

การเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยการเพิ่ม
ขนาดพีระมิดแบบสุ่มด้วยการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH

PHOTOCURRENT ENHANCEMENT OF UMSM PHOTODETECTOR BY
INCREASE RANDOM PYRAMID SIZE WITH TMAH DOPED SILICIC ACID



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

KMITL-2018-EN-M-043-054

การเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยการเพิ่ม
ขนาดพีระมิดแบบสุ่มด้วยการเติมกรดซิลิซิกในสารละลาย TMAH

PHOTOCURRENT ENHANCEMENT OF UMSM PHOTODETECTOR BY
INCREASE RANDOM PYRAMID SIZE WITH TMAH DOPED SILICIC ACID



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

PHOTOCURRENT ENHANCEMENT OF UMSM PHOTODETECTOR BY
INCREASE RANDOM PYRAMID SIZE WITH TMAH DOPED SILICIC ACID



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
2018

KMITL-2018-EN-M-043-054

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วย โดยการเพิ่มขนาดพีระมิดแบบสุ่ม ด้วยการเติมกรดซิลิซิกในสารละลาย TMAH

Thesis Title Photocurrent Enhancement of UMSM Photodetector by Increase Random Pyramid Size with TMAH Doped Silicic Acid

นักศึกษา นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ





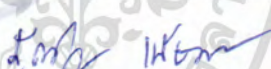
รหัสประจำตัว 59601181

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-043-054

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	
ผศ.ดร.รังสรรค์	เมืองเหลือ	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
ผศ.ดร.โยธิน	วงศ์ประเสริฐ	
รศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 09.00-11.00 น.
สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-301 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องนำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยการเพิ่มขนาดพีระมิดแบบส้อมด้วยการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH
นักศึกษา	นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ
รหัสนักศึกษา	59601181
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบร่องรูปตัวยู (U-shaped Metal-Semiconductor-Metal: UMSM) ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก โดยกำหนดความลึกของร่องรูปตัวยูประมาณ 4-5 μm ในการทดลองนี้จะใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH: $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$) ความเข้มข้น 5 wt% และผสมด้วยกรดซิลิซิก (silicic acid: H_4SiO_4) ปริมาณตั้งแต่ 30-38 g/l ใช้ความเร็วในการกวนสารเคมี 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงคือ เงื่อนไขสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l เนื่องจากผลการทดลองในการลดอัตราการกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al) ที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้า และชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่ใช้เป็นชั้นป้องกันการกัดขั้วไฟฟ้าน้อยที่สุด และสามารถสร้างพีระมิดแบบส้อมที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นจำนวนมากบนพื้นผิวซิลิคอนภายในร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงให้แก่ตัวตรวจวัดแสง และเมื่อทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูพบว่าขณะได้รับแสงตกกระทบความเข้มแสง 25,000 lux ที่แรงดันไบอัส 10 V โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีค่ากระแสแสงเท่ากับ 63.60 μA และมีค่ากระแสแสงมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบประมาณ 2.4 เท่า จากการศึกษาพบว่าการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมกรดซิลิซิกนั้น ไม่พบการคั่งค้างของประจุโลหะหรือสารเคมีปนเปื้อนตกบนพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งสามารถสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูร่วมกับกระบวนการสร้างซีมอส (CMOS) หรือใช้งานร่วมกับวงจรรวมได้ ซึ่งเหมาะสมต่อการนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงชนิดพิเศษต่อไป

Thesis Title	Photocurrent Enhancement of UMSM Photodetector by Increase Random Pyramid Size with TMAH Doped Silicic Acid
Student	Miss Kamonwan Suttijalern
Student ID	59601181
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2018
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This thesis purpose the U-shaped Metal-Semiconductor-Metal (UMSM) photodetector fabrication on Al/n-Si/Al materials with anisotropic wet etching. The condition of fabrication has determined with a depth of U-shaped about 4 - 5 μm . In the experiment, a Tetramethylammonium hydroxide (TMAH: $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$) was used with 5 wt% concentration and mixed with the various volume of silicic acid between 30 to 38 g/l on 200 rpm spinning round at 80 degrees Celcius. From the result found the effective condition for fabricating of photodetector was a 5 wt% with 34 g/l silicic acid mixed because it giving lowest etching rate on aluminum (electrode) and silicon dioxide (passivation layer) and obtain the largest size of the pyramid structure to increase a light detecting area of the photodetector. The analysis result of planar and U-shaped structures found the photocurrent of U-shaped about 63.60 μA that higher than photocurrent of the planar structure about 2.4 times. From this study found the fabrication with the mixture of TMAH and silicic acid giving non-residue of metal ion also chemical on a surface of the photodetector that able to fabricate a the U-shaped photodetector with CMOS fabrication process and appropriated to fabricate special type photodetector in the future.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนการอบรมสั่งสอนให้ความรู้ ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียน การทำงานและการดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง, ดร.นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง, ดร.รังสรรค์ เมืองเหลือ และคณาจารย์ทุกท่าน ที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ตั้งใจให้แก่ลูกศิษย์

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC), ดร.จิรวุฒิ ปราบเขต, และนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในวิเคราะห์ผลการทดลอง ตลอดจนคำแนะนำต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณวุฒิไกร คำอ่อน และคุณยุทธนา แจ็งอรุณ ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการสร้างและการวิเคราะห์ผลการทดลองบางส่วนรวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรี ที่ช่วยเหลือทางด้านการวัดผลการทดลองที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่านที่ให้ความอุปการะทุนการศึกษา การอบรมสั่งสอน สนับสนุนด้านการศึกษาต่างๆ ค่อยเป็นกำลังใจโดยตลอดมา รวมทั้งบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

กมลวรรณ สุทธิเจริญ

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XIV
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
รายการศัพท์เทคนิค.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	6
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	7
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	7
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	10
2.1.1 ลักษณะสมบัติทางแสง.....	10
2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	11
2.1.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	12
2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดของคู่อิเล็กตรอน – โฮล.....	14
2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน – โฮล.....	16
2.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	17
2.2.1 การเกิดรอยสัมผัสแบบ肖ตต์กีในภาวะสมดุล.....	18
2.2.2 การทำงานของรอยสัมผัสแบบ肖ตต์กี.....	19
2.2.3 ลักษณะเฉพาะกระแส – แรงดันของรอยสัมผัส肖ตต์กี.....	21
2.3 ตัวตรวจวัดแสง.....	22
2.3.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.2 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส	24
2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบ	25
2.4 กระบวนการกัด	27
2.4.1 กระบวนการกัดแบบแห้ง	28
2.4.2 กระบวนการกัดแบบเปียก	28
2.4.2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายที่ใช้กัด	29
2.4.2.2 การสร้างโครงสร้างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอน	30
2.4.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก	33
2.4.3.1 สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH)	34
2.4.3.2 กรดซิลิซิก (silicic acid)	34
2.4.4 ปฏิกิริยาการกัดซิลิคอน	36
2.4.5 ปฏิกิริยาการกัดอะลูมิเนียม	42
2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	44
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง	47
3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู	48
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย	49
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นซิลิคอนเพื่อใช้ในสร้างตัวตรวจวัดแสง แบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al	49
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของตัวตรวจ วัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al	50
3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและวัดสมบัติทางไฟฟ้า	51
3.3 กระบวนการสร้าง	52
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน	52
3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม	53
3.3.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์	53
3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	54
3.3.5 การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด	57
3.3.6 กระบวนการกัด	59

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.7 กระบวนการขึ้นเตอรัง	61
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	62
4.1 การศึกษาการกัดของสารละลายที่ใช้กัดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู	62
4.1.1 การศึกษาสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก.....	65
4.1.1.1 อัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์	67
4.1.1.2 อัตราการกัดซิลิคอน.....	68
4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก	70
4.2.1 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิค SEM ของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก.....	71
4.2.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของบริเวณผิวซิลิคอนของตัวตรวจ วัดแสงแบบร่องรูปตัวยู.....	73
4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนความขรุขระด้วยเทคนิค AFM ของ บริเวณผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู.....	74
4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบและร่องรูปตัวยู	75
4.3.1 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสง ตกกระทบ.....	75
4.3.2 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสง ตกกระทบ.....	77
4.4 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง แบบร่องรูปตัวยูในแต่ละสารละลายที่ใช้กัด.....	81
4.4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู	81
4.4.1.1 การวิเคราะห์การกัดซิลิคอน และอะลูมิเนียม	81
4.4.1.2 ลักษณะพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอน	83
4.4.1.3 ความแตกต่างของสารละลายที่ใช้กัด.....	86
4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสง	88
4.4.2.1 ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ	88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.2.2 ขณะได้รับแสงตกกระทบ	89
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	92
เอกสารอ้างอิง	95
ภาคผนวก ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์	102
ประวัติผู้เขียน.....	114



