกึ่งตัวนำจะช่วยควบคุมการทำงานของอิเล็กทรอนิกส์ การศึกษาเกี่ยวกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำและเทคโนโลยีโซลิดสเตต [11] ในขณะที่การออกแบบและการสร้างวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ ในการแก้ปัญหาในทางปฏิบัติอยู่ภายใต้สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ การสร้างอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์นั้นจะมีบางส่วนที่ใช้กระบวนการกัดในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เช่น การกัดแผ่น PCB (printed circuit board) เพื่อสร้างลายวงจรรีเลย์ทรอนิกส์ ซึ่งจะใช้เป็นทางเดินสัญญาณไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ที่อยู่ในวงจรมีสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องตามที่ได้ออกแบบ[12] แสดงดังรูปที่ 2.1 การกัดแผ่น PCB ลวดลายวงจรรีเลย์ทรอนิกส์



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างการกัดแผ่น PCB ลวดลายวงจรรีเลย์อิเล็กทรอนิกส์[12]

การกัดพื้นผิวแผ่นผลึกซิลิคอนเซลล์แสงอาทิตย์สร้างเป็น self-assembled masks เพื่อเพิ่มค่าประสิทธิภาพของเซลล์[13-14] แสดงดังรูปที่ 2.2 ภาพตัวอย่างหลังจากผ่านกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอน กระบวนการสร้างเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro-Electro-Mechanical Systems : MEMS) จะใช้เทคนิคการกัดและกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อปรับปรุงตามความเหมาะสมกับการใช้งานต่างๆ ของ MEMS และการสร้างตัวตรวจวัดแสงด้วยการกัดเป็น U-Grooved metal- semiconductor-metal photodetector (UMSM-PD) เพื่อลดกระแสรั่วไหลและเพิ่มประสิทธิภาพควอนตัมภายในของตัวตรวจวัดแสง[7] เป็นต้น การสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ได้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กล่าวข้างต้นนั้นจะใช้กระบวนการกัดทางเคมีในการสร้างอุปกรณ์ ซึ่งในงานวิจัยนี้จึงนำกระบวนการกัดทางเคมีมาใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบรูปร่องตัวงู เพื่อจะศึกษากระบวนการกัดเป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงและเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยไม่จำเป็นต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า กระบวนการกัดทางเคมีนั้นเป็นการศึกษาเบื้องต้นที่เหมาะสมต่อการทำงานในห้องปฏิบัติการทางอิเล็กทรอนิกส์ของงานวิจัยในครั้งนี้



รูปที่ 2.2 ตัวอย่างพื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด [14]

## 2.1 การกัด (Etching)

กระบวนการกัดโดยทั่วไปจะเป็นการสร้างลวดลายวงจรในงานอิเล็กทรอนิกส์จะมีกระบวนการกัดมีสองประเภทคือ การกัดแบบเปียก (wet etching) และการกัดแบบแห้ง (dry etching) เมื่อทำการกัดผิวหน้าของวัสดุด้วยสารเคมีหรือก๊าซแล้วนั้นจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุมีลักษณะเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอในทุกทิศทาง หรือแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอในทิศทางของระนาบ การกัดแบบเปียกมักจะมีอัตราการกัดที่เร็วกว่าการกัดแบบแห้งและสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดได้โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันหรือความเข้มข้นของสารขึ้นอยู่กับกาไปใช้งาน [9,15]

### 2.1.1 การกัดแบบเปียก (Wet etching)

การกัดแบบเปียกเป็นการกัดผิวหน้าของวัสดุโดยจะใช้สารเคมีที่เป็นของเหลวหรือที่เรียกว่า "etchants" เพื่อกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยจะสร้างลวดลายไว้บนผิวหน้าของวัสดุเป็นการกำหนดลวดลายก่อนทำการกัดในส่วนที่ไม่ต้องการออก

ขั้นตอนในกระบวนการกัดแบบเปียกจะต้องเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารละลายที่ใช้ในกระบวนการ ดังนั้นในกระบวนการกัดแบบเปียกจะอธิบายได้ 3 ขั้นตอนนี้

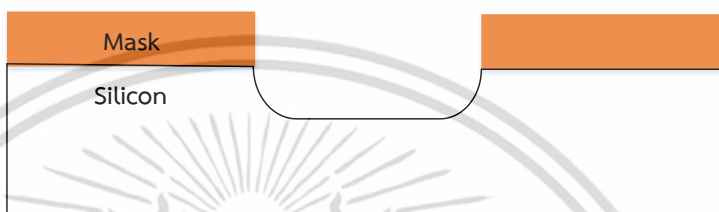
- (1) การแพร่กระจายของสารละลายบนผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ
- (2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายและผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้ออกซิเดชันของวัสดุที่ละลายแล้วเกิดออกซิไดซ์
- (3) การแพร่กระจายของสารละลายโดยเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุที่มีปฏิกิริยาตอบสนอง [16]

การกัดแบบเปียกจะแบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

- (1) การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก (isotropic etching)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะมีส่วนผสมของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) กรดไนตริก (nitric acid) และกรดอะซิติก (acetic acid) เป็นสารละลายที่ใช้สำหรับการกัดซิลิคอน โดยการกัดนั้นจะมีความเข้มข้นของสารละลายที่เป็นการกำหนดอัตราการกัดและการกัดส่วนใหญ่มักใช้ซิลิคอนออกไซด์หรือซิลิคอนไนไตรด์เพื่อเป็นการลดอัตราการกัดลง การกัดด้วยสารเคมีโดยทั่วไปมักจะเป็นลักษณะไอโซทรอปิก ทิศทางของการกัดนั้นมีความสำคัญมากสำหรับรูปแบบการถ่ายโอนความละเอียดสูงดังรูปที่ 2.3 แต่การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะไม่นิยมนำมาใช้ทำการกัดซิลิคอน



รูปที่ 2.3 ลักษณะการกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก

#### (2) การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching)

สารละลายที่ทำการกัดบนผิวหน้าของวัสดุ ในอัตราที่ต่างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลึกของวัสดุกับสารละลายที่ใช้ในการกัดซึ่งจะมีความแตกต่างของอัตราการกัดขึ้นอยู่กับระนาบของผลึกในวัสดุ เช่น ซิลิคอนจะเกิดการกัดในลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกสูงมาก สารละลายบางตัวเท่านั้นที่จะทำให้เกิดการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกได้ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิคอล (EDP) และเตตระเมธิล-แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกในระนาบ (100) จะมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูแสดงในดังรูปที่ 2.4 [17]



รูปที่ 2.4 ลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

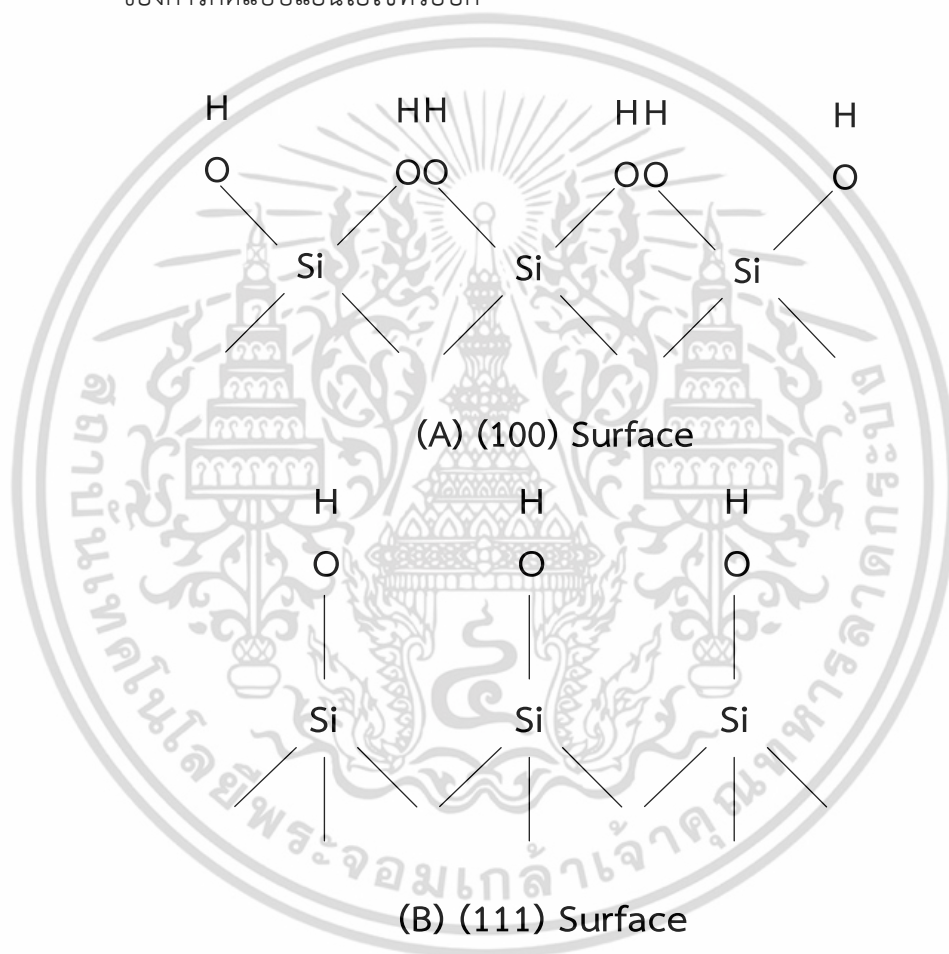
#### กลไกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Mechanism of Anisotropic Etching)

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมีรายละเอียดเป็นอัตราการกัด, การเกิดปฏิกิริยาและพื้นผิวของวัสดุ แสดงให้เห็นว่ากลไกที่ซับซ้อนมีส่วนร่วมในการกัดซิลิคอนในสารละลายที่เป็นต่าง รูปแบบของกลไกนั้นมีปัจจัยอยู่ 3 แบบ (1) สาเหตุทางกายภาพของความแตกต่างในอัตราการกัดต่อมาจากพื้นผิวของผลึกทิศทางที่แตกต่างกัน (2)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวที่เป็นสาเหตุทางกายภาพและ (3) สภาพพื้นผิวที่กำหนดอัตราการทำจัตอะตอมพื้นผิว

ทางกายภาพในประการแรกที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี back-bond strength นั้นคืออะตอมในพื้นผิวของระนาบ (111) มีสามพันธะเชื่อมต่อกับตาข่ายพื้นผิวในขณะที่พื้นผิวของระนาบ (100) นั้นมีเพียงสองพันธะที่ยึดเกาะอยู่ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.5 พันธะของอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวจะถูกสลายละลายชนิด  $\text{OH}^-$  ดึงออกจากการยึดเกาะของพันธะ จำนวนของพันธะหลัก (back-bond) และความแข็งแรงของพันธะบนพื้นผิวเพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาที่แตกต่างกันของพื้นผิวของผลึก นี้คือสาเหตุพื้นฐานทางกายภาพของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

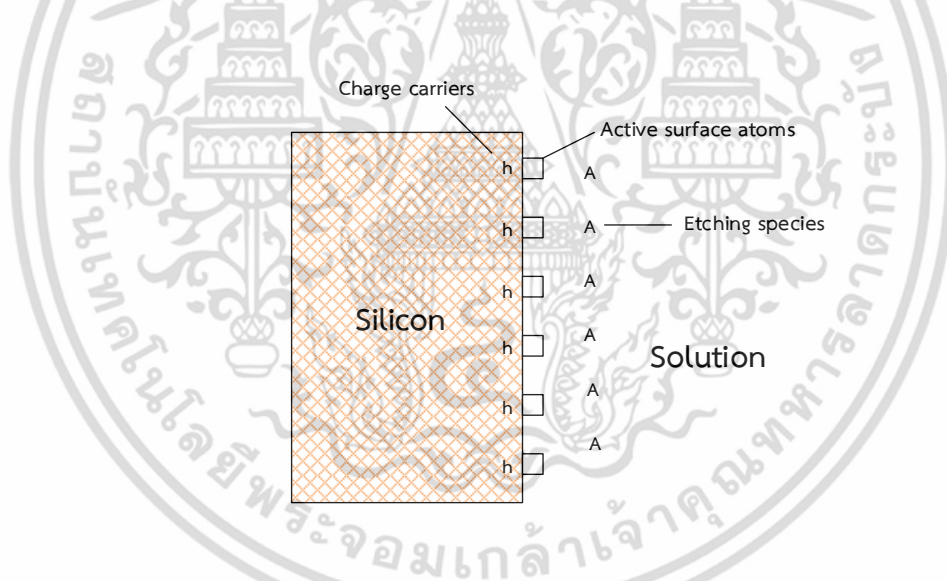


รูปที่ 2.5 แผนผังของพันธะซิลิคอน (A) ระนาบ (100) และ (B) ระนาบ (111)

โดยทั่วไปการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอนดังแสดงในรูป 2.6 อาจจะมี 3 ส่วนในเกิดปฏิกิริยาของการกัด ชนิดนี้ในรูปแบบของการจ่ายประจุพาหะนั้นคืออิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ชนิดของสารเคมีที่มีผลต่อพื้นผิวของวัสดุ เช่น  $\text{OH}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  และอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวที่ใช้งานซึ่งเหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาและการกำจัด ซึ่งแตกต่างจากอีกสองชนิดที่จ่ายประจุพาหะหรืออาจจะไม่ได้เกี่ยวข้องกับการเอกลสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดปฏิกิริยาการสลายตัวแต่อาจจะเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของธรรมชาติ ความเข้มข้นของแต่ละชนิดนี้จะถูกกำหนดโดยกระบวนการที่แตกต่างกัน เช่น การแพร่กระจาย (diffusion) การโยกย้าย (migration) การดูดซับ (adsorption) และ solvation (การจับกันในลักษณะเครือข่ายของโมเลกุลตัวทำละลายกับโมเลกุลในสารละลาย) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวที่ใช้งานขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก

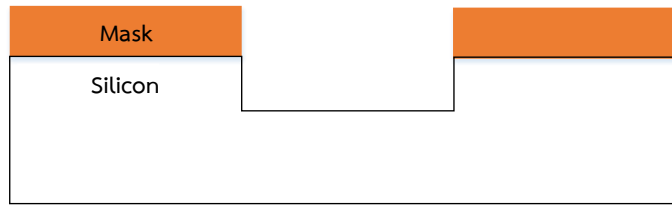
การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายที่เป็นต่างที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอนที่มีออกไซด์ การเกิดของฟิล์มออกไซด์ขึ้นจะปกปิดบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งมีทิศทางที่ต่างกันและจะทำให้มีผลต่อการกัดแบบไอโซทรอปิก นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะทำการกัดแบบไอโซทรอปิกอาจเกิดขึ้นภายใต้การควบคุมการแพร่กระจายอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหรือการควบคุมการใช้งานของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถเกิดขึ้นโดยกระบวนการที่มีการควบคุมพื้นผิวอย่างน้อยสำหรับการกัดพื้นผิว การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกไม่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการกัดทั้งหมดของพื้นผิวรวมทั้งสารละลายที่มีอัตราการกัดช้าที่สุดจะขึ้นอยู่กับสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นการจ่ายประจุพาหะที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการกัด ประจุพาหะที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการกัดแบบไอโซทรอปิกในสารละลาย HF แต่ไม่ได้เกิดขึ้นในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย KOH [19]



รูปที่ 2.6 การเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวของซิลิคอน h คือ ประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำ สี่เหลี่ยม คือ อะตอมซิลิคอนบนพื้นผิว และ A คือ สารละลายใช้ในการกัด

### 2.1.2 การกัดแบบแห้ง (Dry etching)

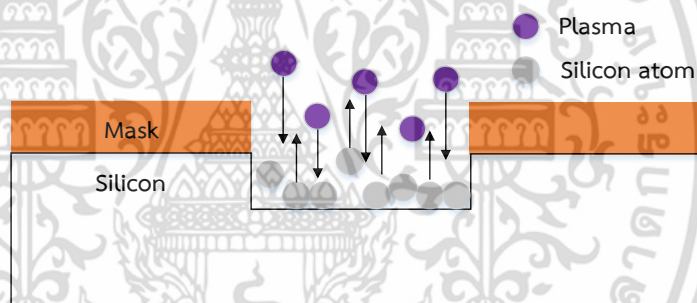
ในกระบวนการกัดแบบแห้งนี้ใช้พลาสมาหรือก๊าซในการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ การเกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้พลังงานของอนุภาคที่เกิดการเคลื่อน และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี จะมีลักษณะการกัดแบบแห้งดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ลักษณะการกัดแบบแห้ง

(1) การกัดแบบพลาสมา (Plasma etching)

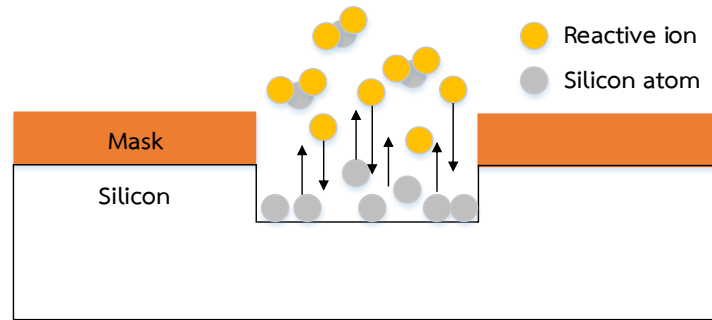
กระบวนการนี้จะมีการกำเนิดพลาสมาที่ความดันต่ำโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับย่านความถี่วิทยุ 13.56 เมกะเฮิรตซ์ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีไอออนบวกและลบ ไอออนบวกจะกระจายตัวไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการกำจัดออก เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้นหลุดออกมาจากอะตอมบนพื้นผิวของวัสดุจะระเหยไป จะไม่มีการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีดังนั้นจะเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพดังรูปที่ 2.8 ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ เครื่องจักรที่ใช้มีความสามารถกำเนิดพลาสมาที่มีความหนาแน่นสูง



รูปที่ 2.8 การกัดด้วยพลาสมา อะตอมของซิลิคอนระเหยออกจากพื้นผิว

(2) การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง (Chemical dry etching)

การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้งนั้นจะไม่ใช้สารเคมีที่เป็นของเหลว หรือที่เรียกว่า vapor phase etching กระบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกับระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีกับการกัดด้วยก๊าซบนพื้นผิวหน้าของวัสดุ กระบวนการกัดทางเคมีนั้นมักจะเป็นลักษณะของไอโซทรอปิกและเป็นการกัดที่มีเทคนิคขั้นสูง การกัดแห้งแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถกัดที่ความละเอียดมากและอัตราการกัดที่สูงกว่าการกัดแบบไอโซทรอปิก เนื่องจากการกัดแบบแห้งสามารถหลีกเลี่ยง undercutting ได้ ในรูปที่ 2.9 แสดงให้เห็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในการกัดแบบแห้ง โดยสารเคมีที่ใช้ในการกัดแบบแห้ง คือ tetrafluoromethane ( $\text{CF}_4$ ), sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ), nitrogen trifluoride ( $\text{NF}_3$ ), chlorine gas ( $\text{Cl}_2$ ), หรือ fluorine ( $\text{F}_2$ ) [16]

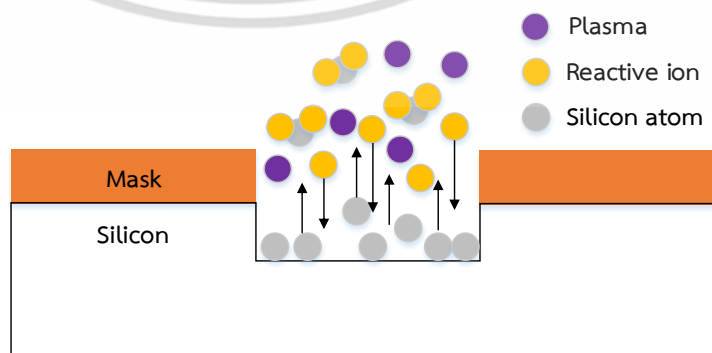


รูปที่ 2.9 การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง อะตอมของซิลิคอนทำปฏิกิริยากับไอออนปฏิกิริยาบนพื้นผิว

(3) การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Ion Etching : RIE)

การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาจะใช้ปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีความหลายหลากและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางด้านอุตสาหกรรม กระบวนการนี้จะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วมาก การชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากไอออนไนซ์จะช่วยให้สารละลายแตกตัวและทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุ

การเกิดส่วนไวต่อปฏิกิริยา(Active Species Generation) เมื่อทำให้เกิดอิเล็กตรอนอย่างน้อยหนึ่งตัวในระบบอิเล็กตรอนจะถูกสนามไฟฟ้าเร่งจนมีพลังงานขนาดเพียงพอแก่การเกิดไอออนไนซ์ การชนกับโมเลกุลของก๊าซจะทำให้เกิดพลาสมาที่เรืองแสง ซึ่งประกอบไปด้วยทั้งส่วนที่เป็นประจุบวก ประจุลบ อิเล็กตรอนและส่วนที่เป็นกลางทางไฟฟ้า อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจะมีสภาพคล่องสูงกว่าประจุบวก ดังนั้นจะแพร่ออกสู่ผิวหน้าของวัตถุได้เร็วกว่า ผิวหน้าของวัตถุมีศักดาเป็นลบเมื่อเทียบกับพลาสมา การแยกสภาพชั่ววอกจากกันจะทำให้เกิดสนามไฟฟ้าขึ้นระหว่างหมู่พลาสมาและฐานรอง โดยออกจากพลาสมาไปสู่ผิวหน้าของวัตถุ ไอออนที่เกิดขึ้นมีประจุหลุดออกจากผิวหน้าของวัตถุ แต่ส่วนของพลาสมาที่มีสภาพเป็นกลางจะไม่เคลื่อนที่ตามสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้น ดังรูปที่ 2.10 ก๊าซส่วนหนึ่งที่ถูกไอออนไนซ์แล้วนั้นจะเป็นส่วนที่ไวต่อการเกิดปฏิกิริยาเคมีซึ่งเรียกว่าส่วนไวต่อปฏิกิริยา (reactive species) เช่น ไอออนของฟลูออไรด์ ( $\text{SF}_6$ ) และไอออนของคลอรีน ( $\text{CF}_4$ ) [15]



รูปที่ 2.10 การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะไม่ใช้การกัดแบบแห้ง เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM แต่จะใช้การกัดแบบเปียกแทนเนื่องจากการกัดแบบแห้งนั้นมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนต่อการใช้งาน

## 2.2 สารละลายต่างๆ ที่ใช้ในการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นผลึกซิลิคอน

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

### 2.2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย KOH

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารละลายไม่เป็นพิษ มีราคาที่ถูกและนิยมใช้กันแพร่หลาย การกัดซิลิคอนจะใช้ความเป็นด่างไฮดรอกไซด์ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่สูงและการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกระดับสูง ส่วนพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะเป็นลักษณะขรุขระ แต่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะกัดโลหะอลูมิเนียมอย่างรวดเร็วและไม่นิยมนำไปใช้งานของ MOS หรือ CMOS เนื่องจากพบไอออนของด่างบางส่วนที่หลงเหลืออยู่บนผิวหน้าของโลหะจะแสดงอัตราการกัดของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย KOH

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระนาบ	อัตราการกัด (µm/min)	หมายเหตุ
20% KOH: 80% H <sub>2</sub> O	60	(100)	0.45	อัตราการกัดสูง อุณหภูมิทั่วไป
	80	(100)	1.4	
	100	(100)	4.1	
30% KOH: 70% H <sub>2</sub> O	60	(100)	0.41	พื้นผิวที่เรียบกว่าระดับต่ำ อัตรากัด (110) มากกว่า (100)
	80	(100)	1.3	
	100	(100)	3.8	
	60	(110)	0.62	
	80	(110)	2.0	
	100	(110)	5.8	
40% KOH: 60% H <sub>2</sub> O	60	(100)	0.33	
	80	(100)	1.1	
	100	(100)	3.1	
20% KOH: 80% H <sub>2</sub> O: (IPA)	60	(100)	0.28	ลดอัตราการกัด พื้นผิวเรียบ (100):(111)
	80	(100)	0.96	
	100	(100)	2.9	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรณีใช้เฉพาะเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย KOH(ต่อ)

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระนาบ	อัตราการกัด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	หมายเหตุ
23.4% KOH: 63.3% H <sub>2</sub> O: 13.3% IPA	80	(100) (110)	1.0 0.06	
44% KOH: 56% H <sub>2</sub> O	120	(100) (110) (111)	5.8 11.7 0.02	อุณหภูมิสูง

### 2.2.2 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย EDP

สารละลายเอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกคอล (EDP) สูตรทางเคมี  $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$  เป็นสารละลายไดอะมีนที่เป็นพื้นฐานสำหรับกัดซิลิคอน ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระนาบ (100) ที่อุณหภูมิ  $118^\circ\text{C}$  ประมาณ  $300 \text{ \AA}/\text{s}$  มีอัตราส่วนในอัตราการกัด Si/SiO<sub>2</sub> ที่สูงและระดับการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถใช้งานได้กับงาน MOS หรือ CMOS ได้ นอกจากนี้อัตราการกัดซิลิคอนกับวัสดุอื่นๆ เช่น คาร์ไบด์, ไนไตรต์, ออกไซด์และโลหะมากที่สุด แต่สารละลายเอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกคอลระเหยได้อย่างรวดเร็ว ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือในการกัดที่ซับซ้อนยุ่งยากและต้องระมัดระวังในขณะทำการกัดเพราะสารละลายจะระเหยก๊าซที่ออกมาเป็นพิษ อัตราการกัดของสารละลายเอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกคอล จะแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย EDP

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระนาบ	อัตราการกัด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	หมายเหตุ
500 ml NH <sub>2</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> : 88g C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> : 234 ml H <sub>2</sub> O	110	(100) (110) (111)	0.47 0.28 0.028	สูตร EDP อัตราการกัด > 0.83 $\mu\text{m}/\text{min}$ หลังจากสัมผัส กับออกซิเจน
500 ml NH <sub>2</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> : 160g C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> : 160 ml H <sub>2</sub> O	115	(100)	0.45	อัตราการกัดจะ เร็วต้องใช้ในอุณหภูมิสูง เพื่อหลีกเลี่ยงสารตกค้าง
500 ml NH <sub>2</sub> (CH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> NH <sub>2</sub> : 80g C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> (OH) <sub>2</sub> : 3.6g C <sub>6</sub> H <sub>4</sub> N <sub>2</sub> : 66ml H <sub>2</sub> O	50 75 95 105 110	(100) (100) (100) (100) (100)	0.075 0.22 0.43 0.57 0.75	อัตราการกัดซ้ำเหมาะ สำหรับการใช้อุณหภูมิที่ต่ำ กว่าโดยไม่มีสารตกค้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารทิสวณไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH

สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) สูตรทางเคมี  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$  เป็นสารละลายที่มี quaternary ammonium hydroxide มากที่สุดและเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน มีอัตราการกัดออกไซด์ที่ต่ำมากและจะไม่กัดอลูมิเนียมถ้ามีซิลิเกตจำนวนมากพอ สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้จะมีราคาที่สูงเพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับงาน MOS หรือ CMOS ได้ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง สารละลาย TMAH ที่ทำการกัดซิลิคอนนั้นพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระ แต่เมื่อเจือสารละลาย TMAH ด้วยปริมาณที่เหมาะสมของกรด silicic และ AP (ammonium peroxodisulphate,  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ), ผสมให้ลดการกัดอลูมิเนียมที่สมบูรณ์พร้อมกับพื้นผิวที่เรียบ [20]

ตารางที่ 2.3 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 <sub>2</sub> O	60	(100)	0.28	
	70		0.41	
	80		0.72	
	90		1.2	
	80	(111)	0.014	
2% TMAH: 98% H <sub>2</sub> O	80	(100)	0.65	
		(111)	0.41	
5% TMAH: 95% H <sub>2</sub> O	60	(100)	0.33	
	70		0.48	
	80		0.87	
	90		1.4	
	60	(110)	0.64	
	70		0.74	
	80		1.4	
	90		1.8	
	60	(111)	0.026	
	90		0.034	
22% TMAH + 0.5% surfactant	90	(100)	0.6	(100) ได้เร็วที่สุดด้วยสารลดแรงตึงผิว
		(110)	0.12	
		(111)	0.01	

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.3 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH (ต่อ)

สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระนาบ	อัตราการกัด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	หมายเหตุ
22% TMAH	90	(100)	0.6	ลดแรงตึงผิว
+ 1%		(110)	0.1	
surfactant		(111)	0.009	

ในตารางที่ 2.3 แสดงอัตราการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH สารละลายที่มีความเข้มข้น 4% จะมีอัตราการกัดที่เป็นอิสระ อัตราการกัดซิลิคอนในระนาบ (100) และ (110) จะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายที่สูงขึ้น แต่อัตราการกัดจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณของซิลิคอนที่ละลายในสารละลาย สารละลายจะเลือกกัดระนาบอื่นๆมากกว่าระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย KOH อัตราส่วนของอัตราการกัดในระนาบ (100)/(111) ที่มีความเข้มข้นของสารละลายที่แตกต่างกันและที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีความเข้มข้นของสารละลาย 25% [22]

เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะการกัดของสารละลาย EDP, KOH และ TMAH ในตารางที่ 2.4 การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกจะมีอัตราการกัดที่มากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของวัสดุ เช่น ซิลิกอนออกไซด์ ซิลิคอนไนไตรด์และโลหะอลูมิเนียม การหยุดการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยการเจือสารโบรอนมากในซิลิคอน ( $\text{P}^{++}$  etch stop) หรือการเอนเอียงของรอยสัมผัส P-N (electrochemical etch stop) ปริมาณของโบรอนจะมีผลต่ออัตราการกัดของซิลิคอน ซึ่งทำให้อัตราการกัดนั้นลดลง

ตารางที่ 2.4 เปรียบเทียบอัตราการกัดของสารละลาย

	EDP	KOH	TMAH
Si etch rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	0.75-1.25	1-2	$\approx 1$
$\text{SiO}_2$ etch rate (nm/min)	1-80	1-10	0.05-0.25
$\text{Si}_3\text{N}_4$ 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 <sup>(1)</sup>	no	yes <sup>(2)</sup>
Au selectivity	yes	yes	yes
$\text{P}^{++}$ etch stop [ $\text{cm}^{-3}$ ]	$\text{B} > 7 \times 10^{19}$	$\text{B} > 10^{20}$	$\text{B} > 2 \times 10^{20}$
	ER/50 <sup>(3)</sup>	ER/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  $7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารทรัพย์สินทางปัญญาของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัดของสารละลายแต่ละชนิดนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน การกัดด้วยสารละลาย KOH นั้นเป็นที่รู้จักกันว่าเลือกกัดที่ระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับในการผลิต จะกำหนดและควบคุมการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ แต่สารละลาย KOH ไม่สามารถนำมาใช้ในงาน จำพวก MOS หรือ CMOS เนื่องจากมีสารตกอยู่บนพื้นผิวของวัสดุเป็นไอออนต่าง (โพแทสเซียม,  $K^+$ ) ซึ่งสามารถนำใช้งานภายใต้ทรานซิสเตอร์ MOS และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันและการกัด กร่อนอลูมิเนียม สารละลาย EDP จะมีความน่าสนใจเนื่องจากในขณะที่ทำการกัดนั้นจะไม่มีโซเดียม หรือโพแทสเซียมไอออนตกค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุและไม่เลือกกัดอลูมิเนียม (ยกเว้นในสูตรเฉพาะ อย่างใดอย่างหนึ่ง) แต่มีข้อเสียอย่างอื่น สารละลาย EDP จะเป็นพิษและอันตรายมากมีความยุ่งยาก ในการจัดการ ดังนั้นจึงเหมาะสำหรับการใช้ในงานพวก MOS หรือ CMOS ในโรงงานอุตสาหกรรม ขนาดใหญ่ที่สะดวกต่อการจัดการกับสารพิษ สารละลาย TMAH นี้ จึงเหมาะสมสำหรับทำงานวิจัย และเป็นสารละลายที่รู้จักกันดีเพราะสารละลาย TMAH จะถูกนำไปใช้ในกระบวนการสร้าง IC เป็น การพัฒนาของ positive photoresist อัตราการกัดซิลิคอนนั้นอยู่ในระดับปานกลาง สารละลาย TMAH เหมาะสำหรับการใช้ในงานพวก MOS หรือ CMOS ไม่มีพวกไอออนต่างตกค้างบนพื้นผิวของ วัสดุ ถ้าเจือสารละลายอื่นเพื่อทำการลดอัตราการกัดอลูมิเนียมจะช่วยให้อลูมิเนียมยังคงอยู่ สารละลาย TMAH จะมีอัตราการกัดระนาบ (111),  $SiO_2$  และ  $Si_3N_4$  ต่ำมากสามารถใช้  $SiO_2$  และ  $Si_3N_4$  เพื่อป้องกันการกัดได้ ลักษณะพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะขรุขระกว่าการกัดแบบทั่วไปอื่นๆ [17]

## 2.3 การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก

### 2.3.1 ปฏิกิริยาการกัดซิลิคอน

การกัดซิลิคอนด้วยวิธีที่ประสบความสำเร็จที่สุด คือ การกัดซิลิคอนด้วยสารเคมีหรือกัดด้วย พลาสมา สารเคมีที่กัดกร่อนซิลิคอนได้นั้นมีมากมาย แต่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยต่างผสมกับน้ำ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine), ไฮดราซีน (Hydrazine), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ส่วนก๊าซที่ใช้กัดใน พลาสมา ได้แก่  $CF_4$ ,  $SF_6$ ,  $Cl_2$  และก๊าซฮาโล-หรือฟลูออโร-คาร์บอนอื่นๆ เป็นต้น สารละลายการกัด ดังกล่าวเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกหรือแอนไอโซทรอปิก อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความ เข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลาย สารละลายการกัดเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้น การเลือกสารละลายการกัดที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นด้วย

การกัดซิลิคอนนั้นมีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอน

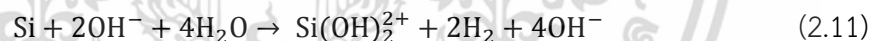
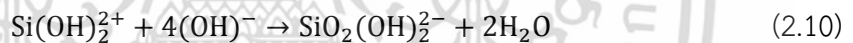
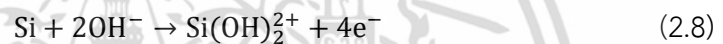
- (1) การฉีกโฮลจากสารละลายเข้าสู่ซิลิคอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ของซิลิคอนเป็น  $Si^+$
- (2) การรวมตัวของอะตอม  $OH^-$  และซิลิคอนประจุบวก เป็นซิลิคอนออกไซด์ที่ละลายน้ำได้
- (3) การรวมตัวของซิลิคอนและองค์ประกอบในสารละลายกลายเป็น complexing agent
- (4) การดึงซิลิคอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิคอนถูกกัดออกไป

จากขั้นตอนทั้งสี่ สารเคมีที่จะกัดซิลิคอนได้ต้องแตกตัวให้โฮลกับซิลิคอนและตัวมันเองต้องมี อะตอมไฮดรอกซิลเกิดขึ้นรวมทั้ง complexing agent นั้นต้องสามารถละลายน้ำได้

สำหรับปรากฏการณ์การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลาย เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) นั้น มีกลไกกระบวนการกัดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (1) สารละลาย TMAH จะลดรูปเป็นไฮดรอกซิล [22]
- (2) อะตอมไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิคอน สำหรับแขนยื่นของซิลิคอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่เพียงแขนเดียวในซิลิคอนระนาบ (111) ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนไนเซชันเพียง 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ปฏิกริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก
- (3) พันธะซิลิคอนหลัก (back bond) ที่ยังไม่ถูกตัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111) ) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น  $\text{Si}(\text{OH})_2^+$  หรือ  $\text{SiOH}^+$  (เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์) ปฏิกริยานี้ถ้าให้พลังงานแก่ผลึกต่างกัน อัตราส่วนการกัดของระนาบต่างๆ จะไม่เท่ากัน ที่อุณหภูมิใกล้เคียงแต่อดอัตราการระนาบ (110) : (100) : (111) เท่ากับ 160 : 100 : 1 แต่ที่อุณหภูมิห้องจะเท่ากับ 50 : 30 : 1
- (4) ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย
- (5) กรด Orthosilic acid แตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการเคมีนี้



### 2.3.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน

ในระนาบต่างๆ ของซิลิคอน จะมีจำนวนพันธะที่ถูกตัดออกไปก่อนหน้า (เหลือเป็นแขนยื่น) จำนวนพันธะที่กำลังถูกกัด และจำนวนพันธะที่ถูกดึงออกสู่สารละลายเป็นขั้นตอนต่อไปไม่เท่ากัน กล่าวคือ

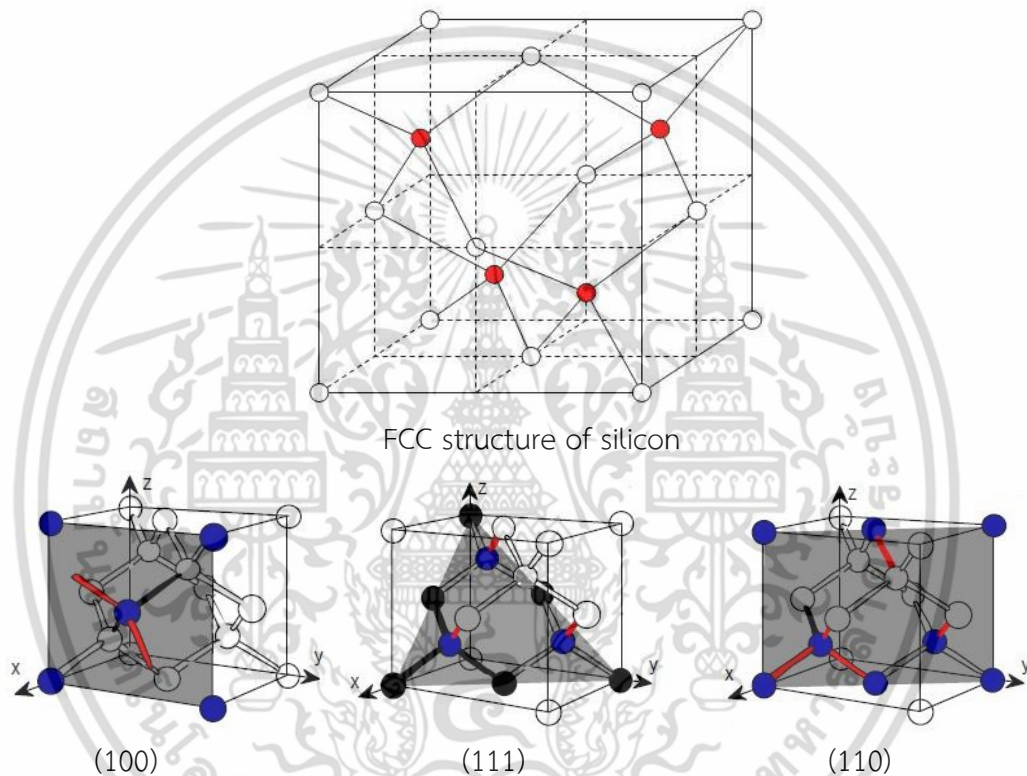
- (1) ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ
- (2) ระนาบ (111) จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้านั้น จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด
- (3) ระนาบ (110) จะมีสามอะตอมอยู่ที่ผิวหน้า หนึ่งอะตอมอยู่ที่ผิวหน้าและหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า แม้ว่าจะมีสองอะตอมที่มีพันธะร่วมกับ อะตอมตรงกลางที่อยู่บนผิวหน้า แต่ที่ล้วนเป็นอะตอมที่อยู่ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดออกไปพร้อมกัน

สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ สารละลาย เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

และ น้ำปอลดประจุ มีชื่อย่อว่า (TMAH) เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดเปียกแบบแอนไอโซเทรป และน้ำปอลดประจุ มีชื่อย่อว่า (TMAH) เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดเปียกแบบแอนไอโซเทรป เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นใบนี้ขอสงวนสิทธิ์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้โดยไม่ผ่านการอนุญาต ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรอปิก อัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนในระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้  $(110) > (100) > (111)$  [15]

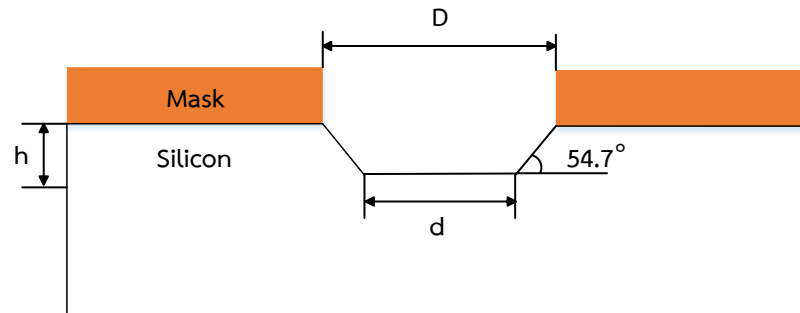
เนื่องจากสารละลาย TMAH เป็นสารละลายที่ทำการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โครงสร้างของสารละลาย TMAH ต้องเพิ่มอุณหภูมิช่วยในการกัดระนาบของซิลิคอน เพื่อให้สารละลาย TMAH ทำการกัด ควรรู้ว่าโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือโครงสร้างอะตอมประกอบเท่ากับ  $5.43 \text{ \AA}$  เป็นโครงสร้างแบบ Face Centred Cubic (FCC) หรือเรียกว่า โครงสร้างแบบ Diamond แต่มีอะตอมสองอะตอมในหน่วยเซลล์ ในรูปที่ 2.11 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนและ ระนาบต่างๆของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.11 ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic) พันระนาบอะตอมซิลิคอน ระนาบ (100), ระนาบ (111) และระนาบ (110)

ร่องรูปตัวยูที่ เกิดจากการกัดเมื่อเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ไม่เหมือนกัน จะมีความแตกต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการกัดช้าที่สุด สำหรับแผ่นผลึกซิลิคอนระนาบ (100) ถ้าเปิดช่องเลือกกัดเป็นวงกลม ร่องรูปตัวยูที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังสองด้านเอียงทำมุม  $54.74$  องศาขนานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง (110) ระนาบนั้นคือระนาบ (111) และยังมีระนาบ (100) ร่วมกันประกอบเป็นผนัง แต่ถ้าเปิดบริเวณเลือกกัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านตั้งขนานกับทิศทาง (110) จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (111) ทั้งหมด พื้นที่หลุมจะเป็นระนาบ (100) โดยความสัมพันธ์ของเลขาคณิตที่แน่นอนของระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังรูปที่ 2.12 การกัดของระนาบ (100) [17]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.12 ลักษณะของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีขนาดของมุม 54.7°

$$D = d + \frac{2h}{\tan(54.74^\circ)} \cong d + \sqrt{2}h \quad (2.11)$$

$$h = Rt \quad (2.12)$$

เมื่อ  $D$  คือ ขนาดของความกว้างของปากหลุม

$d$  คือ ขนาดของความกว้างในหลุม

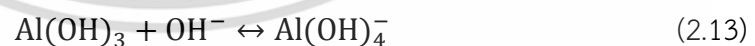
$h$  คือ ขนาดความลึกของหลุม

$R$  คือ อัตราการกัดในแนวตั้งของซิลิคอน

$t$  คือ เวลา

### 2.3.3 ปฏิกริยาการกัดอลูมิเนียม

การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกมีความสำคัญมีความต้องการเลือกใช้อลูมิเนียมเป็นชั้น metallization ฟิล์มอลูมิเนียมจะถูกควบคุมด้วยสารละลายที่เป็นกรดและต่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงอลูมิเนียมไม่สามารถรักษาชั้นออกไซด์  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ซึ่งทำปฏิกิริยาในสารละลายต่างอลูมิเนียมตั้งสมการที่ (2.13)



การลดลงของค่าความเป็นกรด-ด่างโดยซิลิคอนการเปลี่ยนแปลงสมดุลเคมีไปทางด้านซ้ายของสมการเกิดปฏิกิริยาการเลือกของอลูมิเนียมออกไซด์ในการกัดด้วยสารละลาย TMAH เพิ่มขึ้นด้วยซิลิคอนเราได้พิจารณาแล้วว่าในช่วงการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย TMAH เป็นซิลิคอนเสมอจำเป็นสำหรับฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิเกตในสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับ  $\text{Al}(\text{OH})_3$  ในรูปแบบซิลิเกต pyrophyllite-type ที่ละลายได้น้อยซึ่งพื้นผิวอลูมิเนียมออกไซด์ [23]

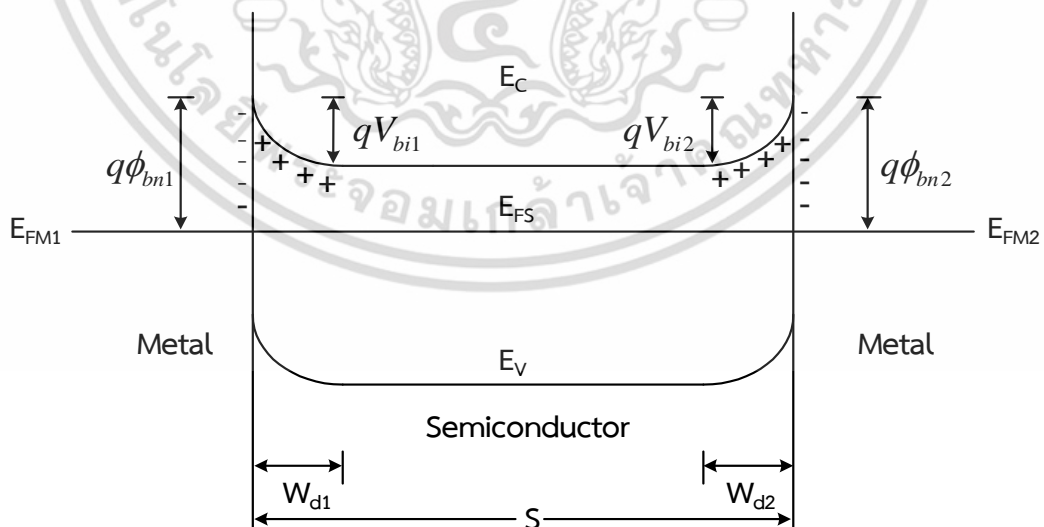
## 2.4 ตัวตรวจวัดแสง

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

โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาตัวตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติเด่นคือ มีเสถียรภาพที่ดี กระจายรั่วไหลต่ำ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดี กระบวนการสร้างง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถนำไปใช้ทางด้านงานภาพและแสงได้อย่างกว้างขวาง จึงทำให้ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสง

### 2.4.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล

แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง ในสภาวะสมดุลความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.13 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้ง โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ของขั้วแคโทด ( $\phi_{bn1}$ ) และขั้วแอโนด ( $\phi_{bn2}$ ) มีขนาดเท่ากันหรือ  $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$  กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด ( $V_{bi1}$ ) และขั้วแอโนด ( $V_{bi2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$  และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_{d1}$ ) และด้านแอโนด ( $W_{d2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $W_{d1} = W_{d2} = W_d$  ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร



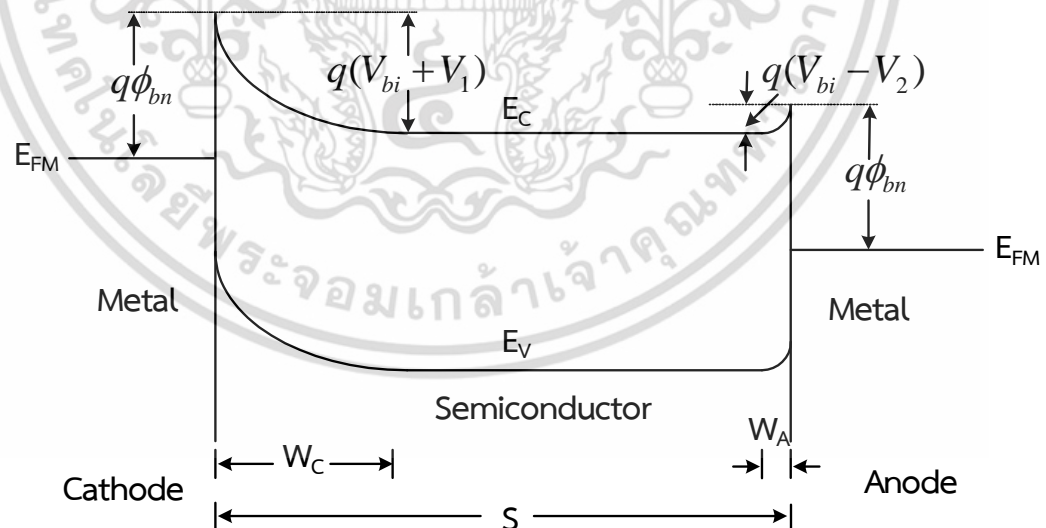
รูปที่ 2.13 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 2.4.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.14 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น  $V_{bi} + V_1$  อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคติงไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ( $I_{SM}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคติง ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ  $V_{bi} - V_2$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{MS}$ ) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current :  $I_{dark}$ ) ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคติง โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคติง จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก

ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคติง กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามินขนาดกว้าง จะพิจารณาให้มีความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณปลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

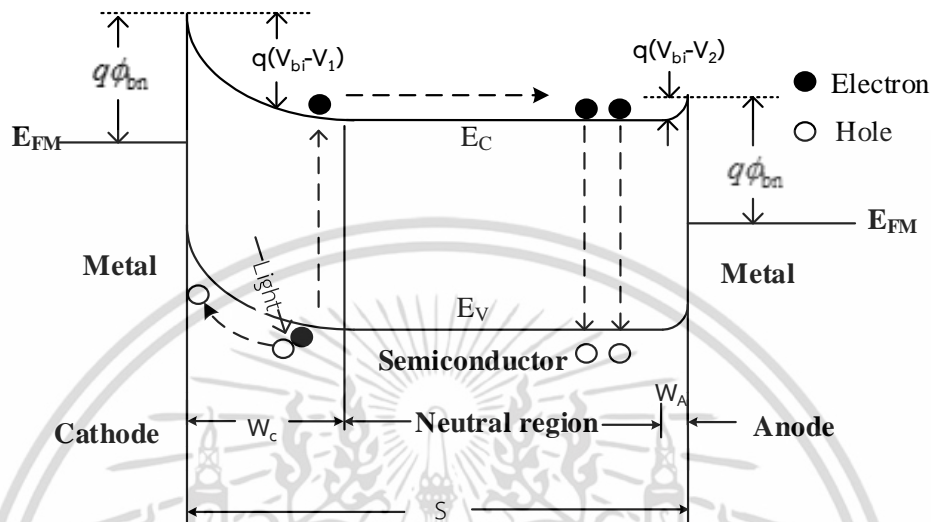


รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบบ

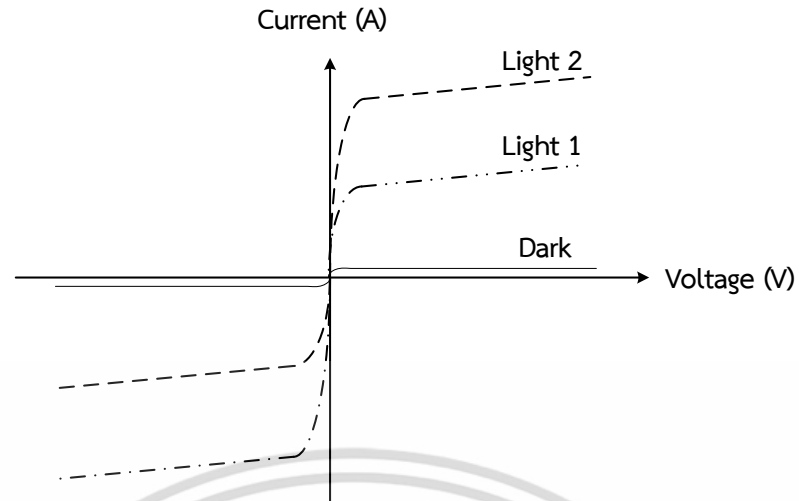
เมื่อโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น ได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 แถบพลังงานของตัวตรวจวัด เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบบ