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ.....	15
2.2 คุณสมบัติการเกิดรอยสัมผัสโหม้มิคและรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี.....	21
3.1 การเตรียมกรดซิลิซิกที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการกัดของตัวตรวจ วัดแสงแบบร่องรูปตัวยู.....	58
4.1 การเปรียบเทียบอัตราการกัดซิลิคอนระหว่างสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% และสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l เวลาที่กัด 30 นาที	69
4.2 ค่าความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดแต่ละเงื่อนไข.....	74
4.3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฐานและค่าเฉลี่ยความสูงของพีระมิดแบบสุ่มของพื้นผิว ซิลิคอนหลังการกัดสารละลายแต่ละเงื่อนไข ที่ความลึกประมาณ 4-4.6 μm	86
4.4 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติเฉพาะของสารละลาย EDP KOH และ TMAH	87
4.5 องค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวซิลิคอน หลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid	87
4.6 การเปรียบเทียบค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ เชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ในเงื่อนไขของสารละลาย KOH และสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิกหลังการขึ้นเตอริง ที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$	88
4.7 การเปรียบเทียบค่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ในเงื่อนไขของสารละลาย KOH และสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิกหลังการขึ้นเตอริง ที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$	91

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า	
1.1	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์กึ่ง (ก) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) (ข) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM).....	2
1.2	อัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยทำการเปลี่ยนแปลงการเติมผงซิลิคอนลงไปในการละลาย TMAH	3
1.3	กระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการเติมผงของซิลิคอนลงไปในการละลาย TMAH	4
1.4	ภาพถ่ายเปรียบเทียบการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มบนพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย KOH 20 %wt ในการกัด (ก) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 4 นาที และ(ข) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 10 นาที	5
1.5	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH.....	5
2.1	ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำ (ก) ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบตรง (ข) ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบไม่ตรง.....	12
2.2	แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำขนาดความหนาบาง.....	13
2.3	การดูดกลืนแสงภายในสารกึ่งตัวนำ.....	13
2.4	การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค.....	14
2.5	การเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิค (ก) ชนิดเอ็น และ (ข) ชนิดพี	16
2.6	กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง และ (ข) แบบโดยอ้อม.....	16
2.7	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมพันธ์กึ่ง.....	18
2.8	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมพันธ์กึ่ง.....	18
2.9	แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมพันธ์กึ่ง (ก) แรงดันไบอัสตรง และ (ข) แรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	20
2.10	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีอติคิไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น	22
2.11	ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์กึ่ง (ก) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง (ข) ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ	

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
(ค) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์ที่ขึ้นในสถานะสมดุล ความร้อน	23
2.12 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์ที่ขึ้นเมื่อได้รับแรงดันไบอัส	24
2.13 แถบพลังงานของโครงสร้างสองรอยสัมพันธ์ที่ขึ้น เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ .	25
2.14 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	27
2.15 ลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิกและการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (ก) ไอโซทรอปิก (ข) แอนไอโซทรอปิก และ (ค) แอนไอโซทรอปิกแบบสมบูรณ์.....	27
2.16 ขณะการเกิดปฏิกิริยาและหลังกระบวนการกัดแบบแห้ง	28
2.17 ขณะการเกิดปฏิกิริยาและหลังกระบวนการกัดแบบเปียก.....	29
2.18 ภาคตัดขวางของลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก.....	30
2.19 ลวดลายพีระมิดบนผิวซิลิคอน (ก) พีระมิดแบบสม่ำเสมอ และ(ข) พีระมิดแบบสุ่ม.....	31
2.20 ลักษณะการสะท้อนของแสง	31
2.21 ลักษณะการสะท้อนแสงบนวัตถุผิวเรียบและผิวขรุขระ.....	32
2.22 โครงสร้างทางเคมีของเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ก) โครงสร้างลิวิส และ (ข) โครงสร้างแบบจำลองสามมิติ	34
2.23 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก(ก) โครงสร้างลิวิส (ข) โครงสร้างแบบจำลองสามมิติ...	35
2.24 จำลองการเกิดพีระมิดแบบสุ่มจากฟองก๊าซไฮโดรเจนบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100).....	35
2.25 แผนผังของพื้นระนาบซิลิคอน (ก) ระนาบ (100) และ (ข) ระนาบ (111).....	37
2.26 ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic).....	37
2.27 ทิศทางโครงสร้างผลึกของซิลิคอน (ก) พื้นระนาบอะตอมซิลิคอนระนาบ (100) (ข) พื้นระนาบอะตอมซิลิคอนระนาบ (110) (ค) พื้นระนาบอะตอมซิลิคอนระนาบ (111).....	38
2.28 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนระนาบ (100).....	39
2.29 แบบจำลองปฏิกิริยาเริ่มต้นของการกัดซิลิคอนระนาบ (100).....	41
2.30 แบบจำลองปฏิกิริยาสุดท้ายของการกัดซิลิคอนระนาบ (100).....	42
2.31 ภาพจำลองตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม.....	43
2.32 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม ที่เปลี่ยนแปลงไป กับสารละลาย KOH, TMAH และคู่สารเจือ TMAH	44
2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ.....	45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.34 ภาพพื้นผิวและภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 5,000 เท่า พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 wt%(ข) ภาพตัดขวางของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 wt%.....	46
2.35 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 wt% ขณะรับแสงตกกระทบ.....	46
3.1 การออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง	47
3.2 ภาพของภาคตัดขวางโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al.....	48
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นซิลิคอนเพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง จากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC).....	50
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของตัวตรวจวัดแสง จากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC).....	51
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและวัดสมบัติทางไฟฟ้า จากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC).....	52
3.6 การลอกชั้นออกไซด์ที่เกิดจากธรรมชาติ (native oxide) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก.....	53
3.7 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al.....	55
3.8 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด	59
3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด (ก) ชุดอุปกรณ์จริงที่ใช้ในกระบวนการกัด (ข) ชุดอุปกรณ์จำลองที่ใช้ในกระบวนการกัด	60
3.10 (ก) ภาพถ่าย SEM ด้านบนของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซัลฟิวริก 34 g/L (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการกัดสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซัลฟิวริก 34 g/L.....	60
3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการขึ้นเตอรืงตัวตรวจวัดแสงหลังการกัด ที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อใช้เวลาในการการขึ้นเตอรืง 15 นาที	61
3.12 ตัวตรวจวัดแสงหลังการขึ้นเตอรืงนำมาเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน.....	61
4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนกับความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ	63
4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาหลังกัดซิลิคอนในระนาบ (100) ของสารละลาย TMAH 5 wt%	64

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
4.3	แบบจำลองตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม	66
4.4	แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนระนาบ (100).....	66
4.5	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ กับกรดซิลิซิกที่ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 5 wt%	67
4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ ในการกัดของสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/L.....	68
4.7	ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาหลังกัดซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% และสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/L.....	69
4.8	พื้นผิวซิลิคอนหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% ที่เติมกรดซิลิซิก 34 g/L ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า.....	70
4.9	ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ของตัวตรวจวัดแสง ที่อุณหภูมิ 80 °C (ก) สารละลาย TMAH pure (ข) สารละลาย TMAH doped silicic acid และ (ค) ภาพตัดขวางบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าสารละลาย TMAH doped silicic acid	71
4.10	ภาพจำลองเกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าซิลิคอนระนาบ (100).....	72
4.11	สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวซิลิคอนหลัง การกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	73
4.12	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของซิลิคอนหลัง การกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส	74
4.13	เครื่องมือที่ใช้ทดสอบโพโตไดโอด เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (ก) เครื่องมือแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า (ข) เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายใน กล่องป้องกันแสง	75
4.14	ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) และแบบเชิงราบ (MSM) ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ	76
4.15	แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู.....	77
4.16	ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ (MSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ	78
4.17	ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้สารละลาย TMAH pure.....	79

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.18	ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้สารละลาย TMAH doped silicic acid.....	79
4.19	ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มแสงต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) และแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่สารละลาย TMAH pure และสารละลาย TMAH doped silicic acid ขณะได้รับแสงตกกระทบ.....	80
4.20	ภาพตัดขวาง SEM ของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ซึ่งถูกกัดที่อุณหภูมิ 80 °C (ก) แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นก่อนการกัด (ข) สารละลาย TMAH pure เวลาที่ใช้กัด 30 วินาที (ค) สารละลาย TMAH doped silicic acid เวลาที่ใช้กัด 1 ชั่วโมง	82
4.21	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอนกับเงื่อนไขสารละลายที่ใช้กัด	83
4.22	ภาพจำลองลักษณะพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก(ก) ภาคตัดขวางของพีระมิด และ (ข) ภาพด้านบนพีระมิด	83
4.23	ภาพถ่าย SEM ของการเกิดพีระมิดของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัด (ก) ภาพตัดขวางพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH [11] (ข) ภาพตัดขวางพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid (ค) ขนาดฐานพีระมิดของพื้นผิวซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย TMAH pure (ง) ขนาดฐานพีระมิดของพื้นผิวซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid (จ) ลักษณะพีระมิดของพื้นผิวซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย KOH [11].....	84
4.24	ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) และแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 lux	89
4.25	ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้สารละลาย TMAH doped silicic acid.....	90
4.26	ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ขณะรับแสงตกกระทบ.....	90

รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Al	Aluminum	อะลูมิเนียม
Al ₂ (SiO ₃) ₃	Aluminum silicates	อะลูมิเนียมซิลิเกต
Al(OH) ₃	Aluminium hydroxide	อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์
DI	De-ionization water	น้ำปราศจากประจุ
EDP	Ethylenediamine pyrocatechol	เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกคอล
ERC	Electronic Research Center	ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
eV	Electron-volt	อิเล็กตรอนโวลต์
FCC	Face Centred Cubic	เฟสเซ็นเตอร์คิวบิก
GaAs	Gallium Arsenide	แกเลียมอาร์เซไนด์
Ge	Germanium	เยอรมันเนียม
g/l	Gram per liter	กรัมต่อลิตร
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
H ₂	Gas hydrogen	ก๊าซไฮโดรเจน
H ₂ O	Water	น้ำ
IC	Integrated Circuit	วงจรรวม
InGaAs	Indium Gallium Arsenide	อินเดียมแกเลียมอาร์เซไนด์
InP	Indium Phosphide	อินเดียมฟอสไฟด์
IPA	Isopropyl alcohol	ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
MEMS	Microelectromechanical systems	ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
NaOH	Sodium hydroxide	โซเดียมไฮดรอกไซด์
NH ₄ OH	Ammonium hydroxide	แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
nm	Nanometer	นาโนเมตร
n-Si	N type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
OH ⁻	Hydroxide	อนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์
PR	Photoresist	น้ำยาไวแสง
Si	Silicon	ซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำย่อ (ต่อ)

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Si ₃ N ₄	Silicon nitride	ซิลิคอนไนไตรด์
(SiO ₃) ₃	Silicates	ซิลิเกต
SiO ₂	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
Si(OH) ₄	Silicic acid	กรดซิลิซิก
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
TMAH	Tetramethyl ammonium hydroxide	เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
UMSM	U-shaped metal-semiconductor -metal	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ- สารกึ่งตัวนำ-โลหะแบบร่องรูปตัวยู
Wt%	Weight percentage	ร้อยละโดยน้ำหนัก
μm	Micrometer	ไมโครเมตร
μA	Microamps	ไมโครแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และ XV อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการสัญลักษณ์

A	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส
A^*	คือ	ค่าคงตัวรีซาร์ดสัน
C	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
E_0	คือ	ระดับสูญญากาศ
E_A	คือ	ระดับผู้รับแบบลึก
E_a	คือ	ระดับพลังงานกระตุ้น
E_C	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
E_D	คือ	ระดับผู้ให้แบบลึก
E_F	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิ
E_{FM}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านโลหะ
E_{FS}	คือ	ระดับพลังงานเฟอร์มิด้านสารกึ่งตัวนำ
E_g	คือ	ช่องว่างพลังงาน
E_i	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
E_V	คือ	ระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์
E_T	คือ	ระดับพลังงานของจุดบกพร่อง
\mathcal{E}_S	คือ	ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ
h	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์
I_0	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับ
I_F	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสตรง
I_{MS}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านโลหะไปด้านสารกึ่งตัวนำ
I_R	คือ	กระแสไฟฟ้าด้านไบอัสย้อนกลับ
I_S	คือ	ค่ากระแสอิ่มตัวย้อนกลับหรือกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัส
I_{SM}	คือ	กระแสไฟฟ้าที่มีทิศทางไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปด้านโลหะ
I_P	คือ	กระแสแสง
I_c	คือ	กระแสคอนดักเตอร์
I_d	คือ	กระแสโพลีไดโอด

รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

J	คือ	ความหนาแน่นกระแส
k	คือ	ค่าคงที่โบสตันน์
kV	คือ	พลังงานรังสีเอกซ์
n	คือ	แฟกเตอร์อุดมคติ
N_A	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้รับ
N_A^-	คือ	ไอออนลบของอะตอมผู้รับ
N_D	คือ	ความหนาแน่นของพาหะผู้ให้
N_D^+	คือ	ไอออนบวกของอะตอมผู้ให้
q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน
T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์
V_A	คือ	แรงดันไบอัส
V_{bi}	คือ	แรงดันภายใน
W_d	คือ	ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ
χ	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อกึ่ง
ϕ_M	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
ϕ_S	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
h	คือ	ความลึกในการกัด
f	คือ	พื้นที่รับแสงแบบเชิงราบ
g	คือ	พื้นที่รับแสงของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู
θ	คือ	มุมในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก
D	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า
R_a	คือ	ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต
R_q	คือ	ความขรุขระผิวเฉลี่ยกำลังสอง
R_z	คือ	ความขรุขระผิวขนาดโดยเฉลี่ย

รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
การกัด	Etching
การกัดแบบเปียก	Wet etching
การกัดแบบแห้ง	Dry etching
การกัดแบบพลาสมา	Plasma etching
การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก	Anisotropic etching
การกัดแบบไอโซทรอปิก	Isotropic etching
การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง	Chemical dry etching
การกัดด้วยไอออนที่ ไรต์ต่อปฏิกิริยา	Reactive ion etching
การคายพลังงาน	Energy emission
การดูดกลืนแสงแบบอินทรีนซิค	Intrinsic absorption
การดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรีนซิค	Extrinsic absorption
การดูดกลืนแสงพื้นฐาน	Fundamental absorption
การไบอัสตรง	Forward bias
การไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
การแพร่กระจาย	Diffusion
การโยกย้าย	Migration
การรวมตัวแบบเปล่งแสง	Radiative recombination
การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง	Non-radiative recombination
การวัดความขรุขระผิวเฉลี่ย	Average parameter
การวัดความขรุขระผิวโดยขนาด	Amplitude parameter
การสร้างอุปกรณ์ขนาดเล็ก	Microfabrication
กรดปรั้นยา	Piranha
กรดอะซิติก	Acetic acid
กรดไนตริก	Nitric acid
กรดออร์โธซิลิก	Orthosilic acid
กรดไฮโดรฟลูออริก	Hydrofluoric acid
กระบวนการเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล	Generation process
กระบวนการซินเตอร์ริง	Sintering process

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กระบวนการดูดกลืนแสง	Absorption process
กระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะ	Recombination process
กระบวนการสปัตเตอริง	RF sputtering
กระแสมืด	Dark current
กระแสรั่วไหล	Leakage current
กระแสแสง	Photocurrent
ขอบการดูดกลืนแสงพื้นฐาน	Absorption edge
ขั้วแคโทด	Cathode
ขั้วแอโนด	Anode
ขั้วไฟฟ้าแบบสั้น	Short electrode gap
ขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง	Wide electrode gap
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	Depletion width
ความยาวคลื่นคัทออฟ	Long wavelength cutoff
ฉนวน	Insulator
ชั้นป้องกันในการกัด	Hard mask
ช่องว่างแถบพลังงาน	Energy gap
ตัวตั้งต้น	Reactants
ตัวตรวจวัดแสง	Photodetectors
ตัวนำไฟฟ้า	Conductor
ตัวสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเนียน	Lambertian reflectors
ไตรโคลโรเอทธีลีน	Trichloroethylene
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band
แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบตรง	Direct band gap semiconductor
แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบไม่ตรง	Indirect band gap semiconductor
แถบวาเลนซ์	Valence band
เนินพีระมิดแบบสุ่ม	Hillock
เนื้อสารกึ่งตัวนำ	Bulk
น้ำยาขึ้นลวดลาย	Developer