เมื่อแสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu \geq E_g$ ) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent :  $I_{photo}$ ) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [5,26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

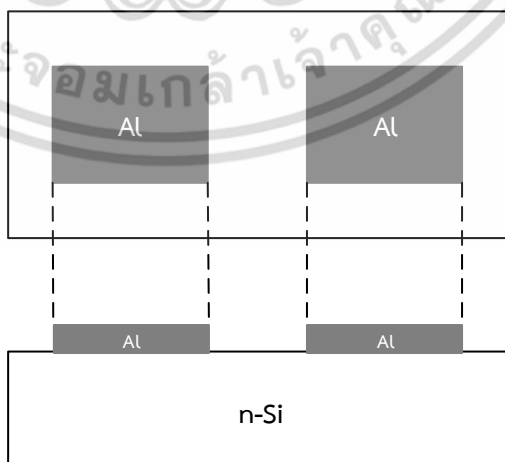
### กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงการศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบร่องรูปตัวยู หรือ U-shape ด้วยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH เพื่อทดสอบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างลักษณะแบบร่องรูปตัวยู

#### 3.1 ลวดลายสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสง

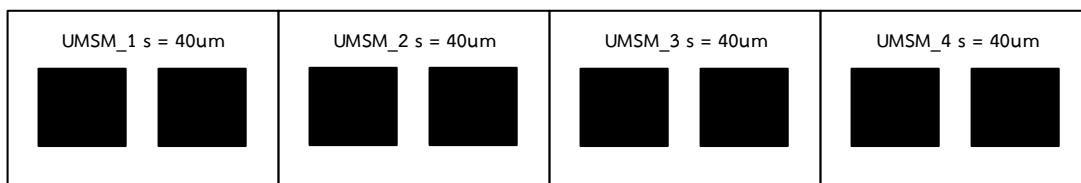
เมื่อได้เงื่อนไขที่ใช้ในการศึกษาทั้งหมดแล้ว จึงเริ่มการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเพื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกก่อนกระบวนการสร้างทั้งหมด การออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงเงื่อนไข และข้อจำกัดต่างๆที่ต้องการการศึกษา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X5 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ออกแบบทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์มป้องกันแสง และไปติดบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป

โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสชนิดออตต์กี 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ  $1 \text{ mm}^2$  มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านมีขนาด  $40 \text{ }\mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 และ รูปที่ 3.2 แสดงลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดออตต์กี



รูปที่ 3.1 ลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.2 ลวดลายกระจกต้นของตัวตรวจวัดแสง

### 3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตัวนำยิ่งยวด ในงานวิจัยนี้ถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100 nm

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงสองโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตัวนำยิ่งยวด AL/n-Si/Al ประกอบด้วยกระบวนการสร้าง 4 กระบวนการคือ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, กระบวนการอาร์เอฟสเปคเตอริงเพื่อสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียม, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายตัวตรวจวัดแสง และกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกโดยแต่ละขั้นตอนนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 1. กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบไขมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะทำเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด และถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลงได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อัลตราโซนิก (ultrasonic) แผ่นผลึกซิลิคอนในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (de-ionization water: DI water) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดปिरินยา ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ : piranha) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในไตรโคโลเอทอีลีน (trichloroethylene) เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกจำพวกไขมัน
- อัลตราโซนิกแผ่นผลึกซิลิคอนในอะซิโตน (acetone)
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid: HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native oxide) บนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในอากาศ
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

## 2. กระบวนการสปัตเตอริง

กระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริง (RF sputtering) เป็นกระบวนการเพื่อสร้างชั้นของโลหะอลูมิเนียมหนาประมาณ 2  $\mu\text{m}$  โดยที่หลักการของการสร้างชั้นอลูมิเนียมด้วยกระบวนการสปัตเตอริง คือ ในระบบสุญญากาศจะประกอบไปด้วยแผ่นคู่ขนาน ด้านหนึ่งคือเป้าอลูมิเนียมหรือขั้วคาโทด ส่วนอีกด้านหนึ่งคือฐานรองซิลิคอนหรือขั้วแอโนด เมื่อป้อนก๊าซอาร์กอนหรือจ่ายกำลังงานให้เกิดการสร้างพลาสมาเพื่อให้เกิดอาร์กอนไอออน ในบริเวณพลาสมาอาร์กอนไอออนจะถูกเร่งเข้าสู่เป้าอลูมิเนียม ระหว่างที่อาร์กอนไอออนถูกเร่งจะได้รับโมเมนตัมและเข้าชนเป้าโครเมียม อะตอมของอลูมิเนียมเมื่อถูกอาร์กอนไอออนชนก็จะได้รับการถ่ายทอดโมเมนตัมและหลุดออกมาจากเป้าวิ่งเข้าสู่แผ่นฐานรองซิลิคอนควบแน่นเป็นชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียม

## 3. กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงานเพื่อสร้างลวดลายขั้วโลหะอลูมิเนียมด้วยกระจกต้นแบบ ที่เรียกว่า โฟโตมาสก์ (photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ที่ได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวอลูมิเนียม จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นอลูมิเนียมบริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นอลูมิเนียมขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นออก ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงแห้ง
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer)
- จุ่มในน้ำ DI

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

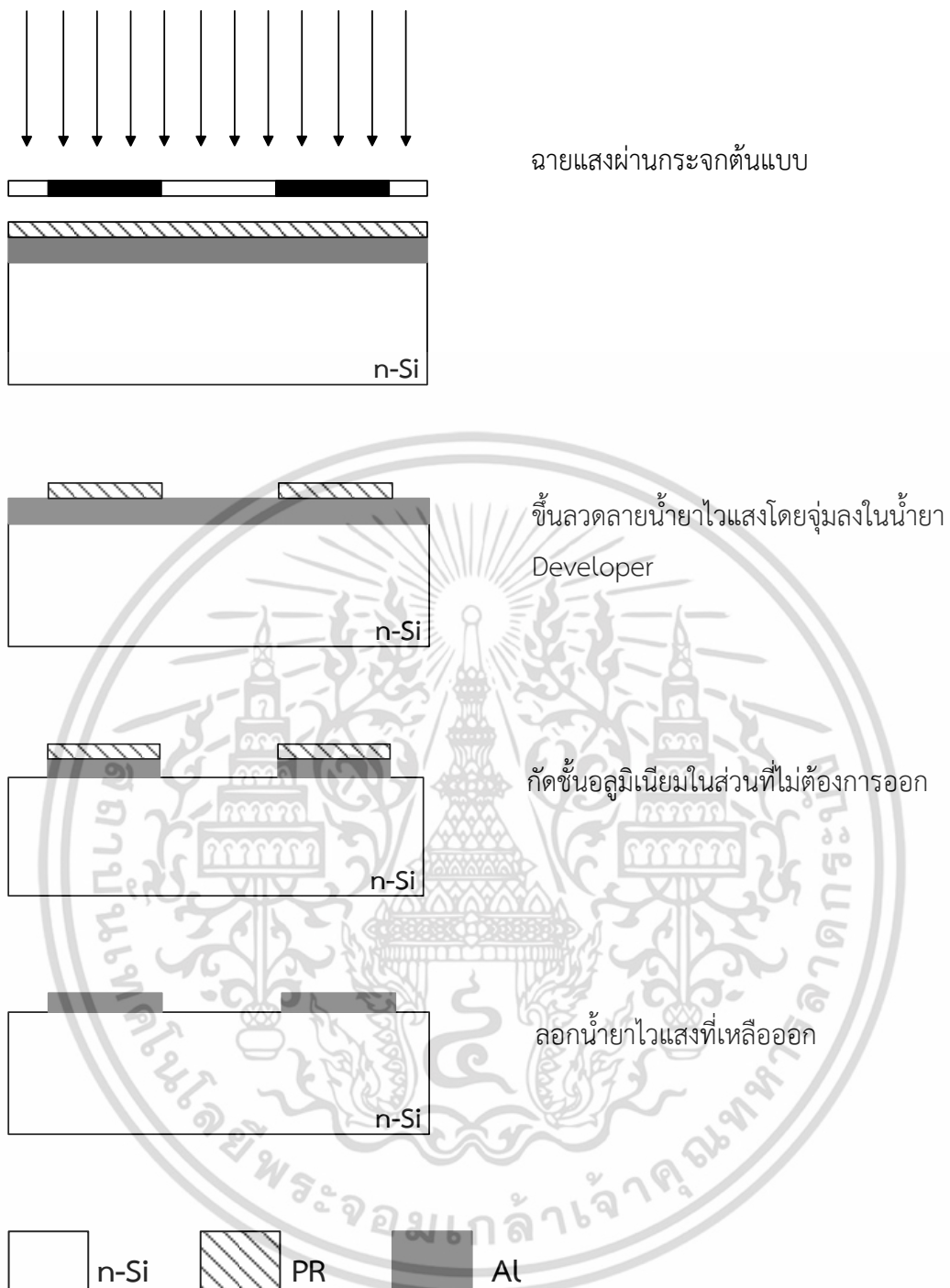
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้หน้ายาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- กัดชั้นอลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม โดยใช้สารละลายกัดชั้นอลูมิเนียม มีส่วนผสมของ  $H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : DI$  ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 โดยจุ่มลงในสารละลายกัดชั้นอลูมิเนียมที่อุณหภูมิ 40 °C เป็นเวลา 10-20 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในอะซิโตน เพื่อล่อน้ำยาไวแสงที่เหลือออก
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

โดยกระบวนการสร้างต่างๆ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.3 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 (ต่อ)กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

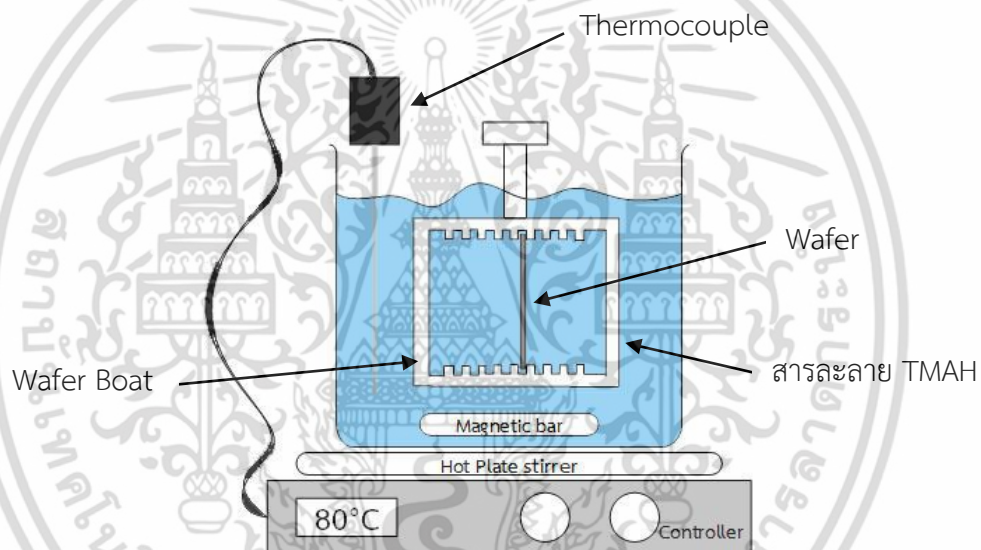
#### 4. กระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอน

กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนจะใช้สารละลาย TMAH โดยมีความเข้มข้น 25 wt% ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยมีเงื่อนไขการกัดดังนี้

- (1) กัดด้วยสารละลาย TMAH มีความเข้มข้น 25 wt%

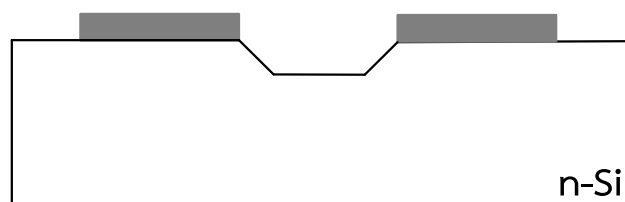
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (2) ผสมสารละลาย TMAH กับน้ำ DI มีอัตราส่วนเท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 เพื่อจะทดสอบส่วนผสมที่มีอัตราการกัด
- (3) เลือกส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่มีอัตราการกัดมากที่สุด โดยผงซิลิคอนจะมีปริมาณเท่ากับ 15, 25, 37.5, และ 50 กรัมต่อลิตร เพื่อลดอัตราการกัดอลูมิเนียมที่เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจแสง โดยจะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้ แสดงให้เห็นดังรูปที่ 3.4
- ผสมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O (1:2)
  - ต้มสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O (1:2) ที่ผสมผงซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว ที่อุณหภูมิ 80 °C
  - นำแผ่น n-Si/Al ที่ได้หลังจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีมาทำการกัดซิลิคอน
  - จุ่มใน DI
  - เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



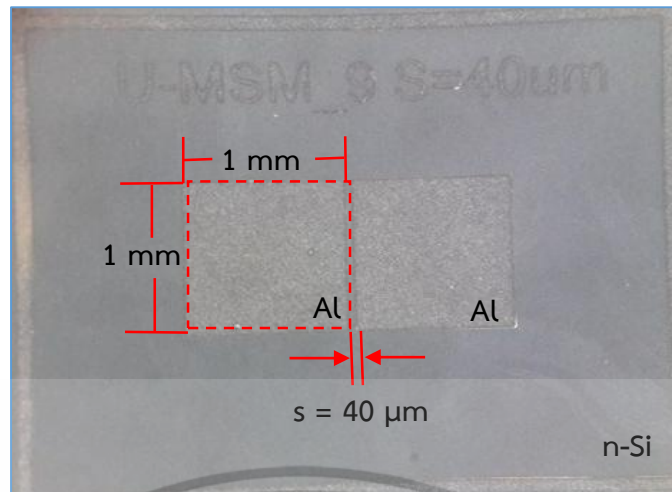
รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ใช้สำหรับกระบวนการกัดตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดแสดงให้เห็นในรูปที่ 3.5, 3.6 และชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำไปเชื่อมต่อขา ดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.5 ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดแบบเปียก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.6 ตัวอย่างตัวตรวจวัดแสงหลังจากผ่านกระบวนการกัด มีขนาดขั้วไฟฟ้า เท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า(s) เท่ากับ  $40 \text{ μm}$



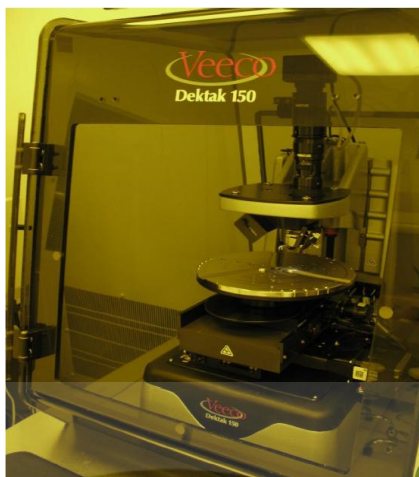
รูปที่ 3.7 ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำไปเชื่อมต่อขา

### 3.3 การทดลอง

#### 3.3.1 เครื่องมือวัดค่าความลึก Profilometer

จากนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดแล้ว นำไปวัดความลึกด้วยเครื่อง Profilometer ของบริษัท Veeco รุ่น Dektak 150 แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยเครื่องมือวัดความหยาบผิว (Surface Roughness) โดยใช้ปลายวัด (Stylus) ลากไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด จากนั้นเครื่องจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นค่าคุณสมบัติของผิว (Surface Parameter) ซึ่งแต่ละค่าล้วนได้มาจากการคำนวณทั้งหมด และเครื่องจะแปลผลออกมาในรูปแบบกราฟ ซึ่งเรียกว่า เส้นรูปทรง (Profile) หมายถึง เส้นที่เกิดการตัดกันของระนาบตัด (Sectioning Plane) หรือระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นผิวตัดกับระนาบของพื้นผิว[29]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 เครื่อง Profilometer บริษัท Veeco รุ่น Dektak 150

### 3.3.2 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH Meter)

สารละลาย TMAH ในการทดลองนี้มีค่าความเป็นกรด-เบสที่ต่างกันซึ่งอาจจะมีผลต่อตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้น จึงต้องวัดค่าความเป็นกรด-เบสของสารละลาย TMAH โดยใช้เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-เบส รุ่น Model PH900 ดังรูปที่ 3.8 ประกอบด้วย ส่วนสำคัญ 2 ส่วน ที่ทำให้เครื่องสามารถทำงานได้ครบวงจร ส่วนประกอบทั้ง 2 คือ อิเล็กโทรด และตัวเครื่อง

อิเล็กโทรด ทำหน้าที่เป็นภาคตรวจรับ ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนในสารละลายที่ pH 7 (Standard pH Buffer) ความต่างศักย์ระหว่างอิเล็กโทรดทั้ง 2 คือ อิเล็กโทรดอ้างอิงกับอิเล็กโทรดตรวจวัด จะมีค่าความต่างศักย์เท่ากับศูนย์มิลลิโวลต์ (0 MV) ถ้าความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้นหรือลดลง ความต่างศักย์ก็จะเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามความเข้มข้นของ ไฮโดรเจนไอออนในสารละลายนั้น โดยมีอิเล็กโทรดเป็นตัวทำหน้าที่รับสัญญาณ

ตัวเครื่อง pH Meter ก็คือ Potentiometer หรือ Volt Meter ทำหน้าที่สำคัญ 3 ประการ คือ (1) ปรับความต่างศักย์ให้กับอิเล็กโทรดอ้างอิง ให้มีค่าความต่างศักย์เป็นศูนย์และคงที่ (2) แปลงสัญญาณจากความต่างศักย์ของไอออนของอิเล็กโทรดให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (3) ขยายสัญญาณค่าความต่างศักย์ทางไฟฟ้า ให้เพิ่มมากขึ้นอย่างเพียงพอให้แสดงผลที่มิเตอร์ แบบเข็ม หรือตัวเลข

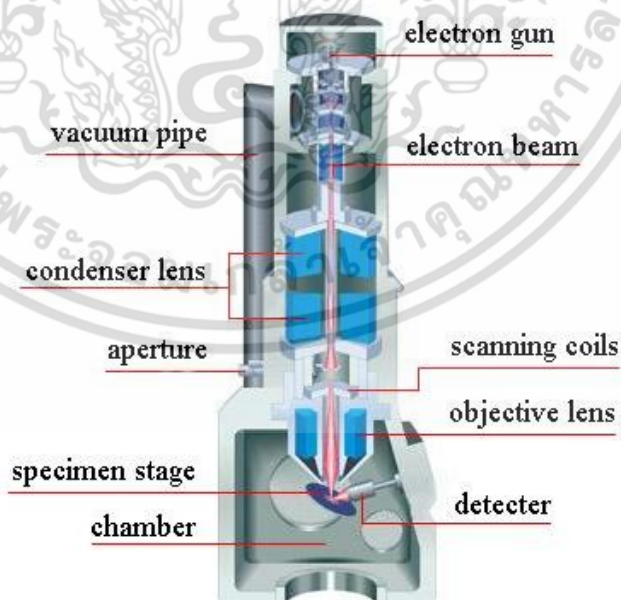
การวัดสภาพความเป็นกรด หรือเป็นด่างของสารละลาย ที่มีน้ำเป็นตัวทำละลาย (Aqueous Solution) โดยใช้หลักการ Electrochemistry โดยวัดความต่างศักย์ที่เกิดขึ้น (Potential) ระหว่างอิเล็กโทรดอ้างอิง (Reference Electrode) กับอิเล็กโทรดตรวจวัด (Sensing Electrode) ความต่างศักย์ที่ได้เกิดจากจำนวนของไฮโดรเจนไอออน ( $H^+$ ) ความต่างศักย์ที่เกิดจากไอออน (Ionic Potential) จะถูกเปลี่ยนให้เป็นความต่างศักย์ทางไฟฟ้า (Electronic Potential) แล้วขยายให้มีความต่างศักย์สูงขึ้นด้วยเครื่อง pH Meter (Potentiometer) [27-28]



รูปที่ 3.9 เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง รุ่น Model PH900

### 3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่อง

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของวัสดุชิ้นงานในระดับจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่าถึงระดับ 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 – 100 นาโนเมตร นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยังใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี



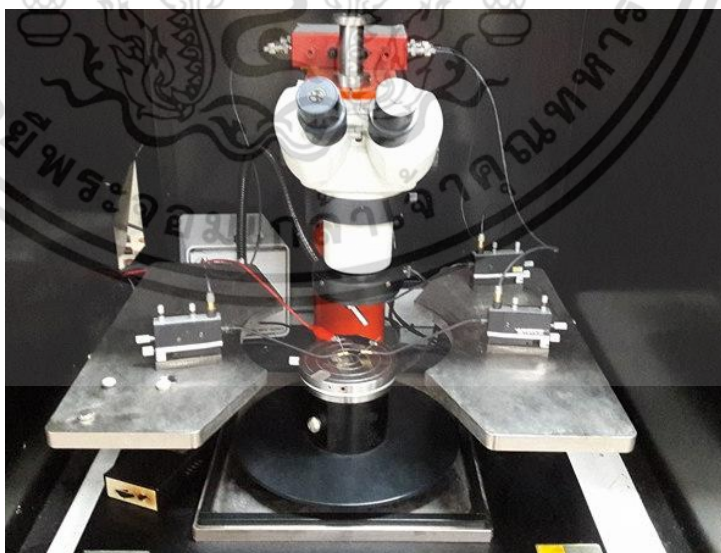
รูปที่ 3.10 ส่วนประกอบของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)[30]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้อิเล็กตรอนแทนแสงโดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงให้ขดลวดทั้งสแตนท์ ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา แล้วจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามลำกล้อง ซึ่งภายในลำกล้องต้องเป็นสภาพสุญญากาศเพื่อที่จะให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยไม่สูญเสียพลังงาน ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) อย่างน้อย 2 ชุด และปริมาณอิเล็กตรอนถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีขนาดต่างๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกๆ ที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากรังกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนจะเกิดสัญญาณต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและ SEM จะมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณและส่งไปประมวลเป็นภาพแสดงบนจอต่อไป[30-31]

### 3.3.4 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

ตัวตรวจวัดแสงและข้อต่อคีย์ไดโอดที่สร้างขึ้นนั้นมีลักษณะโครงสร้างเป็น Al/n-Si/Al เมื่อสร้างเสร็จเรียบร้อยแล้วทำการวัดค่ากระแส-แรงดัน โดยใช้เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 3.11 ในการวัดค่ากระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงจะถูกป้อนแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 ถึง 10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 V



รูปที่ 3.11 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.5 การวัดการตอบสนองทางแสง

การวัดการตอบสนองทางแสงนั้น ทำการวัดโดยใช้ หลอดฮาโลเจน ที่สามารถปรับสว่างของแสงที่ตกกระทบชิ้นงานได้ตั้งแต่ช่วง 5000 lux ถึง 25000 lux โดยการวัดการตอบสนองทางแสง โดยทำการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง -10 ถึง 10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 ทำการวัดกระแสที่ได้จากการไบอัสในช่วงต่าง ด้วยเครื่อง KEITHLEY 2400 นอกจากนี้ยังทำการวัดขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบโดยใช้หลักการจ่ายแรงดันแบบเดียวกับขณะได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของกระบวนการกัดเพื่อใช้สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้เครื่อง Profilometer เพื่อศึกษาความลึกของการกัดด้วยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ด้วยเงื่อนไขการผสมสารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 และเมื่อเติมผงซิลิคอนลงในสารละลายด้วยปริมาณ 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร เพื่อลดการกัดอลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง การวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายที่มีผลต่อการกัดพื้นผิวของซิลิคอน และจากการวัดลักษณะทางไฟฟ้าต่างๆ เช่น สมบัติกระแส-แรงดันไฟฟ้า (I-V characteristics) สมบัติการตอบสนองต่อสัญญาณแสงแบบกระแสตรงที่มีความเข้มแสงคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงค่าความเข้มแสงเป็นต้นมาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่อไป

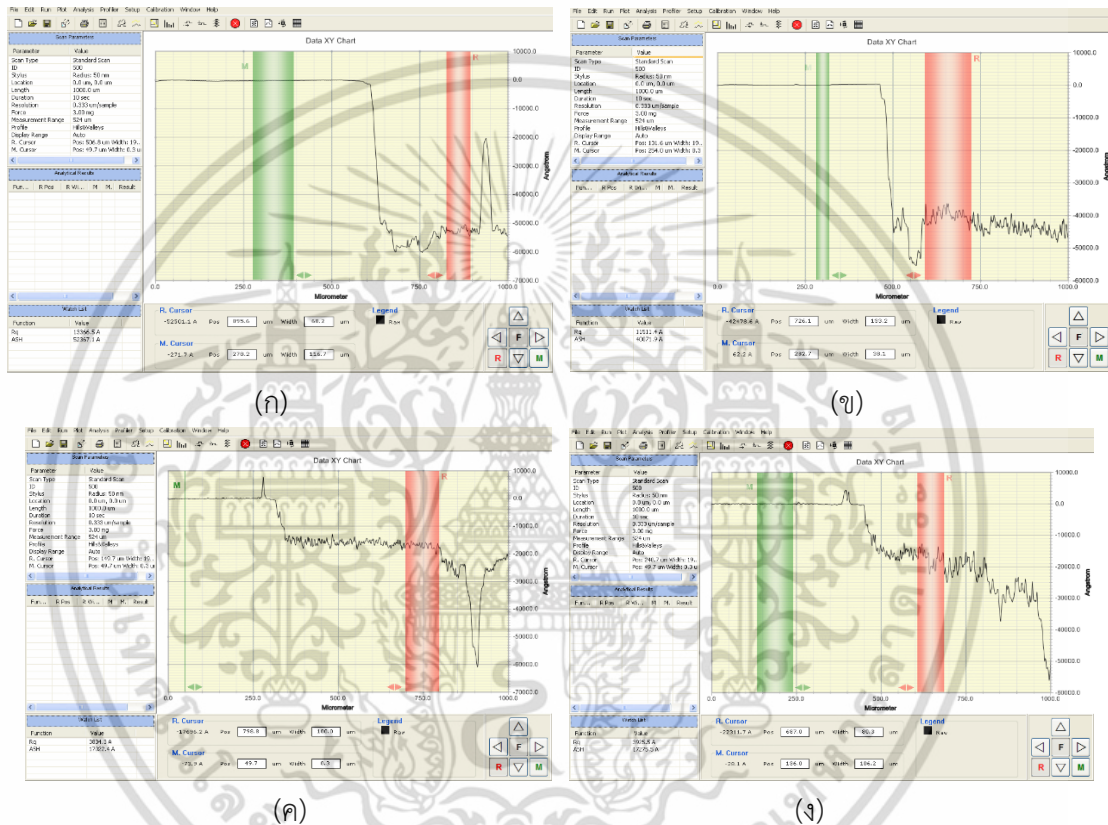
#### 4.1 การศึกษาการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยการกัดของสารละลาย TMAH

ในหัวข้อนี้จะศึกษาความลึกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH, TMAH:H<sub>2</sub>O และผสมผงซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH ในช่วงเวลาที่ทำกรกัดเป็น 1, 3, 6 และ 9 นาที ซึ่งจะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกสูงมากโดยซิลิคอนนั้นเป็นระนาบ (100) จะมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยู โดยจะทดสอบความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านการกัดแล้วด้วยเครื่อง Profilometer จะแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1

##### 4.1.1 การกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH โดยการวัดค่าความลึกด้วยเครื่อง Profilometer

จากรูปที่ 4.1 จะเห็นว่าความลึกของแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดนั้น จะสามารถเห็นได้อย่างชัดเจนในด้านขวาของกราฟความลึกของแผ่นผลึกซิลิคอนได้ผ่านการกัดในสารละลาย TMAH แล้วซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับด้านซ้ายของกราฟแผ่นซิลิคอนที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการกัด แสดงให้เห็นถึงความลึกของการกัดแผ่นผลึกซิลิคอน จากรูปที่ 4.1 (ก) สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O (1:2) อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนนั้นจะมากที่สุดมีค่าความลึกเท่ากับ 5.31  $\mu\text{m}$  แต่เมื่อเติมน้ำเพิ่มขึ้นจนเป็น 5 เท่าของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนลดน้อยลงเรื่อยๆ โดยที่สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O (1:3) มีค่าความลึกเท่ากับ 4.14  $\mu\text{m}$ , TMAH:H<sub>2</sub>O (1:4) มีค่าความลึกเท่ากับ 2.16  $\mu\text{m}$  และ TMAH:H<sub>2</sub>O (1:5) มีค่าความลึกเท่ากับ 1.80  $\mu\text{m}$  ซึ่งเป็นเพราะสารละลาย TMAH ที่เติมน้ำเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายนั้นเปลี่ยนแปลงไป จึงทำให้อัตราการกัดของแผ่นซิลิคอนนั้นลดลงไปด้วย

เมื่อเปรียบเทียบการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ด้วยอัตราส่วนต่างๆ นั้นที่อัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เป็น 1:2 มีค่าความลึกของการกัดแผ่นซิลิคอนเป็น 3 เท่าของอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เป็น 1:5 ซึ่งในงานวิจัยนี้เราต้องการกัดแผ่นซิลิคอนให้มีความลึกโดยให้มีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูจึงเลือกอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เป็น 1:2 เป็นอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมกับงานวิจัย และจะทำการทดลองต่อเพื่อหาอัตราส่วนของสารละลาย TMAH เนื่องจากสารละลาย TMAH นั้นทำการกักอุณหภูมิที่มากจึงทำให้ต้องการหาอัตราส่วนผสมของสารละลายที่ทำการกัดซิลิคอนได้ความลึกที่เหมาะสม



รูปที่ 4.1 ตัวอย่างการวัดความลึกของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยมีอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ต่างๆ ด้วยเครื่อง Profilometer  
 (ก) สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:2  
 (ข) สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:3  
 (ค) สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:4  
 (ง) สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:5

ในทางกายภาพการกัดแผ่นซิลิคอนทางไมโครเทคนิคเป็นอัตราการกัด (etch rate,  $r$ ) ซึ่งเป็นอัตราส่วนของความหนาของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด (material thickness,  $h_{etch}$ ) และเวลาในการกัด (etching time,  $t_{etch}$ ) [43] เป็นดังสมการที่ 4.1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

เมื่อวัดค่าความลึกของแผ่นผลึกซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยละลาย TMAH และ TMAH:H<sub>2</sub>O ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ นั้น พบว่าอัตราการกัดของแผ่นผลึกซิลิคอนโดยสารละลาย TMAH จะมีอัตราการกัดซิลิคอนที่น้อย แต่เมื่อเติมน้ำในสารละลายเป็น TMAH:H<sub>2</sub>O ที่มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:2 จะสามารถทำให้อัตราการกัดของแผ่นผลึกซิลิคอนนั้นมีความลึกมากที่สุด ซึ่งจะมีอัตราการกัดของแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 0.59  $\mu\text{m}/\text{min}$

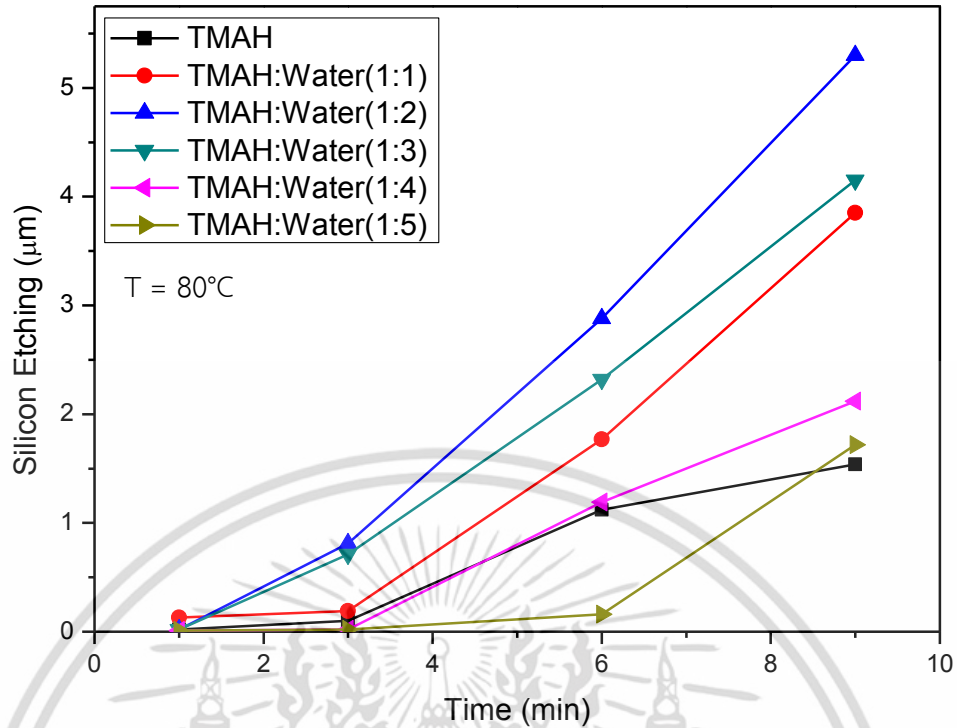
เนื่องจากการเติมน้ำในสารละลาย TMAH จึงทำให้มีการแตกตัวของน้ำเพิ่มขึ้นและทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) เพิ่มขึ้นด้วย ไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับซิลิคอน ซึ่งจะให้อะตอมซิลิคอนหลุดออกมารวมตัวกับไฮดรอกไซด์กลายเป็น Si(OH)<sub>2</sub><sup>+</sup> หรือ SiOH<sub>3</sub><sup>-</sup> (เรียกว่าซิลิคอนไฮดรอกไซด์) เมื่อซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับอะตอมซิลิคอนกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนและถูกดึงออกสู่สารละลาย และกรด Orthosilic acid แตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจนซึ่งจะเป็นไปตามสมการที่ (4.2) ที่กล่าวไว้ย่อในบทที่ 2 สมการที่ (2.10)



การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH และสารละลาย TMAH ที่เติมน้ำเป็น 1 เท่าของสารละลายนั้นจะมีการกัดน้อยกว่าสารละลายที่เติมน้ำตั้งแต่ 2 เท่าของสารละลายขึ้นไป เนื่องจากสารละลายที่ไม่ได้เติมน้ำและเติมน้ำเป็น 1 เท่าของสารละลายจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงซึ่งไฮดรอกไซด์มากแต่ไฮดรอกไซด์นั้นจะไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากการรวมตัวของไฮดรอกไซด์กับซิลิคอนที่หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นผลึกซิลิคอนมากกว่าทำให้เกิดเป็นกรด Orthosilic acid ที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

แต่เมื่อเติมน้ำในสารละลาย TMAH เพิ่มมากขึ้นเป็น 2 เท่าของสารละลายทำให้การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายนั้นมีค่าลดลงทำให้ไฮดรอกไซด์ลดลงด้วย จึงทำให้เกิดปฏิกิริยาของซิลิคอนไฮดรอกไซด์กับไฮดรอกไซด์น้อยลงและมีการรวมตัวของไฮดรอกไซด์กับซิลิคอนเพิ่มขึ้นทำให้การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนเพิ่มมากขึ้นด้วย

เมื่อเติมน้ำในสารละลายมากขึ้นกว่า 2 เท่าของสารละลาย TMAH เป็น 3-5 เท่าของสารละลาย การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนของสารละลายเริ่มน้อยลงเรื่อยๆ เนื่องจากการเติมน้ำเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายลดลงเรื่อยๆ ทำให้ไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากสารละลาย TMAH น้อยลงส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนน้อยลง แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.2 เป็นการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ไม่เติมน้ำและเติมน้ำเป็น 1-5 เท่าของสารละลาย และตารางที่ 4.1 แสดงอัตราการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ไม่เติมน้ำและเติมน้ำเป็น 1-5 เท่าของสารละลาย



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่มีอัตราส่วนและเวลาในการกัดซิลิคอน

ตารางที่ 4.1 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนโดยสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ต่างๆ

อัตราส่วนของ TMAH:H <sub>2</sub> O	ร้อยละโดยมวล (wt%)	อัตราการกัดแผ่นซิลิคอน (µm/min)
1:0	25	0.17
1:1	12.5	0.43
1:2	8.3	0.59
1:3	6.3	0.46
1:4	5	0.24
1:5	4.2	0.20

ดังนั้นในการศึกษาการกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH โดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆ ในการทดลอง เพื่อหาค่าความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดจึงแสดงให้เห็นได้ชัดเจนดังตารางที่ 4.1 ด้วยอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ต่างๆ จะมีอัตราการกัดที่เพิ่มขึ้นและค่อยๆ ลดลงเมื่อเติมน้ำในสารละลายมากขึ้นเป็น 3 เท่าของสารละลายขึ้นไป อัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ที่มีอัตราการกัดซิลิคอนที่มากที่สุดคืออัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เป็น 1:2

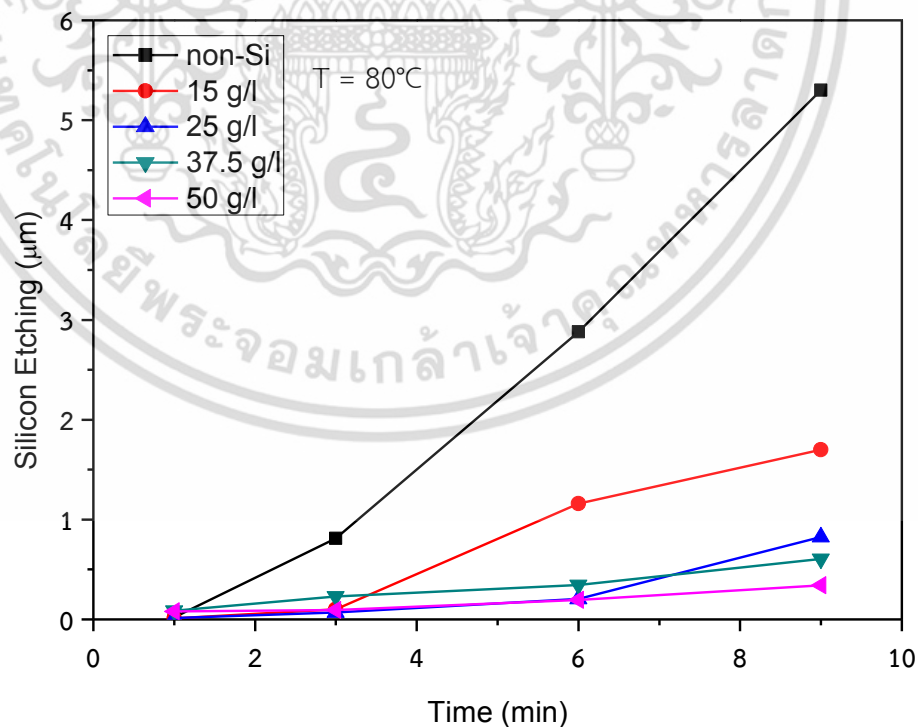
#### 4.1.2 การกัดซิลิคอนโดยเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH

จากการศึกษาความลึกของแผ่นซิลิคอนด้วยการเติมน้ำในสารละลาย TMAH โดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆ ซึ่งอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ที่มีอัตราการกัดมากที่สุด ได้นำมาศึกษาต่อในการเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH เพื่อเป็นการลดอัตราการกัดของสารละลาย TMAH

ดังนั้นในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย TMAH โดยการเติมผงซิลิคอนด้วยปริมาณที่เท่ากับ 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.3 การเติมผงซิลิคอนทำให้อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TMAH นั้นลดลง จะเห็นได้ว่าการเติมผงซิลิคอนที่มีปริมาณที่มากขึ้นจะทำให้การกัดแผ่นซิลิคอนนั้นน้อยลง เนื่องจากการที่เติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH ทำให้ไอออนไฮดรอกไซด์ที่เกิดขึ้นไปทำปฏิกิริยากับผงซิลิคอนที่เติมลงไปซึ่งซิลิคอนที่เติมลงไปนั้น ซึ่งอาจจะเกิดจากพันธะที่ยึดเหนี่ยวของผงซิลิคอนน้อยกว่าแผ่นซิลิคอนจึงทำให้ไอออนไฮดรอกไซด์เกิดการรวมตัวกับผงซิลิคอนได้ง่ายกว่า จึงส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดแผ่นซิลิคอนนั้นลดน้อยลงไปด้วย

เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย TMAH ที่ไม่ได้เติมผงซิลิคอนและเติมผงซิลิคอน แสดงดังรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TMAH แตกต่างกันมาก โดยเฉพาะที่เติมผงซิลิคอนที่ปริมาณ 50 กรัมต่อลิตรส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดนั้นลดลงเป็น 20 เท่าของสารละลายที่ไม่ได้เติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH

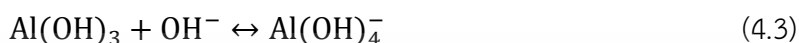
ในงานวิจัยนี้ที่เติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH เพื่อลดการกัดของอลูมิเนียม เพราะอลูมิเนียมนั้นจะเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดซิลิคอนนั้นลดลงด้วย ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 4.2



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดซิลิคอนในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ไม่ได้และเติมผงซิลิคอนเป็น 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตรในเวลาต่างๆ ที่ทำการกัดซิลิคอน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การศึกษาการกัดและการลดการกัดอลูมิเนียมด้วยสารละลาย TMAH

กระบวนการกัดอลูมิเนียมด้วยสารละลาย TMAH เนื่องจากสารละลาย TMAH จะลดรูปเป็นไฮดรอกไซด์ในสมการที่ (2.7) และสมการที่ (2.13) ที่ได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 และทำปฏิกิริยากับ  $Al(OH)_3$  ดังสมการที่ (4.3) การกัดอลูมิเนียมด้วยสารละลาย TMAH จะทำการกัดอลูมิเนียมมากเนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นมีค่าสูง จึงต้องทำการเติมซิลิโคนลงในสารละลาย TMAH เพื่อทำการลดการกัดอลูมิเนียมลงซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการเหลืออลูมิเนียมไว้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

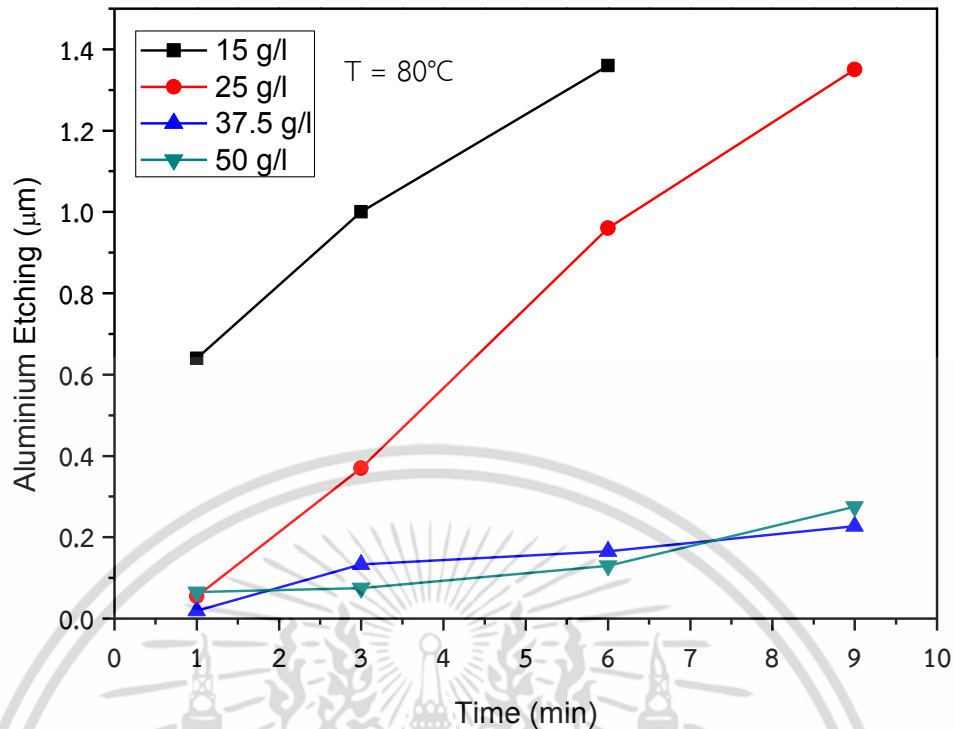


จากการทดลองเพื่อหาความลึกของซิลิโคนนั้นที่ได้กล่าวไป เมื่อนำอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ทดลองการกัดอลูมิเนียมแต่สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O นั้นยังมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงอยู่จึงทำการกัดอลูมิเนียมทั้งหมด ในงานวิจัยนี้จึงต้องหาวิธีการลดการกัดอลูมิเนียมเพื่อใช้อลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง โดยการเติมผงซิลิโคนเพื่อช่วยลดการกัดอลูมิเนียมนั้นจากการศึกษาเบื้องต้นนั้นมีบทความที่เกี่ยวข้องกับการใช้การเติมผงซิลิโคน ในบทความนี้ได้กล่าวถึงการเติมผงซิลิโคนในสารละลาย TMAH เมื่อเติมผงซิลิโคนจำนวนมากขึ้นจะทำให้การกัดอลูมิเนียมนั้นลดน้อยลง

จากผลการทดลองการกัดอลูมิเนียมด้วยสารละลาย TMAH นั้นได้ทำการกัดอลูมิเนียมได้เร็วมากในระยะเวลาสั้นๆ จึงทำให้ต้องใช้วิธีการเติมผงซิลิโคนเพื่อลดการกัดอลูมิเนียมให้น้อยลง การเติมผงซิลิโคนในสารละลาย TMAH เพื่อลดการกัดอลูมิเนียมโดยปริมาตรที่เติมนั้นเท่ากับ 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.4 จะพบว่าเมื่อเติมผงซิลิโคนลงในสารละลาย TMAH อัตราการกัดอลูมิเนียมของสารละลายจะลดลง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ในสารละลายส่วนมากนั้นจะทำปฏิกิริยากับผงซิลิโคนที่เติมลงไปมากกว่าการกัดอลูมิเนียม จะสังเกตเห็นว่าเมื่อเติมผงซิลิโคนที่มีปริมาณมากขึ้นจึงส่งผลให้การกัดอลูมิเนียมลดน้อยลง การเติมผงซิลิโคนในปริมาณ 15 กรัมต่อลิตรยังมีการกัดอลูมิเนียมที่สูงจะมีอัตราการกัดเท่ากับ 0.23  $\mu\text{m}/\text{min}$  แต่เมื่อเติมผงซิลิโคนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงปริมาณเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตรการกัดอลูมิเนียมนั้นจะลดลงต่ำมากมีอัตราการกัดอลูมิเนียมเท่ากับ 0.03  $\mu\text{m}/\text{min}$

การเติมผงซิลิโคนด้วยปริมาณต่างๆ เพื่อศึกษาการลดการกัดของอลูมิเนียมลงนั้น จะเห็นได้ว่าการเติมผงซิลิโคนที่มีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะช่วยลดการกัดอลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี และทำให้มีอลูมิเนียมคงเหลือ เพื่อใช้ทำเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงได้ แต่ผงซิลิโคนที่เติมในปริมาณ 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร มีการกัดอลูมิเนียมที่ใกล้เคียงกันอาจจะเกิดจากการที่ไฮดรอกไซด์ของสารละลาย TMAH ที่ทำปฏิกิริยากับผงซิลิโคนที่เติมลงไปในการกัดอลูมิเนียมนั้นลดลงเท่าๆ กันเนื่องจากการเติมผงซิลิโคนในปริมาณที่มากๆ จึงทำให้การกัดอลูมิเนียมสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิโคน 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร มีอัตราการกัดที่เท่าๆ กัน

ในงานวิจัยนี้ได้เลือกอัตราส่วนผสมที่เติมผงซิลิโคนที่ 37.5 กรัมต่อลิตร เนื่องจากอัตราการกัดอลูมิเนียมของผงซิลิโคนที่เติมในสารละลาย TMAH นั้นมีอัตราการกัดที่ใกล้เคียงกับผงซิลิโคนที่เติมเป็น 50 กรัมต่อลิตร จึงไม่มีความจำเป็นจะต้องเติมผงซิลิโคนที่มีปริมาณมากกว่า 37.5 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดอลูมิเนียมในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เติมผงซิลิคอนเป็น 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตรในเวลาต่างๆ ที่ทำการกัดอลูมิเนียม

#### 4.3 การเปรียบเทียบการกัดระหว่างซิลิคอนและอลูมิเนียม

การกัดแผ่นซิลิคอนและอลูมิเนียมด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอน จะส่งผลกระทบต่อให้มีการกัดซิลิคอนลดลงซึ่งเราไม่ได้ต้องการให้เกิดขึ้นกับการกัดซิลิคอน แต่เราต้องการลดการกัดของอลูมิเนียมเพื่อให้อลูมิเนียมคงอยู่เป็นขั้วไฟฟ้าของทรานซิสเตอร์ที่จะทำการสร้างขึ้น จึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อการลดการกัด ในหัวข้อนี้เราจะทำการเปรียบเทียบการกัดระหว่างซิลิคอนและอลูมิเนียม เพื่อจะหาอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ที่ทำการกัดซิลิคอนได้มากกว่าการกัดอลูมิเนียม

เมื่อเปรียบเทียบการกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมดังตารางที่ 4.2 จะพบว่าเมื่อเติมผงซิลิคอนลงในสารละลายทำให้การกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมที่ลดลง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ในสารละลายนั้นส่วนมากจะทำปฏิกิริยากับผงซิลิคอนที่เติมลงไป เมื่อเติมซิลิคอนเพิ่มขึ้นการกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมจะลดลงเรื่อยๆ จะเห็นว่าเมื่อเติมผงซิลิคอนที่ 50 กรัมต่อลิตร การกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมจะลดลงมากที่สุด ถ้าวัดผงซิลิคอนลงเป็น 25 กรัมต่อลิตร การกัดซิลิคอนและการกัดของอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มผงซิลิคอนให้มีปริมาณที่เหมาะสมกับอัตราการกัดทั้งซิลิคอนและอลูมิเนียมนั้น จะเห็นว่าในช่วงที่เพิ่มผงซิลิคอนปริมาณ 25-50 กรัมต่อลิตร จะเป็นช่วงที่สารละลายนั้นการกัดซิลิคอนมากกว่าการกัดอลูมิเนียม ซึ่งงานวิจัยนี้ต้องการกัดซิลิคอนด้วยอัตราการกัดที่มากพร้อมกับต้องการให้อลูมิเนียมที่เป็นขั้วไฟฟ้านั้นมีอัตราการกัดที่น้อยที่สุด จึงได้ทำการเลือกเติมผงซิลิคอนเป็น 37.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นการเติมผงซิลิคอนที่เหมาะสมกับงานวิจัยนี้ ส่งผลให้อัตราการกัดอลูมิเนียมลดลงเป็น 0.03 µm/min ส่วนอัตราการกัดซิลิคอนเพิ่มขึ้นเป็น 0.07 µm/min เมื่อเปรียบเทียบกับเติมผงซิลิคอน 50 กรัมต่อลิตร ที่มีอัตราการกัดซิลิคอนเท่ากับ 0.04 µm/min และอัตราการกัดอลูมิเนียม