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และให้อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
น้ำยาไวแสง	Photoresist
เบ้าหลอมสาร	Crucible
ปฏิกิริยาแตกตัว	Decomposition reaction
ปฏิกิริยารีดอกซ์	Redox reaction
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน	Oxidation state
ปฏิกิริยาไฮเดรชัน	Hydration reaction
ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก	External photoelectric effect
โปรตอน	Proton
ผลผลิตของปฏิกิริยา	Reaction products
พันธะเคมี	Chemical bond
พันธะหลัก	Back-bond
พลังงานยึดเหนี่ยว	Binding energy
พาหะส่วนมาก	Majority carrier
พาหะส่วนน้อย	Minority carrier
พีระมิดแบบสุ่ม	Random pyramid
พื้นผิวซิลิคอนโครงสร้างขรุขระ	Surface texturing
ฟังก์ชันงาน	Work function
โฟโตมาร์ก	Photomask
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
โฟตอน	Photon
ภาคตัดขวางการจับยึด	Capture cross section
รีดักชัน-ออกซิเดชัน	Reduction-oxidation
ระดับพลังงานระดับลึก	Deep level energy
ระดับพลังงานดักจับ	Energy trap
เรคทีไฟร์	Rectifier
แรงดันพังทลาย	Breakdown voltage
รอยสัมผัสช็อตต์กี	Schottky contact

รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ

Metal-semiconductor contact

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
รอยสัมผัสโห้มิค	Ohmic contact
ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก	Deep acceptor level
ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก	Deep donor level
ระดับพลังงานเฟอร์มิ	Fermi energy
ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	Electron-beam evaporation
เลเซอร์	Laser
โลหะอัลคาไล	Alkali metal
สนามแสง	Optical field
สิ่งปนเปื้อน	Contamination
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	p-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	n-type semiconductor
สารประกอบเชิงซ้อน	Complexing agent
สารละลายบัฟเฟอร์	Buffer solution
อัลลอย	Alloy
อะซิโตน	Acetone
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	Electronegativity
เอธิลีนไดแอมมีน	Ethylenediamine
แอนไอโซทรอปิก	Anisotropic
ไอโซทรอปิก	Isotropic
ไฮดราซีน	Hydrazine
ไฮโดรไลซิส	Hydrolysis

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

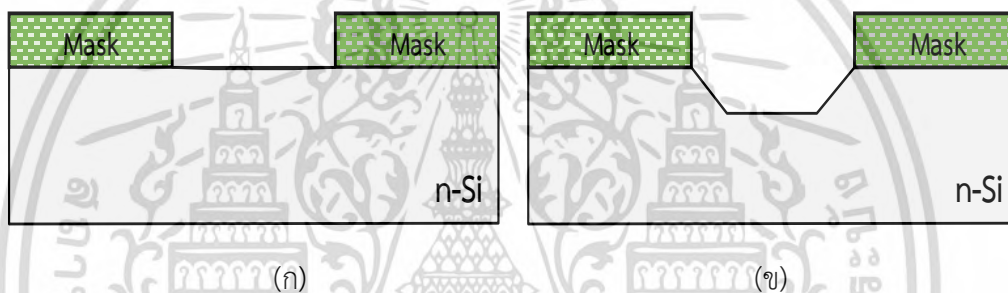
สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำในปัจจุบันมีการพัฒนากันอย่างกว้างขวาง และมีความก้าวหน้าเป็นอย่างมาก ความหลากหลายของแนวทางในการพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ ดังเช่น การใช้พลังงานไฟฟ้าต่ำ เพื่อให้สามารถใช้ร่วมกับเครื่องใช้ไฟฟ้าแบบพกพาได้ ขั้นตอนการสร้างลดลง เพื่อลดต้นทุนการผลิตและทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้ามีราคาถูกลง ประสิทธิภาพการทำงานด้วยความเร็วสูง เพื่อให้ระบบหรือเครื่องมือมีการตอบสนองได้ทันที [1] และคิดค้นหรือหาวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้าง เพื่อให้ทำให้สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่สามารถทนความร้อนสูงได้ มีความเสถียรภาพในการทำงานที่ดี วัสดุหนึ่งที่น่าสนใจมีบทบาททางด้านอุตสาหกรรมที่สามารถนำมาประยุกต์สร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ คือ ซิลิคอน เป็นวัสดุหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาใช้งานทางด้านอุตสาหกรรมกันอย่างแพร่หลาย ทั้งในภาคอุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เช่น อุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนสารกึ่งตัวนำในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เนื่องจากซิลิคอนมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ซึ่งมีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.12 eV และค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนของวัสดุซิลิคอนมีค่าการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสงค่าต่างๆ ความยาวคลื่นที่มีการดูดกลืนแสงได้ดี คือ 480 nm ถึง 600 nm เนื่องจากย่านนี้มีความเข้มแสงสูงสุด [2] ในการพัฒนาทางด้านอิเล็กทรอนิกส์สารกึ่งตัวนำ ถือได้ว่าเป็นพื้นฐานในการสร้างอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อีกมากมาย หนึ่งในอุปกรณ์ที่มีความน่าสนใจนั้นคือ ตัวตรวจจับแสง เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ง่าย และมีค่าใช้จ่ายในการสร้างที่ไม่แพง สภาพการตอบสนองที่ดี สัญญาณรบกวนต่ำ และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย เป็นต้น [1] จุดเด่นเหล่านี้คาดว่าน่าจะมีบทบาทในอนาคตข้างหน้าต่อไป

ตัวตรวจจับแสง (photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณทางแสงจากพลังงานโฟตอนของแสงที่ตกกระทบ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวตรวจจับแสงที่ใช้กันมีหลายชนิดด้วยกัน เช่น พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) พี-ไอ-เอ็นโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode) และ โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด (M-S photodiode) เป็นต้น [3] ในแต่ละชนิดจะมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันจะขึ้นอยู่กับจุดประสงค์ที่นำไปใช้งาน ตัวตรวจจับแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal: MSM) จัดอยู่ในชนิดของโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด เป็นโครงสร้างที่กำลังได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีกระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อน เพราะมีชั้นโลหะเพียงชั้นเดียวที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำโดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสขั้วต่อกึ่งสองรอยสัมผัสต่อกัน โดยทำให้ลดขั้นตอนในการออกแบบลวดลายกระจัดต้นแบบเพียงหนึ่งแผ่นเท่านั้น ทำให้ประหยัดเวลาและขั้นตอนการสร้างลง โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะจะมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบสั้น (short electrode gap) [4] และขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง (wide electrode gap) [5] ซึ่งจะมีลักษณะการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำงานที่ต่างกัน โดยที่ขั้วไฟฟ้าแบบสั้นไม่สามารถใช้แรงดันควบคุมปริมาณกระแสได้ มีข้อจำกัดในขั้นตอนการสร้างลวดลาย แต่สำหรับขั้วไฟฟ้าแบบกว้างจะสามารถใช้แรงดันควบคุมปริมาณกระแสได้ และมีง่ายต่อกระบวนการสร้าง ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM)

จากงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาทางทฤษฎีและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อที่ผ่านมานั้น ได้มีศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) ออกมาอย่างต่อเนื่อง ตลอดจนมีการพัฒนากลายเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะแบบร่องรูปตัวยู (U-shaped metal-semiconductor-metal: UMSM) [6-8] ดังแสดงในรูปที่ 1.1 เนื่องจากพื้นที่รับแสงของโครงสร้างแบบเชิงราบจะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น แต่การสร้างโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูจะสามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า



รูปที่ 1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อที่

(ก) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM)

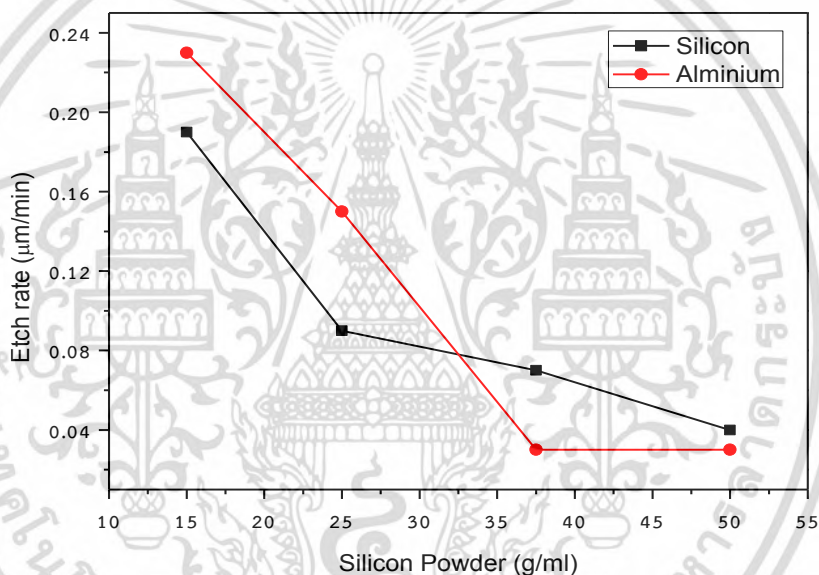
(ข) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM)