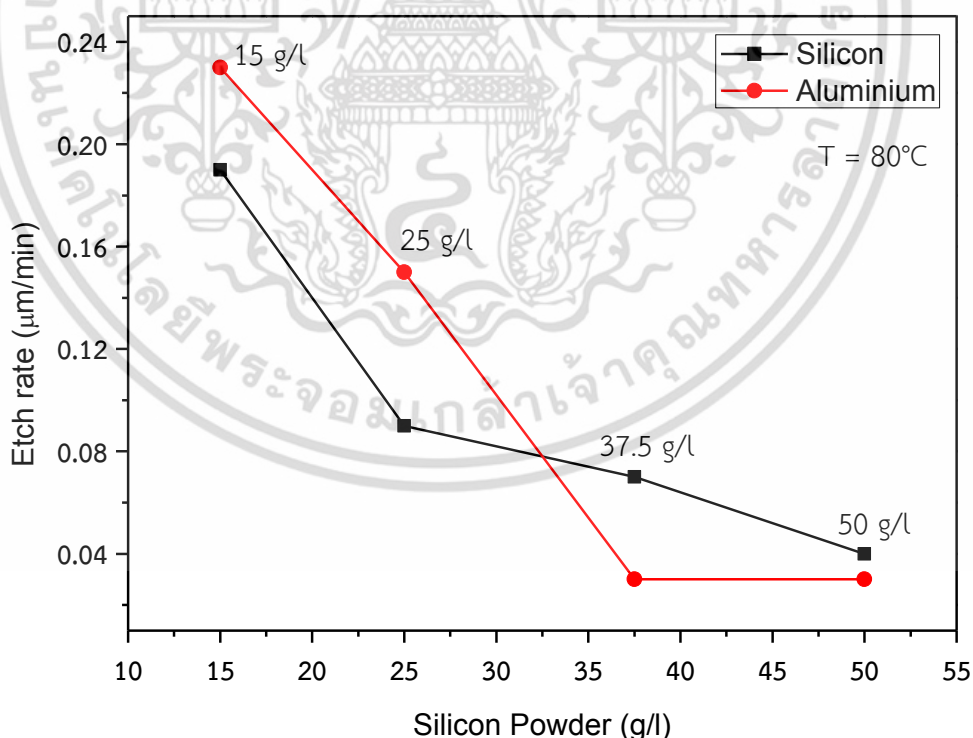
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลดลงเป็น 0.03  $\mu\text{m}/\text{min}$  ซึ่งมีอัตราการกัดของสารละลายเท่ากับสารละลายที่เติมผงซิลิคอนเป็น 37.5 กรัมต่อลิตร แสดงดังรูปที่ 4.5

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบอัตราการกัดของซิลิคอนและอลูมิเนียมเมื่อเติมผงซิลิคอน

ผงซิลิคอน (g/l)	อัตราการกัด ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	
	ซิลิคอน	อลูมิเนียม
15	0.19	0.23
25	0.09	0.15
37.5	0.07	0.03
50	0.04	0.03

การกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่เติมซิลิคอนจึงทำให้อัตราการกัดซิลิคอนลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกรัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เป็น 8 เท่าของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่เติมซิลิคอน 37.5 กรัมต่อลิตร แต่สารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่ไม่ได้เติมซิลิคอนนั้นทำการกัดอลูมิเนียมหมดในระยะเวลาสั้นๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ต้องการให้อลูมิเนียมยังคงอยู่เพื่อเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง เราจึงเลือกอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่เติมซิลิคอน 37.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นอัตราส่วนผสมของสารละลายที่ต้องการต่องานวิจัยนี้ ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนและอลูมิเนียมของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนในปริมาณ 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

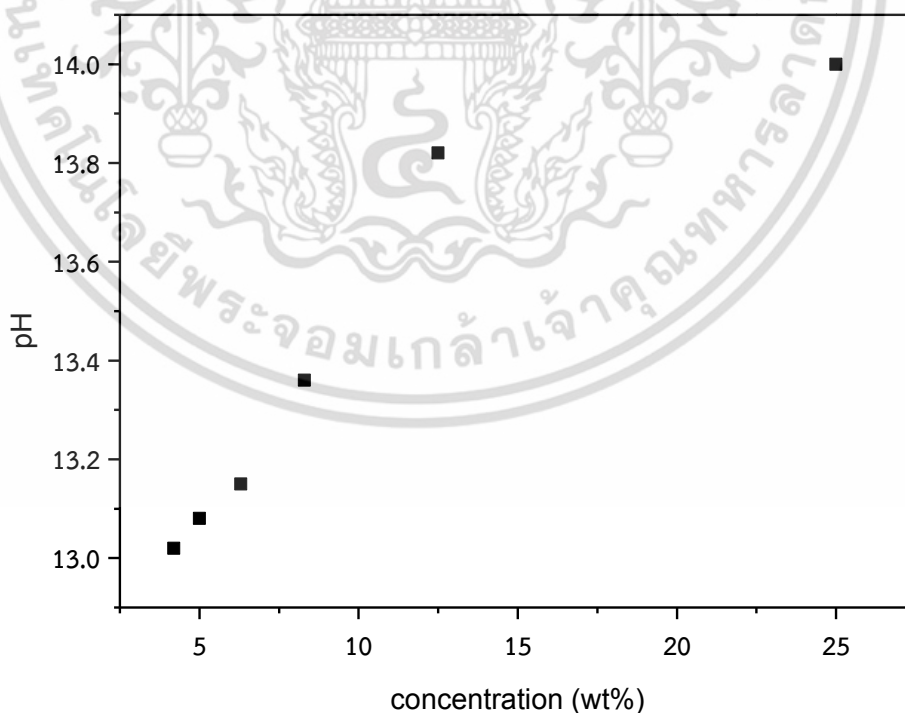
#### 4.4 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ต่อการกัดและทางกายของแผ่นซิลิคอน

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH จะใช้เครื่อง pH Meter รุ่น Model PH900 การศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH มีความสำคัญต่องานวิจัยนี้ เพราะค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นมีผลต่ออัตราการกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมที่เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงและมีผลต่อพื้นผิวของแผ่นซิลิคอน

##### 4.4.1 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ไม่เติมผงซิลิคอน

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่ใช้สำหรับกัดแผ่นซิลิคอนนั้น จะส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดแผ่นซิลิคอน เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายขึ้นอยู่กับไอออนไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากสารละลาย TMAH เมื่อมีไอออนไฮดรอกไซด์มากขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ขึ้นเพิ่มขึ้น

จากการทดลองการเติมน้ำในสารละลาย TMAH เพื่อทดสอบอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TMAH ด้วยค่าความลึกของการกัดแผ่นซิลิคอนผลจากการเติมน้ำที่เพิ่มขึ้นลงในสารละลาย TMAH ทำให้อัตราการกัดนั้นลดลงเรื่อยๆ ซึ่งอาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH โดยการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่อัตราส่วนผสมต่างๆ ค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นลดลงจากเดิมแสดงดังรูปที่ 4.6 จะเห็นได้ชัดเจนว่าอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่เติมน้ำเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึง 5 เท่าของสารละลาย จึงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH มีค่าลดลง ซึ่งส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดแผ่นซิลิคอน ทำให้อัตราการกัดลดลงด้วย

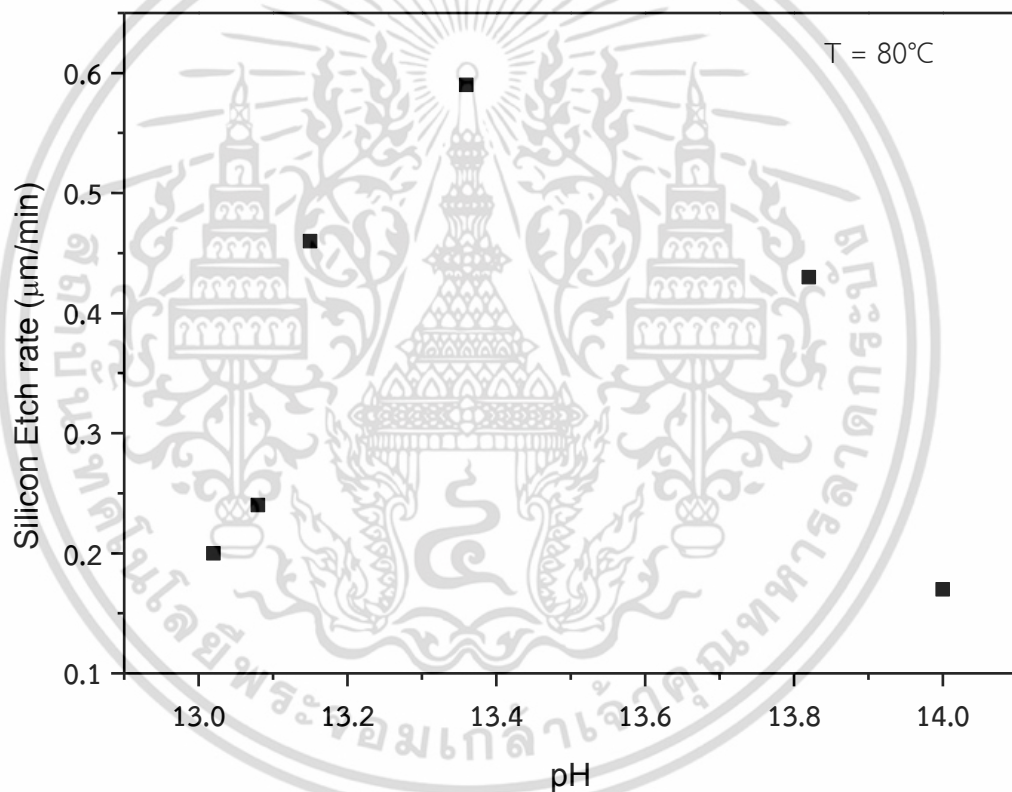


รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O\*

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**\*หมายเหตุ :** การวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ด้วยเครื่อง pH Meter รุ่น Model PH900 ได้วัดค่าความเป็นกรด-ด่างตามมาตรฐานและน้ำปอดประจุ (DI water) เปรียบเทียบซึ่งมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

เมื่อเปรียบเทียบอัตราการกัดของแผ่นซิลิคอนกับค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไปนั้น ส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดของแผ่นซิลิคอน เนื่องจากการเกิดไอออนไฮดรอกไซด์ในสารละลาย TMAH อาจจะมีไอออนไฮดรอกไซด์อยู่ในสารละลายเพียง 1 เท่าต่อน้ำที่เติมลงในสารละลายที่เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ หลายเท่า เมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH และอัตราการกัดเพิ่มขึ้น เมื่อไอออนไฮดรอกไซด์เพิ่มขึ้นในอัตราส่วนผสมสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เป็น 1:1 (5 wt%) และไม่ได้เติมน้ำในสารละลายซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง แต่อัตราการกัดของแผ่นซิลิคอนนั้นมีค่าน้อยแสดงดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TMAH โดยมีอัตราส่วนผสมต่างๆ\*

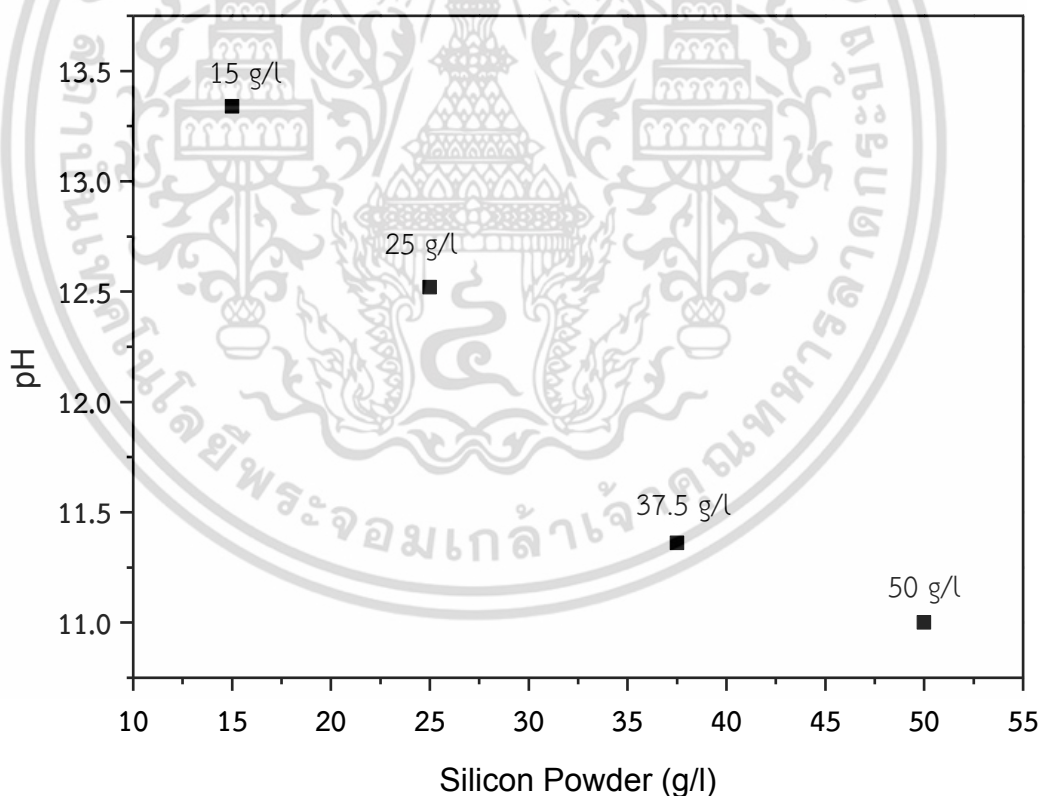
#### 4.4.2 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่างๆ

จากการเติมน้ำในสารละลาย TMAH เพื่อศึกษาการกัดแผ่นซิลิคอน พบว่าค่าความกรด-ด่างที่เปลี่ยนแปลงไปมีค่าลดลง แต่อัตราการกัดต่อลูมิเนียมก็ยังคงมีอัตราการกัดที่สูงอยู่จึงต้องใช้วิธีการเติม

ผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH เพื่อจะลดอัตราการกัดของอลูมิเนียมสำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

เมื่อเติมผงซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH เพื่อทำการลดอัตราการกัดอลูมิเนียมและส่งผลให้อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนลดลงด้วย ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.8 จะเห็นได้ชัดเจนว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนมีค่าลดลงเช่นเดียวกับการเติมน้ำลงในสารละลาย TMAH ซึ่งทำให้อัตราการกัดลดลงด้วย ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนลงไปนั้นจะมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่าสารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วนผสมของน้ำ

จากรูปที่ 4.8 จะพบว่าผงซิลิคอนที่เติมลงในสารละลาย TMAH โดยมีปริมาณเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายนั้นลดลง ซึ่งผงซิลิคอนในปริมาณเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง แต่เมื่อเติมผงซิลิคอนในปริมาณเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายจะลดลงอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งอาจจะส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดทำให้การกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมลดลง เนื่องจากการลดลงของไอออนไฮดรอกไซด์ของสารละลาย TMAH ด้วยการทำปฏิกิริยากับผงซิลิคอนมากกว่าที่จะทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอนและอลูมิเนียม จึงทำให้การกัดแผ่นซิลิคอนและอลูมิเนียมลดลง



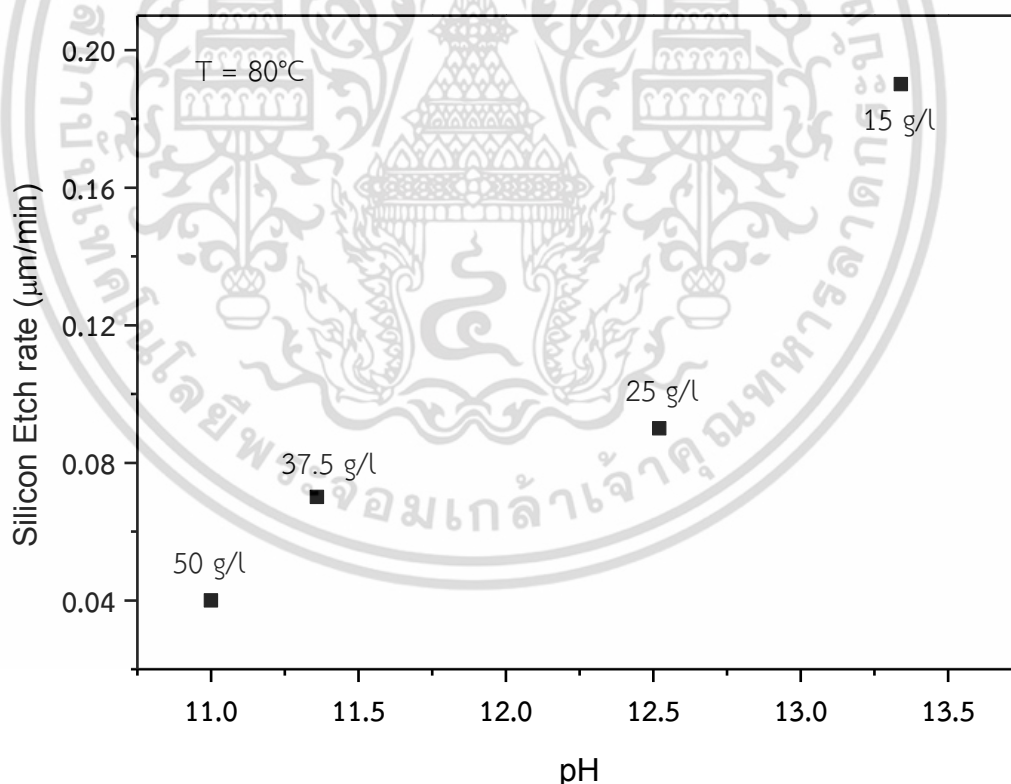
รูปที่ 4.8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ ที่เติมในสารละลาย TMAH\*

#### 4.4.3 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่ออัตราการกัดแผ่นซิลิคอน

การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอน จากข้อมูลข้างต้นนั้น จะพบว่าการเติมผงซิลิคอนมากขึ้นทำให้ค่าความเปลี่ยนแปลงของสารละลาย TMAH ลดลง ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดทำให้การกัดลดลงตามค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลง

จากผลการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างกับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอน แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มขึ้นส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่เพิ่มขึ้นเพราะการเติมผงซิลิคอนที่มีปริมาณน้อยลงซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 13.3 มีการเติมผงซิลิคอนในสารละลายเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร และมีอัตราการกัดเท่า 0.19  $\mu\text{m}/\text{min}$  ถ้าเติมผงซิลิคอนเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตรค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 และอัตราการกัดเท่ากับ 0.04  $\mu\text{m}/\text{min}$  ซึ่งถ้าเติมผงซิลิคอนในสารละลายจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงและอัตราการกัดก็ลดลงด้วย

ในงานวิจัยนี้ต้องอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนให้มีความลึกมากพอต่อการเป็นลักษณะร่องรูปตัวยู ซึ่งมีความจำเป็นต้องมีความลึกมากพอต่อการสร้างทรูจวดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู แต่อัตราการกัดที่มากของสารละลาย TMAH จะทำให้โอลูมิเนียมที่เป็นขั้วไฟฟ้าของทรูจวดแสงจะมีมากกว่าอัตราการกัดซิลิคอน จึงทำให้ต้องเติมผงซิลิคอนในสารละลายเพื่อลดการกัดโอลูมิเนียมลง



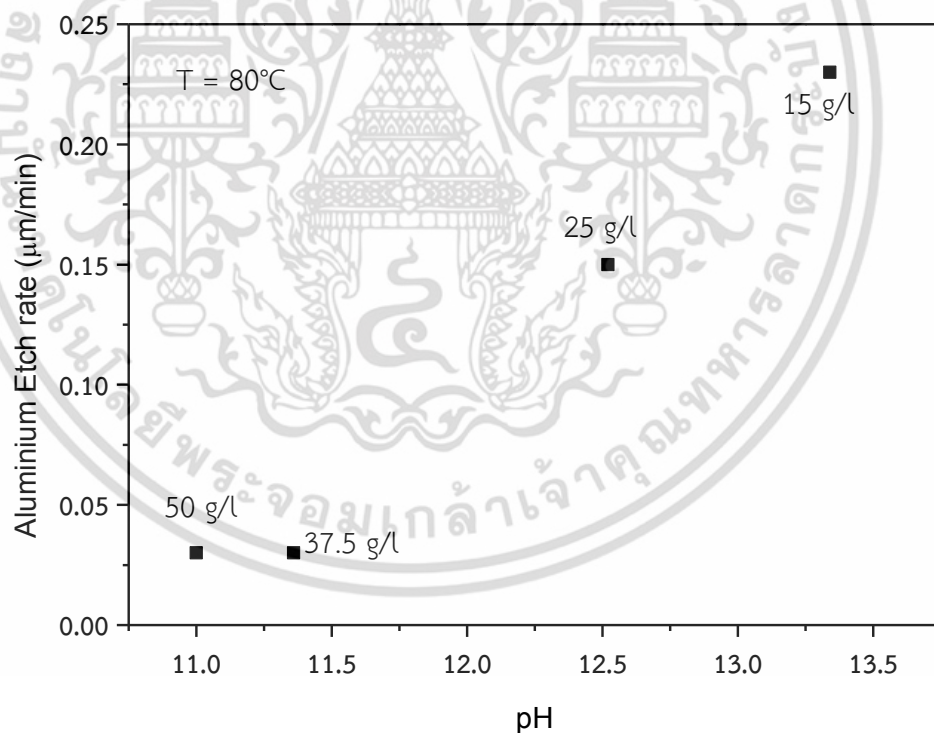
รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลาย TMAH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ\*

#### 4.4.4 การเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่ออัตราการกัดอลูมิเนียม

การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH หลังจากเติมผงซิลิคอนแล้วนั้น ทำให้อัตราการกัดซิลิคอนลดลง ซึ่งจะส่งผลให้อัตราการกัดอลูมิเนียมลดลงด้วยและค่าความเป็นกรด-ด่างจะลดลงด้วย

การเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH เพื่อต้องการทำให้อัตราการกัดอลูมิเนียมลดลงจะส่งผลกระทบต่อให้ค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นลดลงด้วย แสดงดังรูปที่ 4.10 จะเห็นว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอน เมื่อเติมผงซิลิคอนปริมาณมากขึ้นจะทำให้อัตราการกัดอลูมิเนียมลดลง โดยการเติมผงซิลิคอนที่มีปริมาณเท่ากับ 15 กรัมต่อลิตร จะมีอัตราการกัดอลูมิเนียมที่มากเป็น  $0.23 \mu\text{m}/\text{min}$  ค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 13.3 แต่เมื่อเติมผงซิลิคอนในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับ 50 กรัมต่อลิตร อัตราการกัดอลูมิเนียมเท่ากับ  $0.03 \mu\text{m}/\text{min}$  และค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 11 ซึ่งเห็นได้ชัดเจนว่าการเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH จะช่วยลดอัตราการกัดอลูมิเนียมได้และทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ลดลงด้วย

การลดอัตราการกัดอลูมิเนียมด้วยการเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH จะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายลดลงด้วย ซึ่งการเติมซิลิคอนในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ จึงทำให้เป็นการลดอัตราการกัดอลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี

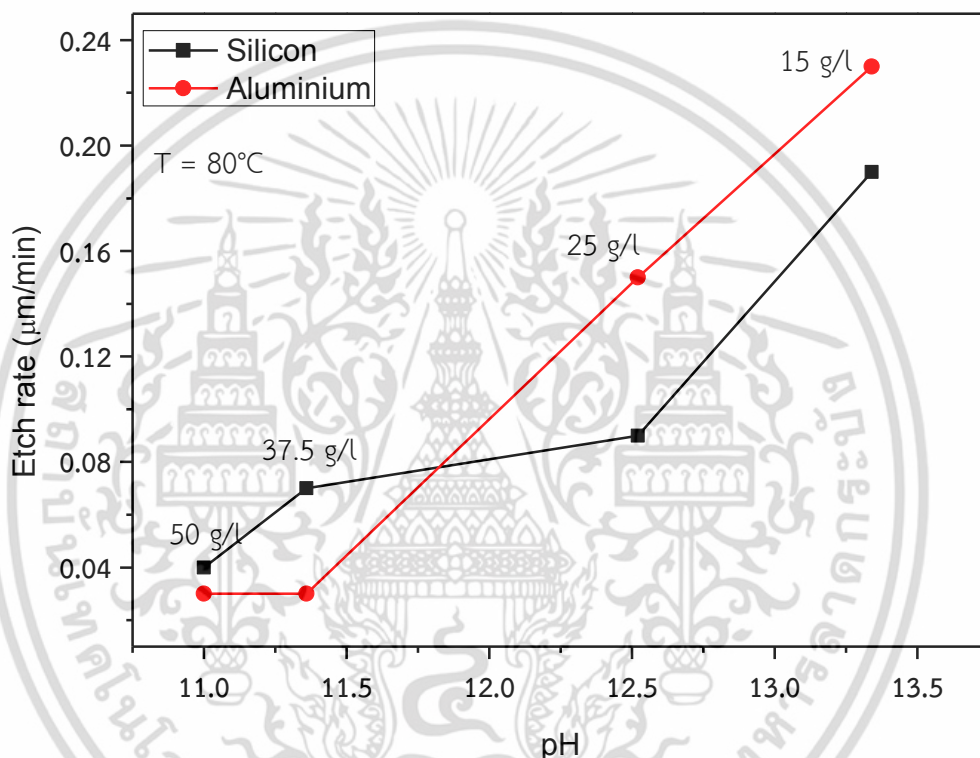


รูปที่ 4.10 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดอลูมิเนียมของสารละลาย TMAH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ\*