ในส่วนของการละลายที่ใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) มีอยู่หลายชนิดโดยส่วนมาก คือ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม มีราคาถูกและโดยทั่วไปจะใช้ความเข้มข้นต่างไฮดรอกไซด์ของสารละลายใช้กัดซิลิคอน การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกระดับสูง แต่สารละลาย KOH จะกัดโลหะอะลูมิเนียมอย่างรวดเร็วและไม่นิยมนำไปในงาน CMOS เนื่องจากโพแทสเซียมไอออนที่หลงเหลืออยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน สารละลายเอธิลีนไดแอมมีน ไพรอคาทิกคอล (EDP) เป็นสารละลายไดอะมินที่เป็นพื้นฐานสำหรับกัดซิลิคอน ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกระดับต่ำสามารถใช้กับงาน CMOS ได้ [9] แต่สารละลาย EDP ระเหยได้อย่างรวดเร็ว ต้องใช้อุปกรณ์เครื่องมือในการกัดที่ซับซ้อน และต้องมีความระมัดระวังในขณะที่ทำการกัด เพราะสารละลายจะระเหยก๊าซที่เป็นพิษออกมา ซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพ จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นพิเศษ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน สารละลาย

TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้ว่าจะมีราคาสูง เพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตราย เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือไม่มีพิษและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับร่วมกับวงจรรวม (IC) และงาน CMOS [10] ได้ ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง เป็นต้น ซึ่งมีตัวอย่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

ในปี พ.ศ. 2559 ได้มีบทความในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโดยมีโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการลดอัตราการกัดชั้นอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH เอาไว้ เนื่องจากในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงของบทความนี้ได้ทำการสร้างขั้วโลหะอะลูมิเนียมไว้บนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) ไว้อยู่แล้ว ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าเมื่อเติมผงซิลิคอนลงในสารละลายด้วยปริมาณ 37.5 กรัมต่อลิตร เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดสำหรับงานวิจัยนี้ที่ลดการกัดอะลูมิเนียมที่ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ในขณะเดียวกันการเติมผงซิลิคอนกลับทำให้อัตราการกัดของซิลิคอนลดลงไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ในบทความนี้จึงต้องใช้ระยะเวลาพอสมควรในการกัดให้พื้นผิวของซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยู [6]

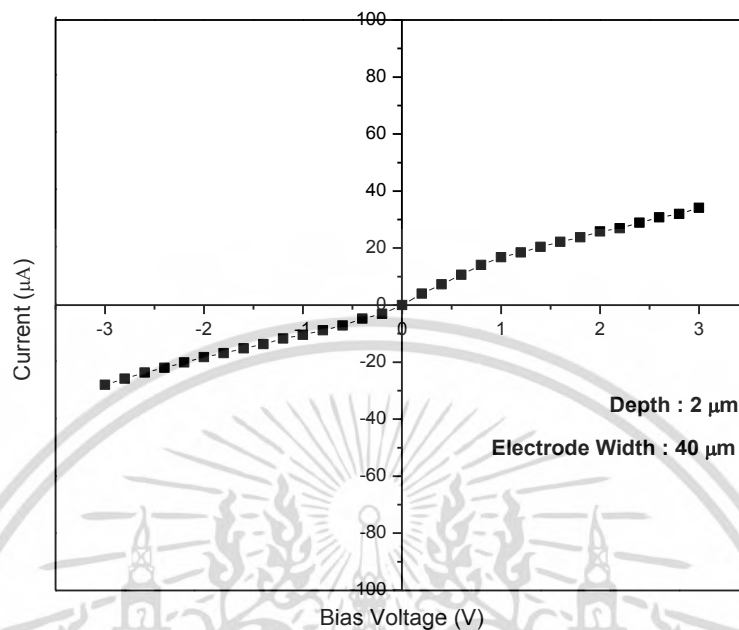


รูปที่ 1.2 อัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยทำการเปลี่ยนแปลงการเติมผงซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH [6]

และในปีเดียวกัน ได้มีบทความในการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ที่ใช้สารละลาย TMAH ในกระบวนการกัด เมื่อทำการทดสอบหาค่ากระแสรั่วของอุปกรณ์กลับพบว่าค่ากระแสรั่วอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูง ดังแสดงในรูปที่ 1.3 และที่สาเหตุของกระแสรั่วอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงนี้อาจมีสาเหตุมาจากในกระบวนการกัดของสารละลาย TMAH จะทำการกัดเนื้อของอะลูมิเนียมออกมาด้วย ซึ่งอะลูมิเนียมที่ถูกกัดออกมานี้จะรวมตัวกับสารละลายกลายเป็นสารประกอบตัวหนึ่งและสาเหตุที่สำคัญอาจเป็นบริเวณรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมกับเนื้อซิลิคอนที่ไม่สมบูรณ์จนทำให้เกิดกระแสรั่วที่อยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงได้และสาเหตุอีกอย่างหนึ่งอาจจะมาจากการเติมผงซิลิคอนลงในสารละลายเพื่อลดอัตราการกัดอะลูมิเนียม ซึ่งผงของ

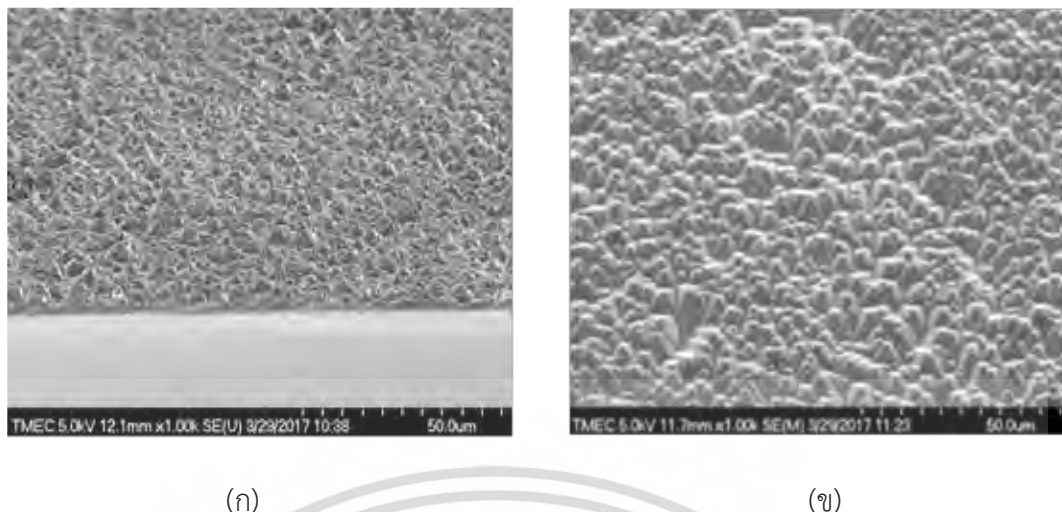
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซิลิคอนที่ทำการเติมลงไปอาจจะตกตะกอนอยู่ในสารละลายและตะกอนนี้อาจตกค้างอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานจึงอาจจะส่งผลทำให้กระแสรั่วที่ทำการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงก็เป็นไปได้ [7]

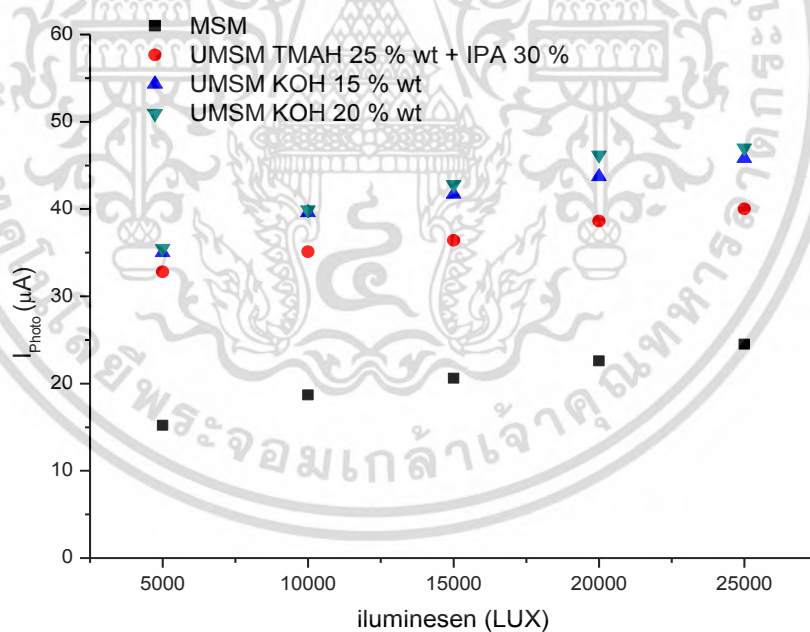


รูปที่ 1.3 กระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการเติมผงของซิลิคอนลงไปในการละลาย TMAH [7]

ในปี พ.ศ. 2560 ได้มีบทความในการสร้างโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งนั่นคือโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการกัดพื้นผิวซิลิคอนให้เกิดเป็นพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู เพื่อใช้เพิ่มกระแสแสง ซึ่งในกระบวนการสร้างนี้จะเกิดจากการใช้สารละลาย KOH ในกระบวนการกัดที่มีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก จากผลการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 20 wt% ทำการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่ม (random pyramid) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 เนื่องจากการเกิดของพีระมิดแบบสุ่มจะเกิดจากการแพร่ของอะตอมไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) เข้ายังเนื้อสารและจับตัวกับอะตอมของซิลิคอนจนถูกดึงออกสู่สารละลายในระบบ และในรูปที่ 1.5 จากการทดสอบการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู เมื่อทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยูทำให้ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม อันเนื่องมาจากการสร้างพีระมิดแบบสุ่มเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง จึงทำให้ได้ค่ากระแสแสงเพิ่มมากขึ้นประมาณ 2.3 เท่า [8]



รูปที่ 1.4 ภาพถ่ายเปรียบเทียบการกระจายตัวของพริสมิตแบบสุ่มบนพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย KOH 20 %wt ในการกัด (ก) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 4 นาที และ(ข) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 10 นาที [8]



รูปที่ 1.5 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพริสมิตแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการพัฒนากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ชนิด Al/n-Si/Al ต่อจากงานวิจัยดั่งที่กล่าวมาข้างต้น โดยใช้กระบวนการกัดเป็ยกด้วยสารละลายเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethyl ammonium hydroxide: TMAH) เนื่องจากสารละลาย TMAH ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษ การกัดพื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม และเป็นสารละลายที่ไม่มีประจุโลหะตกค้าง และสามารถใช้งานร่วมกับวงจรรวมได้ [11] และกรดซิลิซิก (silicic acid) เนื่องจากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ที่เหมาะสมจะช่วยให้ลดการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ โดยไม่ส่งผลต่อลักษณะการกัดซิลิคอนในระนาบอื่น ในกระบวนการสร้างนี้จะเกิดจากการใช้สารละลายในกระบวนการกัดที่มีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นการลดการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียมที่ต้องการให้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่สมบูรณ์ ทั้งนี้สามารถลดกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นชั้นหน้ากปกป้องกันการกัดขั้วไฟฟ้า รวมไปถึงการลดปริมาณการใช้ของสารละลาย TMAH ให้ลดลง เพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดขั้นตอนการสร้างโครงสร้างบางส่วนของตัวตรวจวัดแสง เพื่อประหยัดเวลาในการสร้าง นอกเหนือจากนั้นการกัดเป็ยกแบบแอนไอโซทรอปิกจะมีลักษณะการกัดในระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) จะทำให้ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนเป็นพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู ซึ่งเป็นส่วนสำคัญอย่างหนึ่งในงานวิจัยนี้ที่ต้องการสร้างขนาดและจำนวนพีระมิดให้เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสร้างพีระมิดที่มีขนาดใหญ่และมีความหนาแน่นของพีระมิดภายในร่องรูปตัวยูของตัวอุปกรณ์นั้น จะเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงมากขึ้น แสงสะท้อนกลับน้อยลงหรือลดการสูญเสียแสงจากการสะท้อนออกจากตัวอุปกรณ์ ทำให้ปริมาณการดูดกลืนแสงมากขึ้น เพิ่มการกระตุ้นของแสงทำให้เกิดจำนวนคู่อิเล็กตรอน-โฮลมาก ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงมีค่าสูง ซึ่งคาดว่าสามารถเป็นอุปกรณ์ชนิดพิเศษสำหรับการนำไปใช้งานที่ให้ความเข้มแสงต่ำได้ดี

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเป็ยกแบบแอนไอโซทรอปิก โดยใช้สารละลาย TMAH และการเติมกรดซิลิซิก เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) โดยเลือกขั้วไฟฟ้าโลหะเป็นอะลูมิเนียม (Aluminum: Al) เคลือบโดยใช้เทคนิคอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง และสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้ในการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียม (Al) ให้มีอัตราการกัดลดลง เพื่อลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ทำหน้าที่เป็นหน้ากปกป้องกันการกัดอะลูมิเนียมซึ่งเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

2. ศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (สามารถใช้ร่วมกับกระบวนการสร้างซีมอส) ด้วยการกัดเป็ยกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH และกรดซิลิซิกแทนการใช้สารละลายที่อาจทิ้งโลหะอัลคาไลน์ (alkali metal) ไว้บนตัวตรวจวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูหลังเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริง ที่มีผลต่อกระแสและแรงดัน ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ
4. ศึกษาการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ
5. เปรียบเทียบแต่ละเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดให้มีความเหมาะสมในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ที่ส่งผลต่อกระแสและแรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

จากวัตถุประสงค์การวิจัยนี้ที่ต้องการศึกษากระบวนการกัดตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดทีจีซีโดยการใช้สารละลาย TMAH และเติมด้วยกรดซิลิซิก โดยหวังว่าการใช้กรดซิลิซิก จะช่วยปรับปรุงลักษณะพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดให้มีการเพิ่มขึ้นของจำนวนพีระมิดที่เกิดขึ้น ระหว่างบริเวณภายในขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงให้ดียิ่งขึ้น สำหรับการทดลองแบ่งเป็น 3 ส่วนหลัก ดังต่อไปนี้

ส่วนแรก ทำการสร้างรอยสัมผัสชนิดทีจีซีจากการเคลือบชั้นอะลูมิเนียม (Al) ด้วยวิธีอาร์เอฟสปัตเตอริงลงบนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ระบาย (100) มีสภาพต้านทาน 5-10 $\Omega \cdot \text{cm}$ จากนั้นทำการออกแบบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างร่องรูปตัวยูโดยการคำนวณหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ สำหรับใช้ในการกำหนดความลึกในการกัดของร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบเชิงราบ

ส่วนที่สอง ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง เพื่อใช้ในงานวิจัย โดยสร้างตัวตรวจวัดแสงลงบนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระบาย (100) โดยมีปัจจัยและเงื่อนไขในการสร้าง คือ การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH ที่ไม่มีการเติมกรดซิลิซิก และการผสมกรดซิลิซิก โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกรดซิลิซิก 30, 32, 34, 36 และ 38 g/l ลงในสารละลาย TMAH อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด 80 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องกวาดสารละลายหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่ความลึกในการกัดซิลิคอนในช่วง 4-5 μm จากนั้นทำการวัดลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

ส่วนสุดท้าย ทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูกับโครงสร้างแบบเชิงราบ ได้แก่ คุณสมบัติกระแส - แรงดัน ซึ่งในกรณีที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ เรียกกระแสที่เกิดขึ้นว่า กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด และกรณีมีแสงตกกระทบ โดยมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในช่วง 5,000 – 25,000 lux เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์กระแสแสงที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสง

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีและความเข้าใจในหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงรอยสัมผัสชนิดทีจีซีแบบสองรอยสัมผัส ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ความรู้ความเข้าใจถึงการออกแบบโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงขณะมีแสงตกกระทบ

3. ศึกษาเกี่ยวกับผลของการเติมกรดซิลิซิก ลงในสารละลาย TMAH ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู

4. ศึกษาเกี่ยวกับผลกระทบของพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดในลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่มที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

5. ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการวัดและวิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู หลังนำตัวตรวจวัดแสง $Al/n-Si/Al$ ไปผ่านกระบวนการซินเตอร์ริง ที่เปรียบเทียบกับระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูกับโครงสร้างแบบเชิงราบ และสรุปผลการทดลอง

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและเรียนรู้กระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกสำหรับการสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ชนิด $Al/n-Si/Al$ โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของตัวตรวจวัดแสงตั้งแต่โครงสร้างแบบเชิงราบตลอดจนถึงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ในหัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ของการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ชนิด $Al/n-Si/Al$ ขอบเขตของงานวิจัย และส่วนสุดท้าย คือ ขั้นตอนของงานวิจัยและวิธีการดำเนินงานในครั้งนี้

บทที่ 2 ทฤษฎี เป็นการกล่าวถึงสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ เช่น การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ การเกิดและการรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน - โฮล จากนั้นกล่าวถึงการเกิดรอยสัมผัสแบบช็อตต์กีย์ในภาวะสมดุล รวมทั้งได้อธิบายลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ขณะมีแสงตกกระทบ ในตอนท้ายจะกล่าวถึงการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายที่ใช้กัด สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก และปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนกับอะลูมิเนียม รวมถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในการสร้างตัวตรวจวัดแสง