เมื่อเปรียบเทียบค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH และอัตราการกัดแผ่นซิลิคอน และอลูมิเนียมแล้วนั้น แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.11 การเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH จะช่วยลดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทั้งอัตราการกัดและค่าความเป็นกรด-ด่างได้อย่างดี แต่การที่อัตราการกัดของแผ่นซิลิคอนที่ลดลงมากเกินไปจะทำให้ไม่ได้ความลึกที่ต้องการ จึงต้องเลือกการเติมผงซิลิคอนในสารละลายให้เหมาะสมกับการใช้งานนั้น พบว่าการเติมผงซิลิคอนในปริมาณที่เท่ากับ 37.5 กรัมต่อลิตร อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 0.07  $\mu\text{m}/\text{min}$  และอัตราการกัดอลูมิเนียมเท่ากับ 0.03  $\mu\text{m}/\text{min}$  ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11.3 ซึ่งมีอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่มากกว่าอัตราการกัดอลูมิเนียม

การเติมผงซิลิคอนในปริมาณ 37.5 กรัมต่อลิตร ในสารละลาย TMAH จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่น้อยลงทำให้อัตราการกัดลดลงด้วย แต่อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนนั้นยังมากกว่าอัตราการกัดอลูมิเนียม ในงานวิจัยนี้จึงเลือกที่จะเติมผงซิลิคอนปริมาณเท่ากับ 37.5 กรัมต่อลิตร



รูปที่ 4.11 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนและอลูมิเนียมของสารละลาย TMAH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ\*

#### 4.4.5 การเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ต่อทางกายภาพของแผ่นซิลิคอน

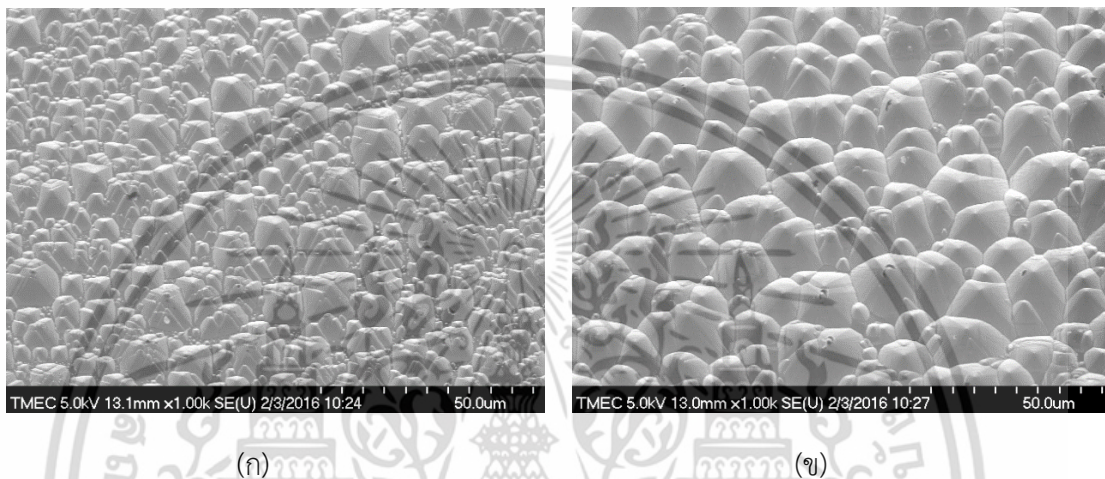
การเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH อาจส่งผลกระทบทต่อพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนได้ พื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดโดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 13 จะทำให้พื้นผิวของซิลิคอนนั้นมีลักษณะของพื้นผิวที่ขรุขระและจะเกิดขึ้นกับพื้นผิวของซิลิคอนที่มีระนาบ (100) ซึ่งในการทดลองค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ในกระบวนการกัดบนพื้นผิวของซิลิคอนนั้น จากการ SEM เพื่อตรวจสอบพื้นผิวของซิลิคอนหลังจากผ่านกระบวนการกัด

แสดงดังรูปที่ 4.12 พบว่าพื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแล้วมีลักษณะขรุขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.12 การเกิดพื้นผิวที่มีลักษณะขรุขระขึ้นอาจจะเป็นเพราะค่าความเป็นกรด-ด่างที่ลดลงต่ำกว่า 13 ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนในปริมาณที่มากมีค่าประมาณ 11-13 จากรูปที่ 4.12 (ก) พื้นผิวของซิลิคอนมีลักษณะขรุขระที่มากกว่ารูปที่ 4.12 (ข) อาจเกิดจากผลของค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่มากขึ้นจึงทำให้พื้นผิวของมีลักษณะขรุขระน้อยลง

ในงานวิจัยนี้การเติมผงซิลิคอนเป็น 37.5 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11.3 แนนอนว่าพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดแล้วนั้นจะต้องมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระ



รูปที่ 4.12 พื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH โดยการ SEM ที่มีกำลังขยายเป็น 1,000 เท่า  
(ก) ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 11  
(ข) ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 13

#### 4.5 การศึกษาลักษณะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM)

ตัวตรวจวัดแสงในงานวิจัยก่อนหน้าของห้องปฏิบัติการทางอิเล็กทรอนิกส์ จะมีลักษณะโครงสร้างแบบเชิงราบหรือแบบพลาเนอร์เป็นโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะชนิด Al/n-Si/Al แต่โครงสร้างแบบเชิงราบนั้นจะมีพื้นที่รับแสงที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น ในงานวิจัยนี้จึงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างเป็นแบบร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงด้วยกระบวนการกัด ในหัวข้อนี้จึงทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

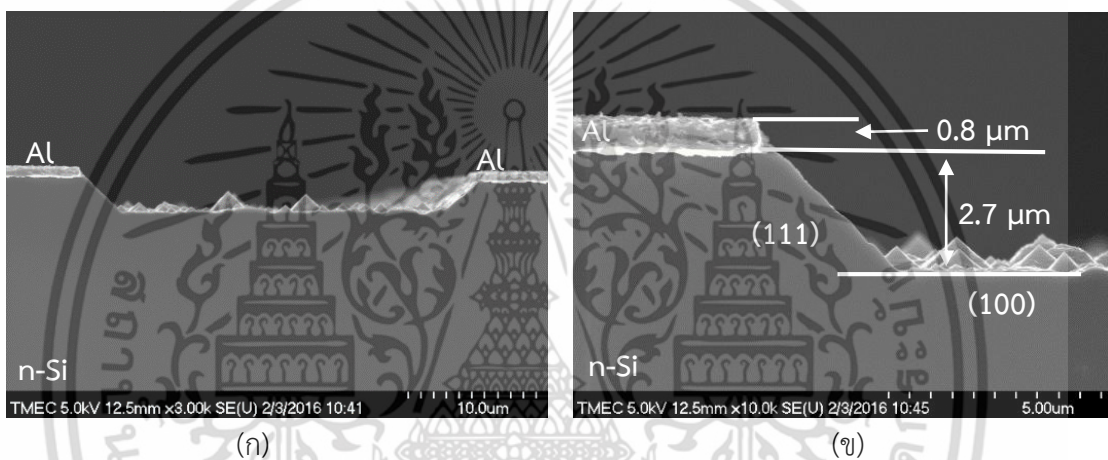
##### 4.5.1 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM)

สารละลาย TMAH ที่ทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอนมีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก เมื่อได้ผ่านกระบวนการกัดแล้วลักษณะของแผ่นซิลิคอนจะเป็นร่องรูปตัวยู ซึ่งจะมีลักษณะร่องรูปตัวยูแสดงดังรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายหลังจากการกัดซิลิคอนแสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.13 พบว่าลักษณะการกัดซิลิคอนเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งซิลิคอนที่ถูกกัดในทิศของระนาบ (100) มากที่สุด อะตอมของซิลิคอนที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ ส่วนซิลิคอนในระนาบของ (111) จะถูกกัดน้อย เนื่องจากระนาบนี้จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้านี้นี้จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุดทำให้เกิดเป็นลักษณะของร่องรูปตัวยูขึ้นหรือ U-shape จะได้เป็นลักษณะตามความต้องการของงานวิจัย

ร่องรูปตัวยูที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังสองด้านเอียงทำมุมขนานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทางระนาบ (111) ความลึกของการกัดแผ่นซิลิคอนเท่ากับ  $2.7\ \mu\text{m}$  และอลูมิเนียมที่เหลือเท่ากับ  $0.8\ \mu\text{m}$



รูปที่ 4.13 ภาคตัดขวางจากการ SEM ที่เป็นลักษณะร่องรูปตัวยูและมีอลูมิเนียมที่ยังคงเหลืออยู่บนแผ่นซิลิคอน

(ก) กำลังขยาย 3,000 เท่า

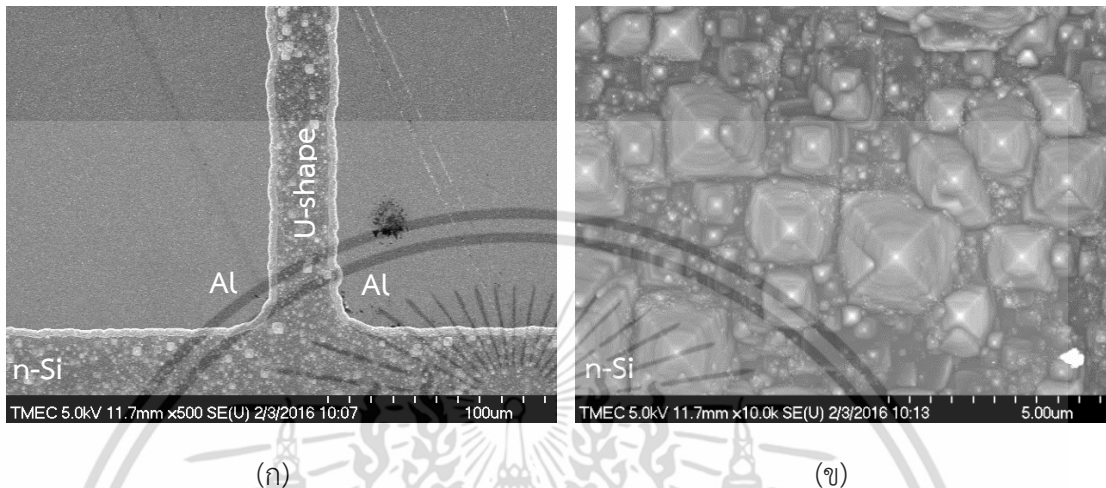
(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.5.2 การศึกษาลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงด้วยการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนต่อพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสง

ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่มีค่าประมาณ 11 นั้นจะส่งผลต่อพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดทำให้พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนมีลักษณะขรุขระ ซึ่งในการทดลองนี้ อัตราส่วนผสมของสารละลายเป็นสารละลาย TMAH เติมผงซิลิคอนในปริมาณ 37.5 กรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเป็น 11.3

เมื่อทดสอบพื้นผิวในส่วนของพื้นที่รับแสงตัวตรวจวัดแสงโดยใช้การ SEM ในรูปที่ 4.14 พื้นผิวของซิลิคอนที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH มีลักษณะขรุขระมากซึ่งเป็นผลมาจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ที่มีค่าต่ำกว่า 13 การที่ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นลดลงเกิดจากการเติมผงซิลิคอนในปริมาณที่มากจึงทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าลดลง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะสมบัติทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนี้ จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าพื้นผิวในส่วนของพื้นที่รับแสงมีลักษณะขรุขระมาก เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายมีค่าประมาณ 11.3 ซึ่งมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่า 13 เกิดจากการที่เติมผงซิลิคอนเท่ากับ 37.5 กรัมต่อลิตร ทำให้การกัดพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนมีลักษณะที่ขรุขระมาก



รูปที่ 4.14 พื้นผิวของช่องรับแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างประมาณ 11-13  
(ก) กำลังขยาย 5,000 เท่า  
(ข) กำลังขยาย 10,000 เท่า

#### 4.5.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM)

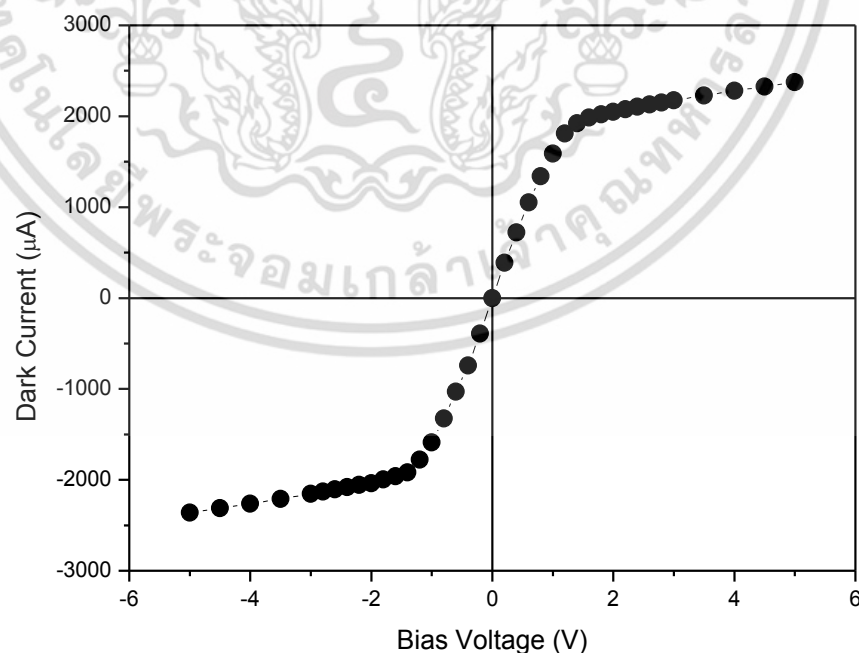
ในการทดลองในหัวข้อนี้คือทดสอบการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูหรือ U-shape ซึ่งได้ผ่านกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH แล้วนั้นในขณะที่ไม่ได้มีแสงตกกระทบเพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดจากตัวตรวจวัดแสง และในขณะมีความเข้มแสงตกกระทบ โดยในส่วนของความเข้มแสงนั้น มีการทดสอบประสิทธิภาพทั้งในขณะที่มีความเข้มแสงคงที่และมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการตรวจวัดแสงในทั้งในขณะมีแสงน้อยและมีแสงมาก

##### 4.5.3.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ในขณะที่ยังไม่ได้รับแสงตกกระทบแต่มีการจ่ายไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยขั้วโลหะด้านหนึ่งไบอัสตรงและอีกขั้วโลหะอีกด้านได้รับไบอัสย้อนกลับ พบว่าขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสงที่ได้รับไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะลดลง เนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ  $V_{bi}-V_2$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้าที่ไหลจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ (กระแสไฟฟ้ามืด) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทิศทางตรงข้ามกับการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน) หรือเรียกว่า กระแส  $I_{MS}$  ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดเดียวกันจะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอนโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก ดังรูปที่ 4.15 เป็นค่ากระแสมืดที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยทั่วไปแล้วโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและแอนโนดของตัวตรวจวัดแสงนั้นมักเป็นโลหะชนิดเดียวกันเพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้าง จึงทำให้ค่าพหุคูณของขั้วแคโทด ( $\phi_{bn1}$ ) และขั้วแอนโนด ( $\phi_{bn2}$ ) มีขนาดเท่ากันหรือ  $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$  ค่าพหุคูณภายในของขั้วแคโทด ( $V_{bi1}$ ) และขั้วแอนโนด ( $V_{bi2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$  และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_{d1}$ ) และด้านแอนโนด ( $W_{d2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $W_{d1} = W_{d2} = W_d$  ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร ส่งผลให้กระแสมืดที่ได้ ทั้งในช่วงที่มีแรงดันไบอัสช่วงบวกและช่วงลบมีความสมมาตรกัน โดยการทดลองนี้จะทำการจ่ายแรงดันไบอัสตั้งแต่ -5 V ถึง 5 V

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.15 แสดงลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันไบอัสของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ พบว่ากระแสขณะที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบชนิดเดียว (Single slit) ที่เป็นแบบ wide electrode gap นั้นมีความสมมาตรกัน ในงานวิจัยนี้ตัวตรวจวัดแสงมีโครงสร้างที่เปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งเป็นแบบร่องรูปตัวยู พบว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นมีกระแสมืดเท่ากับ 2.3  $\mu A$  ที่ 5 V ซึ่งเป็นค่ากระแสมืดที่สูงมากสำหรับตัวตรวจวัดแสง



รูปที่ 4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.5.3.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

ตัวตรวจวัดแสงนั้นเป็นอุปกรณ์สำหรับวัดปริมาณความเข้มของแสงโดยสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยการดูดกลืนพลังงานของโฟตอนไปใช้ในการกระตุ้นให้มีการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้าขึ้น และสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆมากมาย เช่น กล้องถ่ายรูป ทำหน้าที่เป็นตัวตรวจวัดแสง (Light meter) การเปิดแฟลชอัตโนมัติ (Photographic Flash control) รวมถึงสิ่งที่อยู่ใกล้ตัวเราในชีวิตประจำวันประตูเปิด-ปิดแบบอัตโนมัติตามซูเปอร์มาร์เก็ตทั่วไป เครื่องอ่านบาร์โค้ด การควบคุมระยะไกลด้วยรีโมทคอนโทรลของทีวีและเครื่องเล่นวีดีโอ ล้วนแล้วแต่มีสภาพแสงขณะนำไปประยุกต์ใช้งานแตกต่างกัน

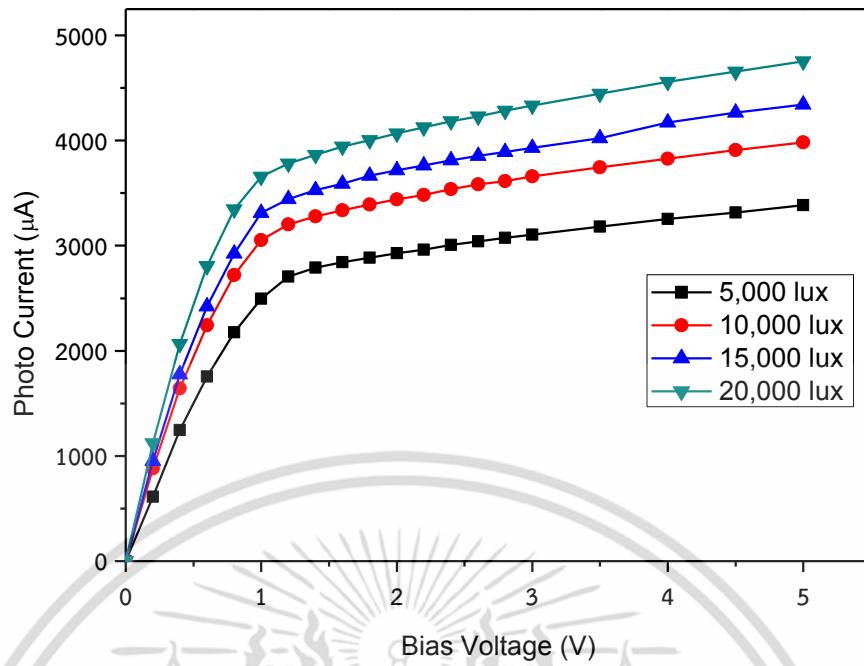
ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสง โดยมีการศึกษาถึงผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันเพื่อหาค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ และตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของกระแสแสงกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไป โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน (halogen lamp) ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู เมื่อวัดที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux ที่แรงดัน 5 V แสดงดังรูปที่ 4.16

ผลการทดลองดังแสดงในรูปที่ 4.16 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน โดยที่กระแสแสง ( $I_{photo}$ ) สามารถหาได้จากสมการที่ 4.4 คือ

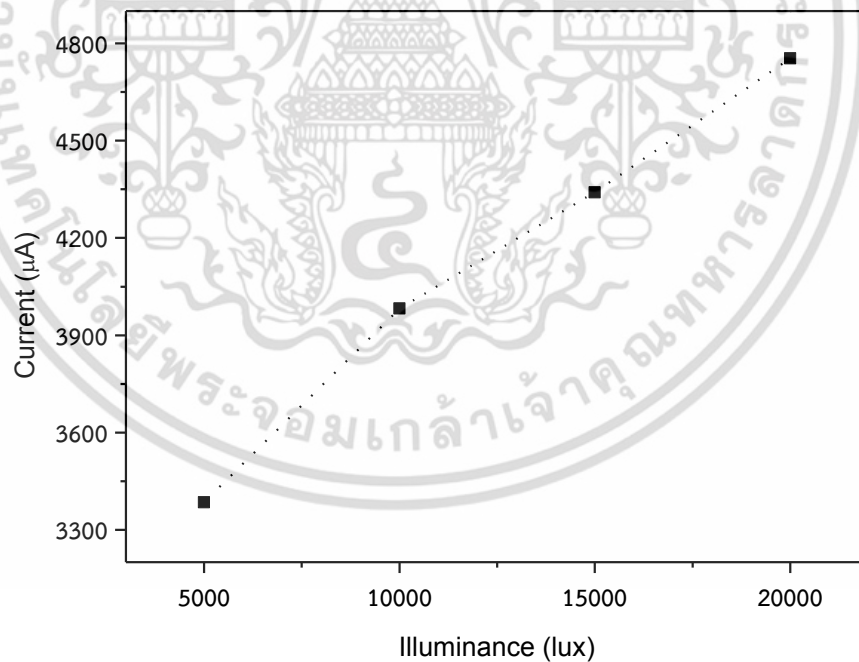
$$I_{photo} = I_{mea} - I_{dark} \quad (4.4)$$

โดยที่  $I_{mea}$  คือ กระแสรวมที่วัดได้จากการทดลอง

จากรูปที่ 4.16 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสง-แรงดัน จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มแสงที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสงมีเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย เมื่อปริมาณพาหะที่ทำให้เกิดกระแสแสงมีสูงขึ้น กระแสแสงที่วัดได้จึงมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบ โดยความเข้มแสง 5,000 lux, 10,000 lux, 15,000 lux และ 20,000 lux ที่แรงดันไบอัส 5 V จะมีค่ากระแสแสงประมาณ 3.3 mA, 3.9 mA, 4.3 mA และ 4.7 mA ตามลำดับ และมีลักษณะเป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 4.17 จากผลของกระแสแสง จะเห็นได้ชัดเจนว่าการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนี้ มีผลกระทบต่อการทำงานของกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบด้วยความเข้มแสง 5,000 - 20,000 lux



รูปที่ 4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-ความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) เมื่อได้รับการไบอัส 5 V

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีความมุ่งหมายที่จะศึกษากระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH เพื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย โดยการทดลองจะแบ่งเป็น 2 ส่วนด้วยกัน คือ ในส่วนแรกการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย

ในส่วนแรกของงานวิจัยนี้เป็นจากศึกษาความลึกของการกัดแผ่นซิลิคอน เพื่อหาอัตราส่วนผสมของสารละลายที่เหมาะสมกับการสร้างตัวตรวจวัดแสง โดยการผสมน้ำในสารละลาย TMAH ด้วยอัตราส่วนต่างๆ คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 (TMAH:H<sub>2</sub>O) จะมีเวลาในการกัดเป็น 1, 3, 6 และ 9 นาทีและอุณหภูมิการกัดเท่ากับ 80°C จากผลการทดลองพบว่าอัตราส่วนผสมของสารละลายที่ทำการกัดแผ่นซิลิคอนได้ค่าความลึกมากที่สุดคือ 1:2 ซึ่งมีค่าอัตราการกัดเท่ากับ 0.59  $\mu\text{m}/\text{min}$  แต่อัตราส่วนผสมนี้จะทำการกัดอลูมิเนียมมากกว่าการกัดแผ่นซิลิคอนจึงต้องเติมผงซิลิคอนในสารละลาย เพื่อช่วยลดการกัดอลูมิเนียมลงโดยจะมีปริมาณของผงซิลิคอนเป็น 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร การเติมผงซิลิคอนในปริมาณที่มากขึ้นเรื่อยๆ จะทำให้การกัดอลูมิเนียมลดลงและส่งผลให้การกัดแผ่นซิลิคอนลดลงด้วย จึงต้องเลือกอัตราส่วนผสมที่ทำการกัดซิลิคอนมากและในขณะเดียวกันต้องทำการกัดอลูมิเนียมน้อย อัตราส่วนผสมของสารละลายนั้นคือ สารละลาย TMAH เติมผงซิลิคอน 37.5 กรัมต่อลิตร จะมีอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 0.07  $\mu\text{m}/\text{min}$  และมีอัตราการกัดอลูมิเนียมเท่ากับ 0.03  $\mu\text{m}/\text{min}$  เป็นอัตราส่วนผสมของสารละลายที่เหมาะสมต่อการนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย

อัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ต่างๆ จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเปลี่ยนแปลงไป ในอัตราส่วนผสมสารละลาย TMAH ต่อน้ำ (1:2) มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 13.8 ซึ่งมีอัตราการกัดมากที่สุดในการทดลองของงานวิจัยนี้ เมื่อเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH ทำให้อัตราการกัดลดลงและส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างนั้นลดลงด้วย ในสารละลาย TMAH เติมผงซิลิคอนเท่ากับ 37.5 กรัมต่อลิตร จะมีค่าความเป็นกรด-ด่างเป็น 11.3

ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH มีผลต่อลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวบนแผ่นซิลิคอน ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่มีค่าต่ำกว่า 13 จะทำให้พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนมีลักษณะเป็นแบบขรุขระ ซึ่งอัตราส่วนผสมของสารละลายที่ใช้เป็นสารละลาย TMAH เติมผงซิลิคอนเท่ากับ 37.5 กรัมต่อลิตร มีค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 11 พื้นผิวของแผ่นซิลิคอนจึงมีลักษณะขรุขระ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยนั้น ที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนเท่ากับ 37.5 กรัมต่อลิตร มีลักษณะเป็นร่องรูปด้วยตามที่ต้องการของงานวิจัยนี้ซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสดงให้เห็นในรูปที่ 4.17 และมีลักษณะพื้นผิวในส่วนของพื้นที่รับแสงแบบขรุขระที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำกว่า 13 แสดงดังรูปที่ 4.18 ในบทที่ 4

ในส่วนที่สองเป็นการศึกษาสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู พบว่าการวัดลักษณะสมบัติกระแส - แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบนั้นเพื่อค่าหากระแสรั่วไหล หรือกระแสมืด ที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงมีค่ากระแสเท่ากับ 2.3 mA ที่ 5 V ซึ่งเป็นค่ากระแสมืดที่สูงมากสำหรับตัวตรวจวัดแสง อาจเกิดจากการผ่านกระบวนการกัดซึ่งคาดว่าจะมีประจุไอออนของสารละลายยังคงเหลืออยู่บนแผ่นซิลิคอน และอาจจะเป็นเพราะพื้นผิวที่มีลักษณะแบบขรุขระ

การทดสอบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับความเข้มแสง 5,000 – 20,000 lux ตกกระทบพบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูสามารถตอบสนองแสงในช่วงดังกล่าวได้เป็นอย่างดี ค่ากระแสแสงเท่ากับ 4.7 mA ที่ความเข้มแสงเป็น 20,000 lux ซึ่งค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีค่ามาก อาจเกิดจากประจุไอออนที่ยังคงเหลืออยู่ตัวตรวจวัดแสงจึงส่งผลให้มีค่ากระแสที่สูงมาก

จากการศึกษากระบวนการกัดเบื้องต้นเพื่อนำมาทดสอบใช้สร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู คาดว่าจะสามารถสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่มีพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้นและทำให้ประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้นในอนาคตต่อไป

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Eric J. Lerner, “Introduction to photodetectors and applications” [Online]. Available : <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-36>
- [2] Chris Woodford, “Barcodes and barcode scanners” [Online]. Available : <http://www.explainthatstuff.com/barcodescanners.html>
- [3] Cletus J. Kaiser, “The PN Junction Diode” [Online]. Available : [http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode\\_3.html](http://www.electronics-tutorials.ws/diode/diode_3.html)
- [4] Joseph S. Braley, “Photo Detectors” [Online]. Available : [http://www.ele.uri.edu/Courses/ele432/spring08/photo\\_detectors.pdf](http://www.ele.uri.edu/Courses/ele432/spring08/photo_detectors.pdf)
- [5] บุศรา นรารักษ์, “การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556
- [6] ธเนศ โชะเหม. “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลา นาร์” วิทยานิพนธ์ของสาขาวิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [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 Etching” [Online]. Available : [http://www.virlab.virginia.edu/nanoscience\\_class/lecture\\_notes/Microfabrication\\_Supporting\\_materials\\_files/WetEtching.pdf](http://www.virlab.virginia.edu/nanoscience_class/lecture_notes/Microfabrication_Supporting_materials_files/WetEtching.pdf). 2015
- [9] Bo Cui. “Microfabrication and thin film technology” [Online]. Available : <http://ece.uwaterloo.ca/~bcui/>. 2015
- [10] Werasak Sonphao, “Silicon Anisotropic Etching of TMAH Solution” ISIE 2001, Pusan, KOREA
- [11] Enrique C., Sorin C., Young K., Alexander Z., “solid-state-electronics”, [Online]. Available : <http://www.journals.elsevier.com/solid-state-electronics/>
- [12] บุญชัย กิ่งรุ่งเพชร, “คู่มือ Protel99”, บริษัท แอครา เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด กรุงเทพฯ:เม็ดทราย, 2543. 312 หน้า
- [13] Kejia (Albert) Wang., “Wire textured, multi-crystalline Si solar cells created using self-assembled masks”, OPTICS EXPRESS A568. Vol. 18, No. S4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น มิได้อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [14] L.A. Dobrzański, A. Drygała., “Surface texturing of multicrystalline silicon solar cells”, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering. Volume 31 2008
- [15] ศรีเมษ รัตนชัย, “เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิกอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง” วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
- [16] Avinash P. Nayak, Logeeswaran VJ and M. Saif Islam “Wet and Dry Etching” University of California, Davis. California
- [17] D. Xuefeng, “Microfabrication Using Bulk Wet Etching with TMAH” Master Degree Thesis of McGill University. 2005
- [18] W. Sonphao, S. Chaisirikul, “Silicon Anisotropic Etching of TMAH Solution” 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings (ISIE2001), 2001, pp. 2049-2052.
- [19] Xiaoge Gregory Zhang “Electrochemistry of Silicon and Its Oxide” Cominco Ltd. Mississauga, Ontario, Canada and McMaster University Hamilton, Ontario, Canada
- [20] K. Biswas, S. Das., “Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for aluminum passivation and smooth surface Microelectronics Journal 37 (2006) 321–327
- [21] K. Biswas, S. Kal., “Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon” Microelectronics Journal 37 (2006) 519–525
- [22] J. LACONTE., “Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration” Intersema Sensoric SA, Bevaix, Switzerland
- [23] U.Schnakenberg, W.Benecke, P.Lange., “TMAH ETCHANTS FOR SILICON MICROMACHINING”, Fraunhofer-Institut für Mikrostrukturtechnik Dillenburger Str. 53,D-100 Berlin 33, FRG
- [24] H. Seidel, L. Csepregi., “Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions” Messerschmitt-Bölkow-Blohm GmbH, D-8000 Munich 80, Germany

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [25] L. Graves., “**Thermal imaging cameras may help cyclists with red light troubles**” [Online]. Available : <http://www.katu.com/news/local/Thermal-imaging-cameras-may-help-cyclists-with-red-light-troubles-267094981.html>
- [26] สุรดา เอื้อมานะพงษ์., “**ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si(pt-Doped)/Cr**”, บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2556
- [27] Sciencetech., “**pH Meter**” [Online]. Available : <http://www.sa.sciencetech.co.th/pdf/Micro.pdf>
- [28] Operation Manual., “**Model PH900 pH/mV Meter**”, [Online]. Available : <http://www.tlead.biz/test-meter/pic/PH-900.pdf>
- [29] Veeco., “**Veeco DEKTAK 150 Profilometer**” [Online]. Available : <http://www.mse.ttu.edu.tw/ezfiles/63/1063/img/647/VeecoDEKTAK150Profilometer.pdf>
- [30] Nano technology., “**Scanning Electron Microscope : SEM**”, [Online]. Available : <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>
- [31] Science-news “**Electron Microscope**” [Online]. Available : <http://www.electron.rmutphysics.com/science-news/>
- [32] P.J. French t, M. Nagao, M. Esashi., “**Electrochemical etch-stop in TMAH without externally applied bias**”, Tohoku Univeo'sity, Department of Mechedronics and Precision Engineering, Aza-Aobo. Aramaki, Aobaolat, Sendai. Miyagl. 980.77. Japan
- [33] W.K. Choi \*, J.T.L. Thong, P. Luo, C.M. Tan, T.H. Chua, Y. Bai., “**Characterisation of pyramid formation arising from the TMAH etching of silicon**”, Microelectronics Laboratory, Department of Electrical Engineering, National University of Singapore, 10 Kent Ridge Crescent, Singapore,119260, Singapore
- [34] Mitsuhiro Shikida, Kazuo Sato, Kenji Tokoro, Daisuke Uchikawa., “**Differences in anisotropic etching properties of KOH and TMAH solutions**”, Department of Micro System Engineering, Nagoya Unifersity, Chikusa, Nagoya 464-8603, Japan

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง(ต่อ)

- [35] Bassous., “Fabrication of Novel Three-Dimensional Microstructures by the Anisotropic Etching of (100) and (111) Silicon”, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVICES, VOL. ED-25
- [36] Kenneth E. Bean., “Anisotropic Etching of Silicon”, IEEE TRANSACTIONS ON ELECTRON DEVVOILC .E S, ED-25
- [37] Gwiy-Sang Chung., “Anisotropic Etching Characteristics of Si in Tetramethylammonium Hydroxide : Isopropyl Alcohol : Pyrazine Solutions” Journal of the Korean Physical Society, Vol. 46, No. 5, May 2005, pp. 1152\_1156
- [38] GREGORY T. A. KOVACS., “Bulk Micromachining of Silicon”, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 86
- [39] สมเกียรติ ศุภเดช., “เคมีคอนดักเตอร์ฟิลิกส์”, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2544.
- [40] ดุสิต เครื่องงาม, “สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิลิกส์ เทคโนโลยีและการทำงาน” สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 2542
- [41] J.T.L. Thong, W.K. Choi , C.W. Chong., “TMAH etching of silicon and the interaction of etching parameters”, Microelectronics Laboratory. Department of Electrical Engineering. National University of Singapore, 10 Kent Ridge Crescent. Singapore 119260. Singapore
- [42] Q-print electronic GmbH., “Technologien & Informationen”, [Online]. Available : <http://www.q-print.de>
- [43] 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)
- [44] Michael Kohler, “Etching in microsystem technology”, Wiley-VCH, 1999



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] งามจิต มงคลธนานนท์, วุฒิไกร คำอ่อน, ธนกฤต แสงโสง, ยุทธนา แจ้งอรุณ, วรเทพ น้อยปรีชา และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาสมบัติของกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง  $Al/n-Si/Al$  แบบอินเตอร์ดิฟิเคชันที่มีระยะห่างชั้นไฟฟ้าขนาดสั้น” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 663-666, 18-20 พ.ย. 2558
- [2] งามจิต มงคลธนานนท์, จิรวัดน์ ปราบเขต, รังสรรค์ เมืองเหลือ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษากำหนดร่องรูปตัวสำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสง UMSM โดยสารละลาย TMAH” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8, หน้า 177=180, 25-27 พ.ค. 2559



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๓๘  
The 38<sup>th</sup> Electrical Engineering Conference (EECON-38)

EECON

UTCC University of the Thai Chamber of Commerce  
มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)  
ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)  
ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)  
อิเล็กทรอนิกส์ (EB)  
การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)  
ไฟโตนิกส์ (PH)  
วิศวกรรมชีวการแพทย์ (BE)  
คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (EP)

Volume II  
AEC Synergy

วันที่ ๑๘ - ๒๐ พฤศจิกายน พ.ศ. ๒๕๕๘  
โรงแรมบุรี อโยธยา คอนเวนชัน รีสอร์ท จังหวัดพระนครศรีอยุธยา

UTCC School of Engineering  
MAN MANAGEABLE INSULATOR  
QTC QTC ENERGY PCL  
CROWN CERAMICS  
RITTA  
EEAAT

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### การศึกษาสมบัติของกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิจิทอล ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น

#### Study on the I-V Characteristics of Al/n-Si/Al short electrodes Interdigitated Photodetectors

งามจิต มงคลชนานนท์, วุฒิไกร คำอ่อน, ธนกุลต แสงโฮง, ยุทธนา แจ่มอรุณ, วรเทพ น้อยปรีชา, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถ. จลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

#### บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เสนอการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น การสร้างโดยใช้ซิลิคอนเทคโนโลยีซึ่งลักษณะเด่น คือ การออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง MSM แบบอินเตอร์ดิจิทอลที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น (S) มีขนาดเท่ากับ 2  $\mu\text{m}$  และ 3  $\mu\text{m}$ , ความกว้างฟิงเกอร์ (W) 20  $\mu\text{m}$ , ความยาวของฟิงเกอร์ (L) เท่ากับ 1 mm และจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 4 ขั้ว ผลการทดลองพบสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM ที่กระแสมีค่าเท่ากับ 120 nA โดยที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2  $\mu\text{m}$  มีค่ากระแสเท่ากับ 1.02 mA และระยะห่างขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 3  $\mu\text{m}$  มีค่ากระแสเท่ากับ 0.9 mA พบว่าที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าจะทำให้กระแสแสงมีค่ามากกว่าระยะห่างขั้วไฟฟ้า

คำสำคัญ: ตัวตรวจวัดแสง, โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

#### Abstract

This paper about the characteristics of Al / n-Si / Al short electrode interdigitated photodetectors. The fabricated using silicon technology, which is the structural design characteristics of short electrode interdigitated photodetectors. They have many characteristics, such as 2  $\mu\text{m}$  and 3  $\mu\text{m}$  of electrode spacing (S), 20  $\mu\text{m}$  electrode width (W), 1 mm electrode length (L) and there are 4 electrodes. From the experimental results, photodetector electrical properties and optical properties are found that dark current is 120 nA. While electrode space is 2  $\mu\text{m}$ , a photo current is 1.02 mA. And while spaced electrodes is 3  $\mu\text{m}$ , a photo current is 0.9 mA. The conclusion is the short electrode photodetector have good photo current than long electrode photodetector.

Keywords: photodetector, Metal-Semiconductor-Metal

#### 1. บทนำ

โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal) หรือโครงสร้าง MSM เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มของซีดีไอโอด โดยมียุคประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง

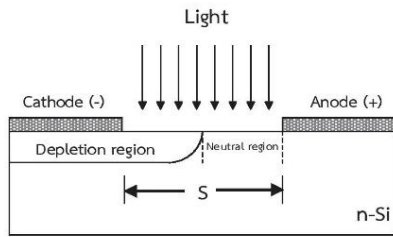
โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสชนิดคัลคีย์ 2 รอยสัมผัสต่อหน้าหลังชนกัน มีคุณสมบัติเด่นคือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาเนอร์ กระบวนการสร้างง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM [1]

ตัวตรวจวัดแสง (Photodetector) จะทำหน้าที่เป็นตัวตรวจจับแสงหรือพลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบเพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวตรวจวัดแสงที่ใช้งานในปัจจุบันนี้มีหลายชนิด เช่น โฟโตคอนดักเตอร์ (Photoconductor) ที่อินโฟโตไดโอด (p-n photodiode : PN PD) พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode : PIN PD) โลหะสารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด (Metal-Semiconductor Photodiode : MS PD) และอะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche Photodiode : APD) เป็นต้น การเลือกใช้ตัวตรวจวัดแสงให้เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้งานเป็นสิ่งที่จะต้องพิจารณาเป็นอันดับต้น ๆ [2]

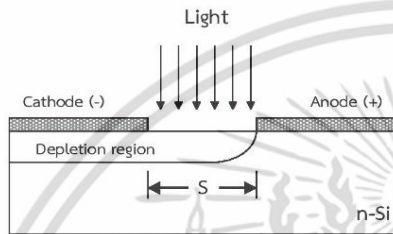
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบเชิงรวมที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์แห่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าสั้น ซึ่งความหมายของโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง คือ โครงสร้าง MSM ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับที่เหมาะสมกับการใช้งาน แล้วเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ในขณะที่ขั้วกันยังคงเหลือส่วนบริเวณที่เป็นกลางที่เรียกว่าบริเวณนิวทรัล (Neutral Region) ระหว่างบริเวณปลอดพาหะกับรอยสัมผัสชนิดคัลคีย์ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงจากโครงสร้าง MSM รูปแบบนี้ พบว่ากระแสแสงจะเกิดขึ้นสองส่วนเป็นกระแสแสงโฟโตคอนดักเตอร์ ( $I_c$ ) และ กระแสแสงโฟโตไดโอด ( $I_p$ ) จึงทำให้เกิดจุดเด่น คือ สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน ในทางกลับกันโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดสั้นจะหมายถึงโครงสร้าง MSM ที่ได้รับแรงดันไบอัสแล้วบริเวณปลอดพาหะจะครอบคลุมช่องรับแสงทั้งหมดไม่มีบริเวณนิวทรัล ซึ่งทำให้มีจุดเด่นตรงที่รับกระแสแสงมากขึ้น ในขณะที่ขั้วกันจะได้รับแรงดันตรงทางความถี่เพิ่มขึ้น แต่โครงสร้างแบบนี้ไม่สามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยแรงดัน [2-5]

EL02

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง



รูปที่ 2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแคบ

ในการศึกษานางวิจัยนี้ เพื่อเน้นเสนอตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น โดยทำการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นค่าต่าง ๆ ได้แก่ 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux และกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่แรงดัน 5 V

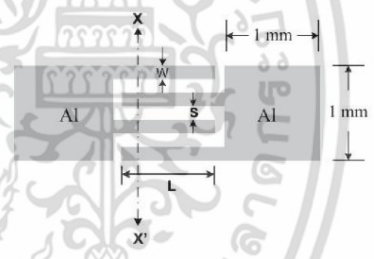
2. กระบวนการสร้างและการวัด

2.1 กระบวนการสร้าง

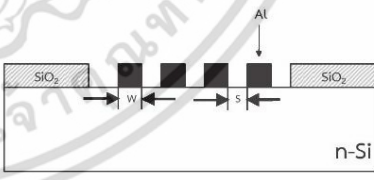
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบอินเวอร์ตจีจิก โดยออกแบบเป็นส่วนของโลหะที่ทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสจุดสัมผัสที่มีลักษณะเป็นซี่คล้ายส้อม (Fork Shape) หรือฟิงเกอร์ (Finger Shape) อยู่บนฐานรองซิลิคอน และส่วนของขั้วไฟฟ้าที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อไปยังภายนอก (Bonding Pad) จะอยู่บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ โดยขนาดของขั้วไฟฟ้าจะมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัส ขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และกำหนดให้ขั้วไฟฟ้าทางด้านซ้ายเป็นขั้วแคโทด และขั้วไฟฟ้าทางด้านขวาเป็นแอโนด ส่วนระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (Electrode Spacing : S) มีระยะขั้วไฟฟ้าเป็น 2 และ 3  $\mu\text{m}$  ส่วนความกว้างของฟิงเกอร์ (Finger Width : W) มีขนาด 20  $\mu\text{m}$  ความยาวของฟิงเกอร์ (Electrode Length : L) ขนาด 1 mm และจำนวนฟิงเกอร์ 4 ฟิงเกอร์

จากนั้นทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้จะสร้างลักษณะของขั้วเชื่อมต่อ

ภายนอก (Bonding Pad) ขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ไว้สองแบบ (1) บนแผ่นซิลิคอน และ (2) อยู่บนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่หนา 5000 Å ดังนั้นความหนาของอคูมิเนียมจึงสร้างให้มีความหนาประมาณ  $0.7 - 1 \mu\text{m}$  เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการขาดของลวดลายอคูมิเนียมที่ขอบซิลิคอนไดออกไซด์กับซิลิคอน ดังนั้นทำการสร้างลวดลายโดยใช้เทคนิคของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) เป็นกระบวนการที่สำคัญอย่างหนึ่งในงานไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งจะต้องมีการเปิดช่องของชั้นวัสดุออกหลายครั้งตั้งแต่การออกแบบลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ โดยมีโฟโตมาสก์เป็นอุปกรณ์กำหนดลวดลายบนแผ่นเวเฟอร์ที่ใส่เทปเคลือบไวบนพื้นผิววัสดุที่จะต้องถูกทำให้เกิดเป็นลวดลาย และนำขั้วไวแสงที่ถูกใช้ในกระบวนการนี้มีด้วยกัน 2 ชนิด คือ ชนิดบวก (Positive Photoresist) และ ชนิดลบ (Negative Photoresist) นำขั้วไวแสงชนิดบวกนั้น เมื่อถูกแสงนำขั้วไวแสงจะอ่อนนุ่มจึงทำให้สามารถสกัดหลุดออกได้ด้วยน้ำล้างฟิล์ม (Developer) น้ำขั้วไวแสงที่ไม่ถูกแสงจะยึดเกาะแน่นไม่ถูกสกัดออกได้ ส่วนน้ำขั้วไวแสงชนิดลบจะเกิดผลที่ตรงกันข้ามกันในการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้จะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นประเภท (100) มีสภาพต้านทาน  $20 \Omega\text{-cm}$  กระบวนการสร้างเริ่มจากสร้างชั้นซิลิคอนออกไซด์ แล้วสกัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ออก และสร้างลวดลายชั้นโลหะอคูมิเนียม เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างชั้นงานแล้ว จึงนำอุปกรณ์ไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าและสมบัติทางแสง



รูปที่ 3 ลักษณะลวดลายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบอินเวอร์ตจีจิก (ภาพลวดลายบน)



รูปที่ 4 ตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเวอร์ตจีจิก (ภาพลวดลายขวางตามแนวแกน X-X')

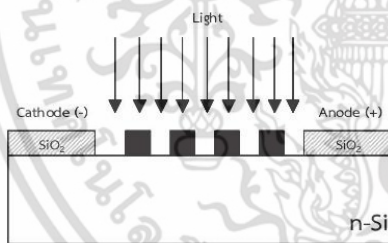
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 การทดลอง

เมื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเทอร์ดิเจต ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นนี้ได้สร้างส่วนป้องกันกับการสะท้อนแสง (Antireflection) ไว้ด้วย ดังนั้นในส่วนของพื้นที่รับแสงจึงเป็นเพียงผิวหน้าผลึกซิลิคอนเท่านั้น สำหรับในบทความนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง การทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แสงตกกระทบโวลทิจและสัญญาณแบบ DC (Direct Current) ซึ่งจะทำการวัดถึงความสามารถของตัวตรวจวัดแสงที่ความเข้มต่างๆ และยังจะทำการศึกษาผลของกระแสแสง (Photocurrent :  $I_{photo}$ ) ที่เปลี่ยนแปลงไปในการทดลองนี้มีแหล่งกำเนิดแสงคือหลอดฮาโลเจน (Halogen Lamp) ซึ่งเป็นแสงที่ตามองเห็นได้ (Visible light) โดยมีความยาวคลื่นในช่วง 400-700 nm



รูปที่ 5 ตัวอย่างตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al

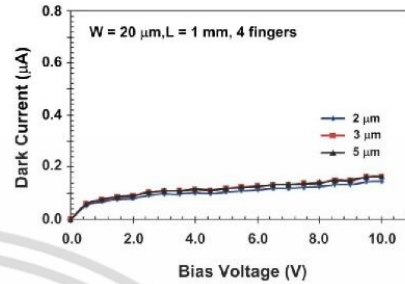


รูปที่ 6 จำลองการวัดลักษณะสมบัติทางแสง

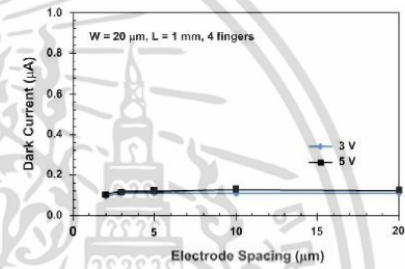
3. ผลการทดลองและการอภิปราย

จากผลการทดลองได้กราฟดังรูปที่ 7 จากกราฟจะพบการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสระหว่างช่วงไฟฟ้าหรือระยะ S = 2 และ 3  $\mu\text{m}$  จะอยู่ในความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบอัสเท่ากับ 0.3 และ 1.2 V ตามลำดับ ส่วนกระแสมืดหรือกระแสรั่วไหล (Dark Current :  $I_{dark}$ ) ที่แรงดันไบอัส 5 V มีค่าเท่ากับ  $1.07 \times 10^{-7}$  A และ  $1.20 \times 10^{-7}$  A ตามลำดับ

ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันหมายความว่าระยะ S ที่เปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นไม่มีผลกระทบต่อกระแสมืด



รูปที่ 7 กระแสมืดกับแรงดันไบอัสของตัวตรวจวัดแสงที่ระยะ S = 2, 3 และ 5  $\mu\text{m}$

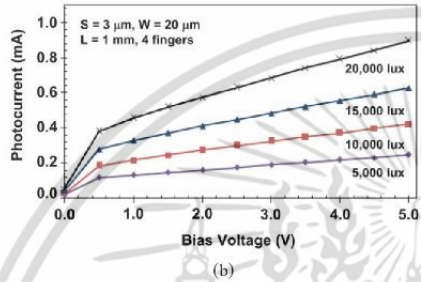
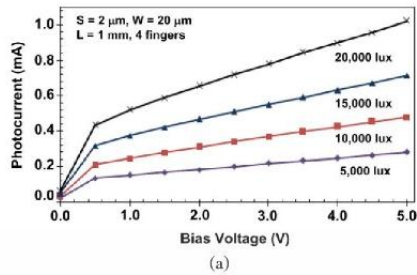


รูปที่ 8 กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีระยะ S = 2, 3, 5, 10 และ 20  $\mu\text{m}$

รูปที่ 8 กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al ที่มีระยะ S ค่าต่างๆ ตั้งแต่ 2 - 20  $\mu\text{m}$  กระแสมืดมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ  $1.2 \times 10^{-7}$  A นั่นคือไม่มีนัยสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงระยะ S เพราะว่า พื้นที่ของรอยสัมผัสชนิดคอกซ์ที่ขั้วแคโทดมีค่าเท่ากัน แต่ถ้าพิจารณาที่แรงดันที่ค่าแตกต่างกันพบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 5 V จะได้กระแสมืดมากกว่าที่แรงดัน 3 V เนื่องจากในช่วงไบอัสย้อนกลับมีกระแสที่เกิดจากพาหะ (Generation Current) ที่บริเวณปลอดพาหะที่ขั้วแคโทดมีค่ามากกว่ากระแสการรวมตัว (Recombination Current)

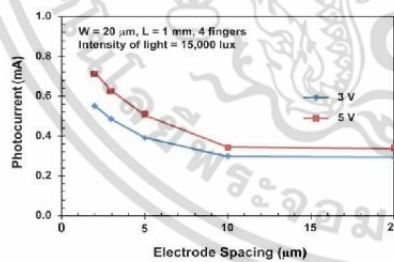
การทดลองนี้จะทำการฉายแสงตัวตรวจไปยังตัวตรวจวัดแสง โดยใช้หลอดฮาโลเจน ฉายลงบนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบอินเทอร์ดิเจต โดยมีความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นค่าต่าง ๆ ได้แก่ 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux ผลที่ได้พบว่าความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นทำให้กระแสแสงที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังรูปที่ 4 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ระยะ S = 2 และ 3  $\mu\text{m}$  มีค่า 1.02 และ 0.90 mA ตามลำดับ ที่แรงดัน 5 V ความเข้มแสง 20,000 lux ดังรูปที่ 9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 9 ลักษณะสมบัติกระแสแสงกับแรงดันไบอัสที่ความเข้มแสงต่างๆ (a) ระยะเวลา S = 2 μm และ (b) S = 3 μm