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้างประกอบด้วย การออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างร่องรูปตัวยู อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดและเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและวัดสมบัติทางไฟฟ้า กระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอนและกระบวนการกัดตัวตรวจวัดแสงที่สำคัญไว้พอสังเขป รวมถึงขั้นตอนการเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด จากนั้นนำไปวัดลักษณะทางกายภาพและทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานทางไฟฟ้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งประกอบด้วย การศึกษาการกัดของสารละลายที่ใช้กัดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิก จากนั้นกล่าวถึงการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบและร่องรูปตัวยู ในตอนสุดท้ายของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทจะทำการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัว
ยูในแต่ละสารละลายที่ใช้กัก

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้ทำ โดยมี
ข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาและการประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยใน
อนาคตต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นวัสดุทางไฟฟ้าที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) และมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้า (conductor) กับฉนวน (insulator) สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้าในสภาวะปกติแต่สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ไฟฟ้า หรือความร้อนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ ที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า และสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าได้ วัสดุที่มีสมบัติดังกล่าว ได้แก่ ซิลิคอน (Si) และเจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งใช้เป็นวัสดุหลักในชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

2.1.1 ลักษณะสมบัติทางแสง

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่ง เดินทางในรูปเคลื่อนที่มีอัตราเร็วสูง โดยแสงสามารถแสดงตัวเป็นได้ทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” [8] ซึ่งปรากฏการณ์ของแสงที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทพลังงานมักจะอธิบายได้โดยพิจารณาว่าแสงเป็นอนุภาค พลังงานของแสงไม่ได้กระจายไปตามลำแสงแต่รวมกันอยู่ในบริเวณที่จำกัด เหมือนอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่และเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน (photon) จากงานวิจัยของแพลงค์ (Planck) เกี่ยวกับการเปล่งแสงจากวัตถุดำ ซึ่งพบว่าพลังงานของแสงมีค่าเป็นจำนวนเท่าของหน่วยพลังงานที่มีค่าต่ำสุดค่าหนึ่ง ขนาดของหน่วยพลังงานนี้เรียกว่าควอนตัม (quantum) ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงโดย

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

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

โดยที่	v	คือ	ความถี่ (Hz)
		คือ	ความยาวคลื่นแสง (μm)
	c	คือ	ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec
	h	คือ	ค่าคงที่ของแพลงค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J·s
	q	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

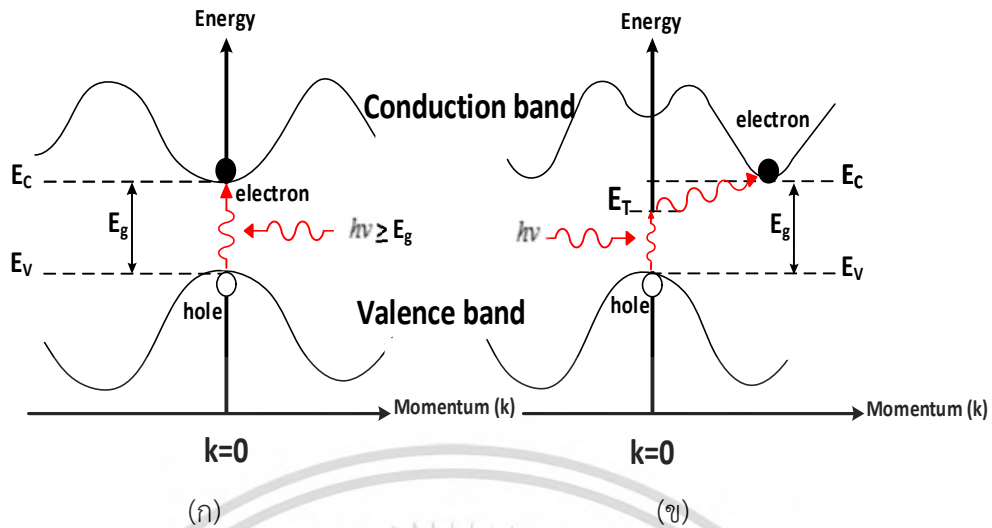
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อค่าพลังงานโฟตอนแสงมากกว่าขนาดช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{photon}} \geq E_g$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้ทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ โดยความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง

2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบตรง (direct band gap semiconductor) คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน ($E_g = h$) ลักษณะแถบพลังงานในลักษณะของฟังก์ชันของเลขคลื่น (wave number: k) ของอิเล็กตรอน ซึ่งก็คือโมเมนตัม ในกรณีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ตรงกับจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ตำแหน่งของ $k=0$ พอดี เมื่ออิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงานทรานซิชั่นจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึกซึ่งจะสอดคล้องกับกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม การเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานอิเล็กตรอนจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม (k) ของอิเล็กตรอน เนื่องจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับแถบระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าอยู่ตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกัน นั่นคือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ก) ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ได้แก่ อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และอินเดียมฟอสไฟด์ (InP) เป็นต้น

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) คือ โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดต่ำสุดของแถบวาเลนซ์ไม่อยู่ที่ตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากัน จึงไม่มีสถานะพลังงานใดๆ ที่จะรองรับอิเล็กตรอนข้างบนในแนวตั้ง ดังนั้นอิเล็กตรอนจะต้องได้รับพลังงานโฟนอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงานแล้วมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม โดยการมีอันตรกิริยากับโครงร่างผลึก ทำให้มีการรับหรือถ่ายเทโมเมนตัมกับโครงร่างผลึกที่กำลังสั่นอยู่นั่นเอง ดังแสดงในรูปที่ 2.1 (ข) ปรากฏการณ์นี้ค่าโมเมนตัมของระบบจะยังคงถูกรักษาให้คงที่ไว้ จึงทำให้การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงเกิดขึ้นได้ ดังนั้นสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรงจึงมีคุณสมบัติทางแสงไม่ค่อยดี เช่น การเปล่งแสงหรือดูดกลืนแสงได้น้อย จึงไม่เหมาะสมที่จะนำสารกึ่งตัวนำประเภทนี้มาผลิตเป็นอุปกรณ์ทางแสง ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ คือ เยอรมันเนียม (Ga) และซิลิคอน (Si) เป็นต้น แต่ในกรณีตัวตรวจวัดแสงหรือเซลล์แสงอาทิตย์นิยมใช้งานสารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะซิลิคอน เนื่องจากมีราคาถูก และวัสดุมีจำนวนมาก



รูปที่ 2.1 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงาน

อิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ

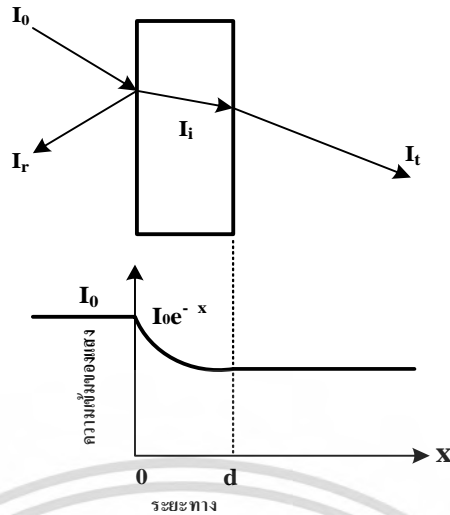
(ก) ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบตรง

(ข) ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบไม่ตรง

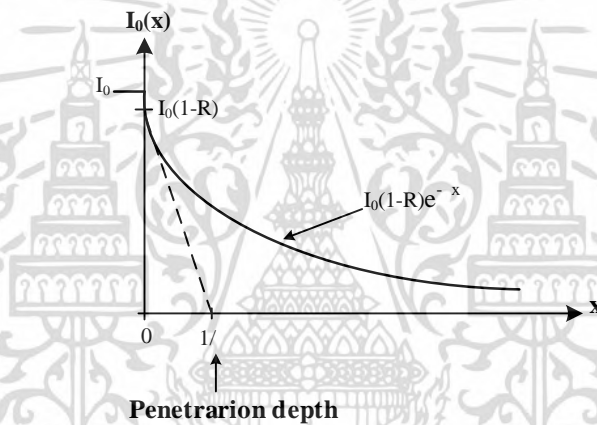
2.1.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