จากรูปที่ 10 จะพบว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ที่มีระยะ S ค่าต่างๆ ตั้งแต่ 2 - 20 μm พบว่าที่แรงดันคงที่ที่ค่าหนึ่ง (ที่แรงดันไบอัส 5 V) โครงสร้าง MSM ที่มีระยะ S ที่สั้นกว่าจะมีกระแสแสงมากกว่า จะต่างจากโครงสร้าง MSM ที่มีระยะ S ที่มีขนาดกว้าง (S = 10 และ 20 μm) กระแสจะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงที่ต่างกัน



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงกับแรงดัน ที่เปลี่ยนแปลง S ค่าต่างๆ

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการทดลองสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสง MSM โครงสร้าง Al/n-Si/Al ควบคุมแบบอินเทอร์ดิคิตท จากผลการทดสอบผลของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากับกระแสแสง จะได้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความ

เข้มแสงมากขึ้น สำหรับอัตราส่วนของกระแสแสงต่อกระแสมืดที่ความเข้มแสง 15,000 lux และแรงดันไบอัส 5 V ของตัวตรวจวัดแสงที่มีระยะ S = 2 และ 3 μm มีค่าประมาณ 6,680 และ 5,240 เท่า และผลของลักษณะสมบัติกระแสแสงกับระยะ S ค่า พบว่า เมื่อให้แรงดันคงที่ที่ค่าหนึ่ง (ที่แรงดันไบอัส 5 V) โครงสร้าง MSM ที่ระยะ S ที่สั้นกว่าจะมีกระแสแสงมากกว่า จะต่างจากโครงสร้าง MSM ที่ระยะ S ที่มีขนาดกว้าง (S = 10 และ 20 μm) กระแสแสงจะมีค่าเท่ากัน เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงที่แตกต่างกัน

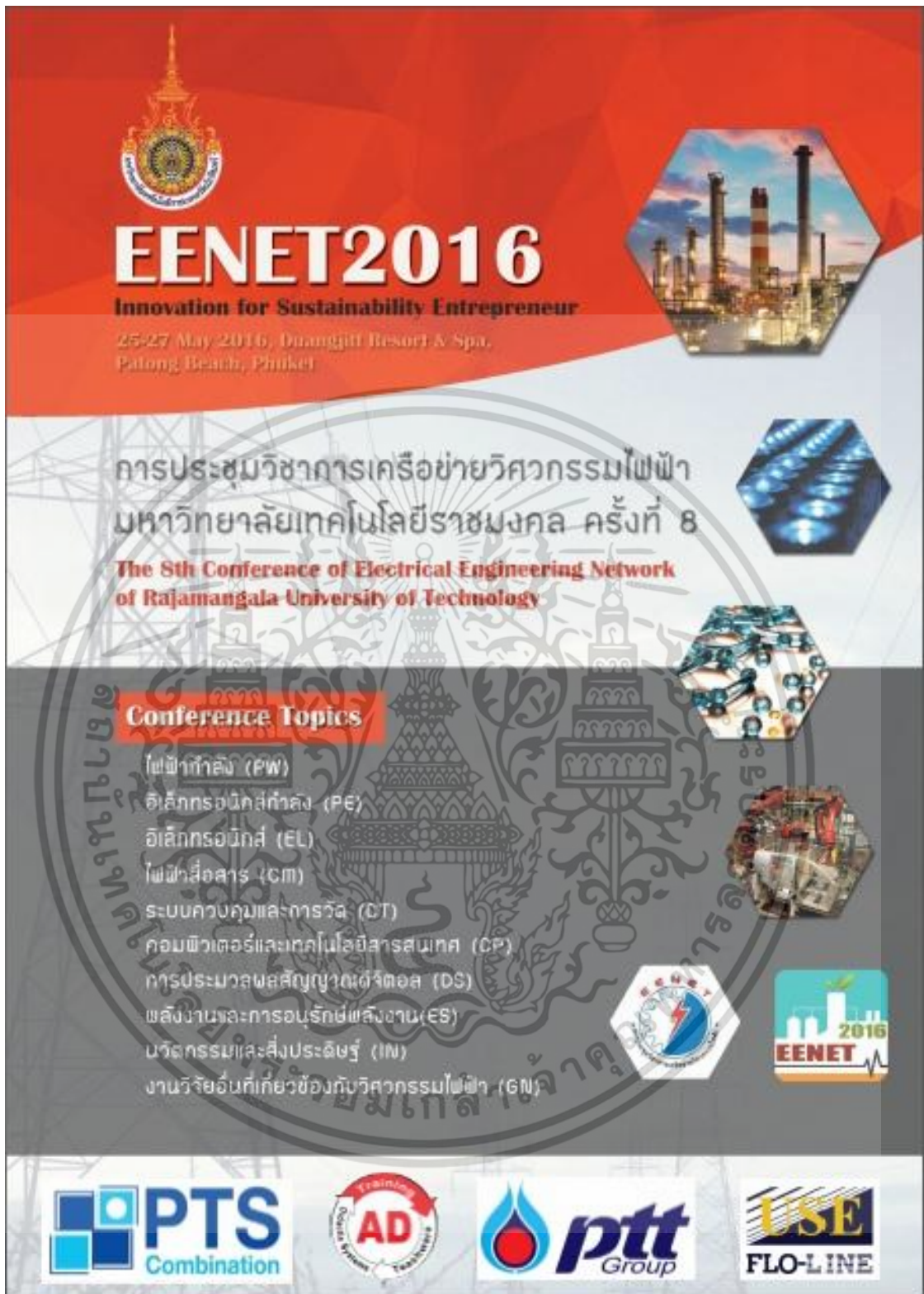
5. กิตติกรรมประกาศ


ขอขอบคุณศูนย์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความรู้และอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างและตรวจวัดชิ้นงาน


เอกสารอ้างอิง


- [1] วรเทพ น้อยริธา., การออกแบบและการสร้างโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่ระยะขั้วไฟฟ้าสั้น. บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2552
- [2] สุรดา เอี่ยมมาะพรมย์., ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si(Pt-Doped)/Cr. บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2556
- [3] สมเกียรติ สุขเดช., เซมิคอนดักเตอร์โฟโวลท์. พิมพ์ครั้งที่ 4, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [4] สมเกียรติ สุขเดช., เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์. พิมพ์ครั้งที่ 2, แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [5] คุณิต เครื่องงาน., สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์เทคโนโลยี และการใช้งาน. เล่ม 1, สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2542
- [6] S.M. Sze, Physics of Semiconductor Devices, 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, 1981
- [7] P.Bhattacharya, Semiconductor Optoelectronic Devices, 2<sup>nd</sup> Ed., Prentice-Hall, Inc., New Jersey 1997
- [8] S. B. Alexander, Optical Communication Receiver Design, SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1997
- [9] B. Boratynski, B. Paszkiewicz and M. Szreter, "GaN MSM UV Photodetectors", Microwaves, Radar and Wireless Communications, Vol. 3, 2002, pp. 735-73

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้











  
**EENET2016**  
**Innovation for Sustainability Entrepreneur**  
 25-27 May 2016, Duangjit Resort & Spa,  
 Patong Beach, Phuket

  
 การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8  
**The 8th Conference of Electrical Engineering Network  
 of Rajamangala University of Technology**

  
**Conference Topics**

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- อิเล็กทรอนิกส์ (EL)
- ไฟฟ้าสื่อสาร (CM)
- ระบบควบคุมและการวัด (CT)
- คอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ (CP)
- การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล (DS)
- พลังงานและการอนุรักษ์พลังงาน (ES)
- นวัตกรรมและสิ่งประดิษฐ์ (IN)
- งานวิจัยอื่นที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

## การศึกษาการกัดร่องรูปตัวยูสำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสง UMSM โดยสารละลาย TMAH

### Study on the U-shape Etching for Photodetector UMSM by TMAH Solutions

งามจิต มงคลธนานนท์<sup>1</sup>, จิรวัดน์ ปราบเขต<sup>2</sup>, รัชสรค์ เมืองเหลือ<sup>1</sup> และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เลขที่ 1 ขอบคลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520 E-mail:ngarmjit.mongkonthanant@gmail.com  
<sup>2</sup>ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา 24000

ELO4

## บทคัดย่อ

การศึกษากระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) กับแผ่นผลึกซิลิคอนเป็นชนิดเอ็นที่มีระนาบ (100) การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนนั้นจะใช้ช่วงเวลาแตกต่างกัน 1, 3, 6, และ 9 นาที ที่อุณหภูมิ 80°C อัตราการกัดเท่ากับ 0.59  $\mu\text{m}/\text{min}$  และการผสมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เพื่อลดอัตราการกัดอลูมิเนียม (Al) โดยทำการเติมซิลิคอนผงลงในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ในปริมาณ 3, 5, 7.5 และ 10 กรัม ตามลำดับ แล้วทำการศึกษ้อัตราการกัดซิลิคอนและอัตราการกัดอลูมิเนียม พบว่าการเติมซิลิคอนลงไปให้อัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้มีอัตราการกัดอลูมิเนียมลดลงอัตราการกัดเท่ากับ 0.02  $\mu\text{m}/\text{min}$  และอัตราการกัดซิลิคอนเท่ากับ 0.06  $\mu\text{m}/\text{min}$  ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบนั้นมีค่ากระแสมืดที่สูงมาก และในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบค่ากระแสแสงที่สูงเช่นกัน ซึ่งค่ากระแสมืดที่สูงนั้นจะนำไปพัฒนาและแก้ไขการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะเป็น U-shape ให้ดีขึ้นในอนาคตต่อไป

คำสำคัญ: ตัวตรวจวัดแสง, โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ, ลักษณะตัวยู

## Abstract

The anisotropic silicon etching by Tetramethyl ammonium Hydroxide (TMAH) solution. The n-type silicon wafer plane (100). Etching silicon wafer is used different time, 1, 3, 6, and 9 minutes at 80 °C. Etching rate of silicon to 0.59  $\mu\text{m}/\text{min}$ . And silicon powder into the solution TMAH:H<sub>2</sub>O in volume 3, 5, 7.5 and 10 g, respectively. Then study the etching rate of silicon and aluminum. The study shows that the addition of silicon into the appropriate ratio will make the etching rate of aluminum fell. Etching rate of aluminum to 0.02  $\mu\text{m}/\text{min}$  and etching rate of silicon to 0.06  $\mu\text{m}/\text{min}$ . The electrical properties of photodetector while there is no illumination the dark current is very high and while receiving illumination the photo current high as well. The dark current,

the higher will be taken to improve and correct the problem of photodetector with a U-shape for the better in the future.

Keywords: Photodetector, Metal-Semiconductor-Metal, U-Shape

## 1. บทนำ

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM หรือ โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภทกลุ่มของซีดทีทีไอโอค โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสซีดทีทีไอโอค 2 รอยสัมผัสต่อบนพื้นหลังซิลิคอน มีคุณสมบัติเด่นคือ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการคอบสนองที่ดี มีโครงสร้างที่ง่ายต่อการกระบวนการสร้าง และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM อย่างหลากหลาย ซึ่งงานวิจัยที่เคยทำมาแล้วส่วนใหญ่จะเป็นโครงสร้างแบบทลานาร์ [1] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบเชิงราบ

ส่วนในงานวิจัยนี้จะทำการเปลี่ยนจากโครงสร้างแบบเชิงราบหรือแบบทลานาร์เป็นแบบกึ่งร่องลึกลงไปเป็นลักษณะร่องรูปตัวยู (U-Shape) เทคนิคการกัดร่องลึกจะใช้สารละลาย TMAH ในกระบวนการกัดแบบเปียก (Wet etching) การกัดซิลิคอนโดยใช้สารละลายนี้จะทำให้เกิดสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) คือ เป็นการเลือกระนาบและทิศทางในการกัดซิลิคอน ซึ่งอัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ (100) > (110) > (111) [2-4] ซึ่งจะทำให้เราได้โครงสร้างที่เราต้องการดังรูปที่ 2

25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตร์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต

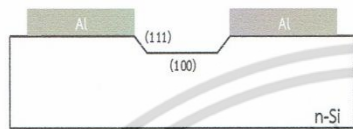
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)

สารละลาย TMAH นี้สามารถใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตชิมอสได้แตกต่างจากสารละลาย KOH ซึ่งอาจทิ้งโลหะอัลคาไลน์ (alkali metal) ของโพแทสเซียมซึ่งทำให้ไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตมอส (MOS) และชิมอส (CMOS) ได้ [5] แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH<sub>4</sub>OH) เป็นหนึ่งในไฮดรอกไซด์ที่ไม่มีโลหะอัลคาไลน์และสามารถเจือจางไปกับน้ำได้ง่ายต่อการกำจัดทิ้ง อีกทั้งแอมโมเนียมสามารถที่จะระเหยออกไปจากสารละลายเมื่อใช้อุณหภูมิสูง



รูปที่ 2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบ U-shape

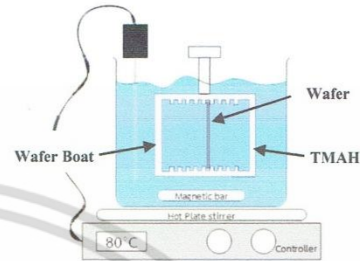
การกัดแผ่นซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยูจะทำให้เพิ่มพื้นที่ในการรับแสงของตัวตรวจวัดแสงโดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และขณะเดียวกันนั้นจะลดอัตราการกัดอูมิเนียมที่ใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าให้หน้อยลง ซึ่งทำการศึกษานี้เพื่อหาอัตราการกัดที่เหมาะสมกับสร้างตัวตรวจวัดแสง UMSM

**2. กระบวนการสร้าง**

ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงนี้เริ่มจากกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเพื่อกำจัดสิ่งปนเปื้อนที่อยู่บนแผ่นซิลิคอน สร้างลักษณะรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสชนิดออคไซด์ 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ 1 mm<sup>2</sup> ดังนั้นความหนาของอูมิเนียมจึงสร้างให้มีความหนาประมาณ 2 μm โดยการสร้างสวดลายโดยจะใช้เทคนิคของกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) เป็นการเปิดช่องของชั้นวัสดุออกหลายครั้งตามแต่การออกแบบลักษณะโครงสร้างของอุปกรณ์ โดยมีโฟโตมาสก์เป็นอุปกรณ์กำหนดความละเอียดของแสงที่ได้ทำการเคลือบน้ำยาไวแสงบนพื้นผิววัสดุที่จะต้องถูกทำให้เกิดเป็นสวดลาย เมื่อถูกแสงน้ำยาไวแสงจะอ่อนนุ่มจึงทำให้สามารถสกัดหลุดออกได้ด้วยน้ำล้างที่ส้ม (Developer) น้ำยาไวแสงที่ไม่ถูกแสงจะยึดเกาะแน่นไม่ถูกสกัดออกได้ กระบวนการสร้างจะทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

การสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีลักษณะเป็น U-shape โดยใช้กระบวนการกัดแบบเปียก หลังจากทำการสร้างเป็นดังตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM แบบพลาเนอร์แล้ว จากนั้นจะเป็นขั้นตอนของกระบวนการกัดโดยใช้สารละลาย TMAH ที่อุณหภูมิ 80 °C โดยมีเงื่อนไข

เป็นสารละลาย TMAH, TMAH:H<sub>2</sub>O (1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5) และผสมกับผงซิลิคอนปริมาณ 3, 5, 7.5 และ 10 กรัม ตามลำดับ จะใช้เวลาในกระบวนการกัดเป็นช่วงเวลา 1, 3, 6, และ 9 นาที จะเห็นดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 อุปกรณ์กระบวนการกัด

**3. ผลการทดลอง**

**3.1 การกัดซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O**

จากการศึกษาความลึกของแผ่นซิลิคอน หลังผ่านกระบวนการกัดแล้ว โดยใช้สารละลาย TMAH, TMAH:H<sub>2</sub>O และผสมผงซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH จะใช้เวลาในกระบวนการกัดเป็นช่วงเวลา 1, 3, 6, และ 9 นาที

เมื่อวัดความลึกของชิ้นงานแล้ว นำค่าความลึกที่ได้มาพล็อตกราฟจะพบว่าสารละลาย TMAH และ TMAH:H<sub>2</sub>O ดังรูปที่ 4 การกัดแผ่นซิลิคอนโดยสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่มีอัตราส่วน 1:2 สามารถกัดแผ่นซิลิคอนได้ลึกที่สุด เมื่อเติมผงซิลิคอนลงในสารละลายจะทำให้อัตราการกัดซิลิคอนลดลงด้วย เนื่องจากซิลิคอนที่ถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น Si(OH)<sub>4</sub> หรือ SiOH<sup>-</sup> (เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์) ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับอะตอมไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย และกรด Orthosilic acid แดกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นน้ำไฮโดรเจน [6-7] เป็นไปตามสมการที่ 1



**3.2 การลดการกัดอูมิเนียมโดยเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O**

จากรูปที่ 5 และ 6 จะพบว่าเมื่อเติมผงซิลิคอนลงในสารละลายจะทำให้การกัดซิลิคอนและอูมิเนียมลดลง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ในสารละลายนั้นส่วนมากจะทำปฏิกิริยากับผงซิลิคอนที่เติมลงไป และเมื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

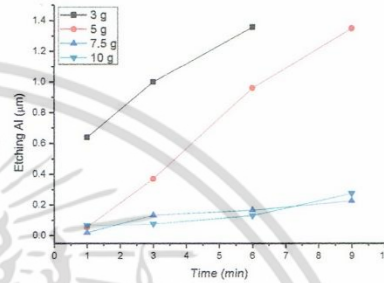
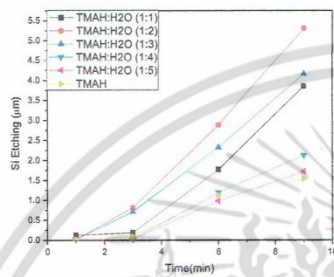
**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

*Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)*

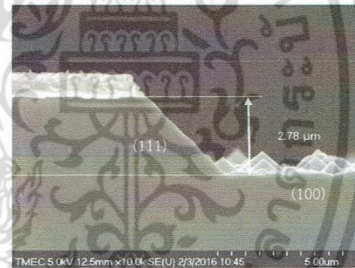
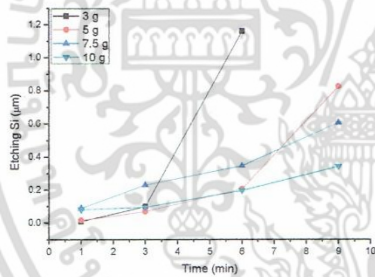
เติมซิลิคอนเพิ่มขึ้นการกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมจะลดลงเรื่อยๆ จะเห็นว่าเติมผงซิลิคอนที่ 10 กรัม การกัดซิลิคอนและอลูมิเนียมจะลดลงมากที่สุด ถ้าลดลงผงซิลิคอนลงเป็น 5 กรัม การกัดซิลิคอนและการกัดของอลูมิเนียมเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มผงซิลิคอนเป็น 7.5 กรัม ทำให้การกัดอลูมิเนียมลดลงเป็น 0.02  $\mu\text{m}/\text{min}$  ส่วนการกัดซิลิคอนเพิ่มขึ้นเป็น 0.06  $\mu\text{m}/\text{min}$

ซิลิคอนในระนาบของ (111) จะถูกกัดน้อย เนื่องจากระนาบนี้จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้าจึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุดทำให้เกิดเป็นลักษณะของรูปตัวขี้นหรือ U-shape จะได้เป็นลักษณะตามต้องการของงานวิจัย ความลึกของการกัดแผ่นซิลิคอนเท่ากับ 2.78  $\mu\text{m}$  และอลูมิเนียมที่เหลือเท่ากับ 0.82  $\mu\text{m}$



รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดซิลิคอนในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O ที่เวลาต่างๆ

รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดอลูมิเนียมในสารละลาย TMAH:H<sub>2</sub>O เติมผงซิลิคอนที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 7 ภาพตัดขวางที่เป็นลักษณะร่องรูปตัวขี้น

รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างการกัดซิลิคอนในสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนที่เวลาต่างๆ

**3.3 ภาพตัดขวางที่เป็นลักษณะรูปตัวขี้น**

ภายหลังจากการกัดซิลิคอนดังรูปที่ 7 พบว่าลักษณะการกัดซิลิคอนเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ซึ่งซิลิคอนที่ถูกกัดในทิศของระนาบ (100) มากที่สุด ซึ่งอะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกลงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ ส่วน

**3.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง**

โครงสร้างแบบร่องรูปตัวขี้น **ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ**

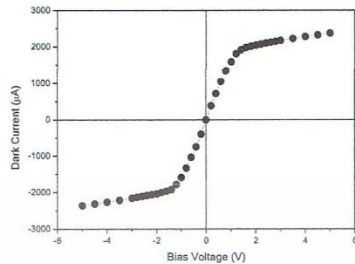
กระแสมืด ( $I_{\text{dark}}$ ) มีการเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส โดยมีค่าสูงขึ้นเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กระแสมืดที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลดคทาหะเพิ่มขึ้นด้วย และยังมีลักษณะกราฟที่สมมาตร ซึ่งเป็นลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในงานวิจัยนี้ตัวตรวจวัดแสงมีโครงสร้างที่เปลี่ยนไปจากเดิมซึ่งเป็นแบบร่องรูปตัวขี้นพบว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวขี้นมีกระแสมืดมากแสดงดังรูปที่ 8

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8

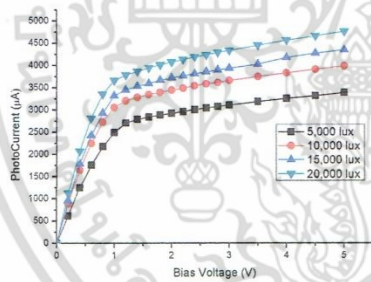
Proceedings of the 8<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2016 (EENET 2016)



รูปที่ 8 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจจับ โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

**3.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจจับ โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ**

ผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจจับ โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู เมื่อวัดที่ความเข้มแสง 5,000, 10,000, 15,000 และ 20,000 lux ที่แรงดัน 5 V แสดงดังรูปที่ 11 พบว่ากระแสแสง ( $I_{photo}$ ) ที่วัดได้นั้นมีค่าสูง เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับแสงด้วยการกัดเป็นร่องรูปตัวยู ทำให้ตัวตรวจจับแสงมีค่าของกระแสแสงมากขึ้น



รูปที่ 9 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจจับ โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบด้วยความเข้มแสง 5,000 10,000 15,000 และ 20,000 lux

**4. สรุปผลการทดลอง**

การศึกษาการกัดแผ่นซิลิคอนเป็นลักษณะแบบร่องรูปตัวยู (U-shape) โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) พบว่าการกัดแผ่นซิลิคอนมีปัจจัยหลายอย่างเป็นองค์ประกอบ

ในการกัดคือการควบคุมอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการกัดเป็น 80°C ระยะเวลาในการกัดขึ้นกับความลึกที่ต้องการ และอัตราส่วนผสม TMAH:H<sub>2</sub>O คือ 1:2 ทำให้ได้อัตราการกัดซิลิคอนมากที่สุดเป็น 0.59 µm/min เมื่อเติมผงซิลิคอนที่ 7.5 กรัม เพื่อช่วยลดอัตราการกัดคือมีนิยมนเป็น 0.02 µm/min และอัตราการกัดซิลิคอนเท่ากับ 0.06 µm/min ผลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสงในขณะที่ไม่ได้แสงตกกระทบนั้นมีค่ากระแสมืดที่สูงมากและในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบค่ากระแสแสงที่สูงเช่นกัน ซึ่งค่าของกระแสมืดที่สูงนั้นจะนำไปพัฒนาและแก้ไขการสร้างตัวตรวจจับแสงที่มีลักษณะเป็น U-shape ให้ดีขึ้นในอนาคตต่อไป

**5. กิตติกรรมประกาศ**

บทความนี้ขอขอบคุณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความรู้และคำแนะนำต่างๆ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และสำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ที่เอื้ออำนวยความสะดวกในการศึกษาที่เป็นประโยชน์แก่งานวิจัย

**เอกสารอ้างอิง**

- [1] ธนศ โสชน, “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจจับแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2548
- [2] ธัญญะ สักดีโสภณ, “ทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิคอนแบบเปียโซโซลิตที่ปบบไดอะแฟรมบาง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2534
- [3] ศรีเมษรัตน์ชัย, “เทคนิคการกัดแผ่นซิลิคอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2542
- [4] Darling R.B. “Wet Etching” [Online]. Available : [http://www.virlab.virginia.edu/manoscience\\_class/lecture\\_notes/Microfabrication\\_Supporting\\_materials\\_files/WetEtching.pdf](http://www.virlab.virginia.edu/manoscience_class/lecture_notes/Microfabrication_Supporting_materials_files/WetEtching.pdf). 2015
- [5] Bo Cui. “Microfabrication and thin film technology” [Online]. Available : <http://ece.uwaterloo.ca/~bcui/>. 2015
- [6] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “รอยสัมผัสโลหะสารกึ่งตัวนำ” สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [7] D. Xuefeng, “Microfabrication Using Bulk Wet Etching with TMAH” Master Degree Thesis of McGill University. 2005

25-27 พฤษภาคม พ.ศ. 2559 โรงแรมดวงจิตต์ รีสอร์ท แอนด์ สปา จังหวัดภูเก็ต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. อนุญาตให้นำไปใช้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