กระบวนการทางแสงของสารกึ่งตัวนำจะเกี่ยวกับกระบวนการดูดกลืนแสง (absorption process) เมื่อพลังงานนี้ตกกระทบสารกึ่งตัวนำและจะถูกดูดกลืนเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะของอิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ซึ่งเรียกว่า การดูดกลืนแสงพื้นฐาน (fundamental absorption) และตำแหน่งการดูดกลืนความยาวคลื่นแสงนี้เรียกว่า ขอบการดูดกลืนแสงพื้นฐาน (absorption edge) [3] การดูดกลืนแสงชนิดนี้มีความสัมพันธ์กับลักษณะโครงสร้างของแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ

พิจารณาการศึกษาการดูดกลืนแสงเมื่อแสงเดินทางไปกระทบผิวหน้าแล้วเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ ถ้าพลังงานแสงตกกระทบมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดพาหะขึ้น และพลังงานแสงนี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องกับโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำในลักษณะของสนามแสง (optical field) ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในสารกึ่งตัวนำและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 และรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.2 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำขนาดความหนาบาง



รูปที่ 2.3 การดูดกลืนแสงภายในสารกึ่งตัวนำ

จากสมการความเข้มของแสงสะท้อนมีค่าเป็น

$$I_r = RI_0 \tag{2.3}$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1-R) I_0 \tag{2.4}$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในสารกึ่งตัวนำลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลในรูปของพลังงานที่ถูกส่งผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำ การดูดกลืนแสงที่ผ่านในเนื้อสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลงกับระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็น

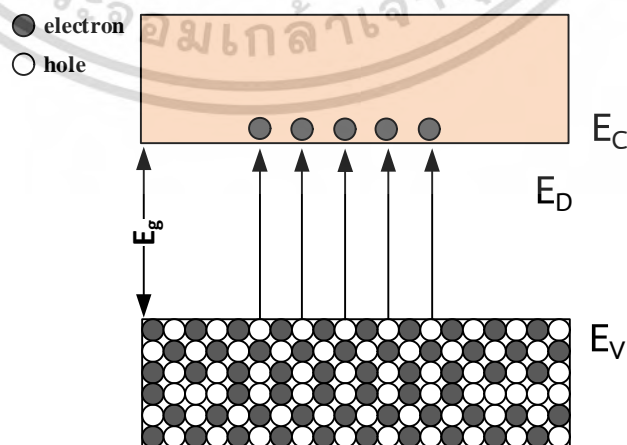
$$I_t = I_i \times e^{-x} = (1 - R)I_0 \times e^{-x} \quad (2.5)$$

เมื่อ	I_0	คือ	ความเข้มแสงตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำ
	I_r	คือ	ความเข้มแสงสะท้อนจากสารกึ่งตัวนำ
	I_t	คือ	ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากสารกึ่งตัวนำ
	I_i	คือ	ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ
	R	คือ	สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
		คือ	สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	x	คือ	ระยะทางที่แสงเดินทางในสารกึ่งตัวนำหรือความหนาของสารกึ่งตัวนำ

2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดของคู่อิเล็กตรอน - โฮล

กระบวนการเกิดการดูดกลืนโฟตอน (Energy absorption) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำและเรียกกระบวนการนี้ว่าการผลิตพาหะหรือเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Generation process) จะเกิดขึ้นเมื่อมีแสงหรือโฟตอนซึ่งมีพลังงานมากพอ เมื่อตกกระทบบนสารกึ่งตัวนำแล้วถูกดูดกลืนเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ โดยแสงจะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ กระบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิด ในที่นี้จะขอกกล่าวกระบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

(1) การดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิก (intrinsic absorption) จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ($> E_g$) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ($h\nu \geq E_g$) ที่มีพลังงานมากพอ ที่จะทำให้อิเล็กตรอนในสารกึ่งตัวนำเมื่อถูกดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้นที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ [12] ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรินซิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การดูดกลืนแสงแบบนี้จะพบกันมากในตัวตรวจวัดแสงทุกชนิด เนื่องจากพลังงานโฟตอนต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งสามารถหาได้ในเทอมของ $h\nu \geq E_g$ หรือ $hc/\lambda \geq E_g$ และถ้าจัดให้อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นคัทออฟ (long wavelength cutoff: λ_{\max}) คือ ความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังสมการที่ 2.6

$$\lambda_{\max} = \frac{hc}{E_g} \quad (2.6)$$

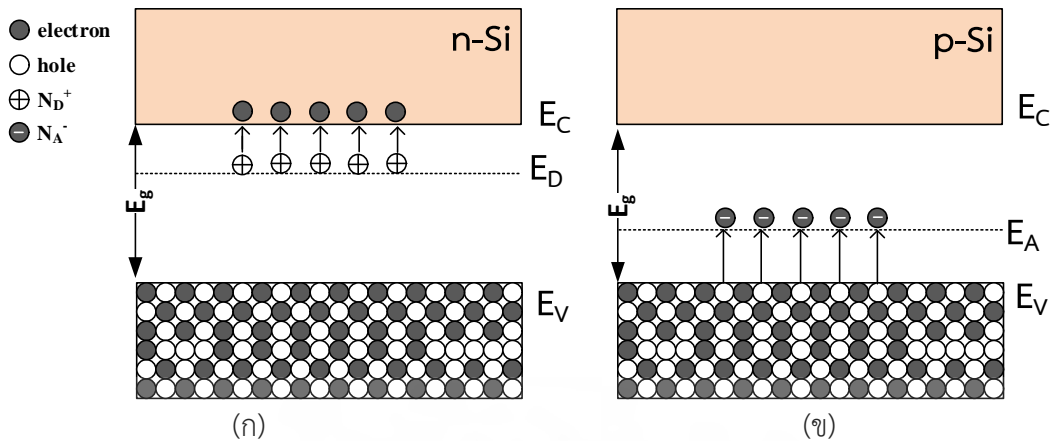
โดยที่ h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (J.s)

c คือ ความเร็วแสง (m/s)

ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ [3]

วัสดุ	ช่องว่างแถบพลังงาน (eV)	ความยาวคลื่นคัทออฟ (nm)	ความยาวคลื่นที่ใช้โดยทั่วไป (nm)
ซิลิคอน	1.12	1110	500-900
เยอรมันเนียม	0.67	1850	900-1300
แกลเลียมอาร์เซไนด์	1.43	870	750-850

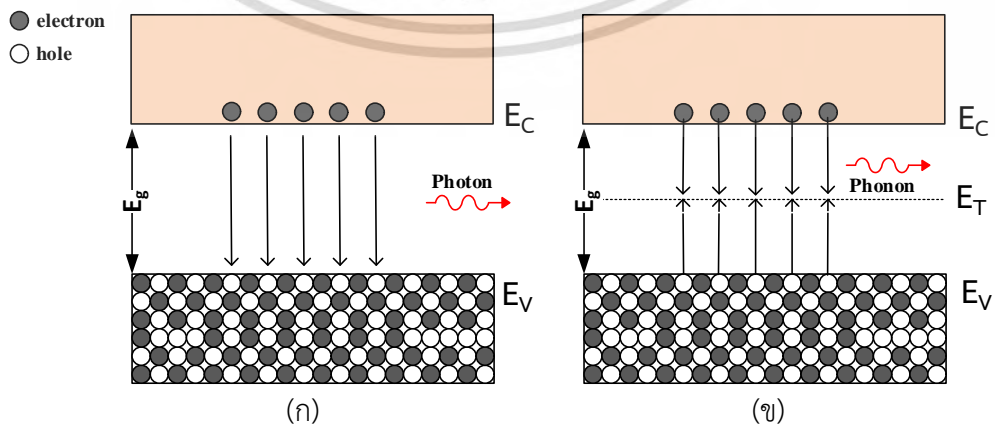
(2) การดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรินซิก (extrinsic absorption) เกิดเนื่องจากการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัส จะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (donor level: E_D) ขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานอาจเกิดจากความบกพร่องของผลึก ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) ในส่วนสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (acceptor level: E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ [13] ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ข)



รูปที่ 2.5 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน - โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทริกซิค (ก) ชนิดเอ็น และ (ข) ชนิดพี

2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน - โฮล

เมื่อเกิดความไม่สมดุลเชิงความร้อน อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นนั้นจะกลับสู่สถานะพลังงานต่ำเกิดการคายพลังงาน (Energy emission) เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination process) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้โฮลและอิเล็กตรอนลดลงหรือหายไป เนื่องจากการชนกันกับโครงร่างผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination and Generation process) [14] สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น และมีการรวมตัวใหม่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำเพียง 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง และกระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม มีรายละเอียดดังนี้



รูปที่ 2.6 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบโดยตรง และ (ข) แบบโดยอ้อม เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(1) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง (direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปกลายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอนได้ง่าย โดยการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับ ผลต่างของระดับพลังงานอิเล็กตรอนและโฮล หรือเรียกการรวมตัวในลักษณะนี้ว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (radiative recombination)

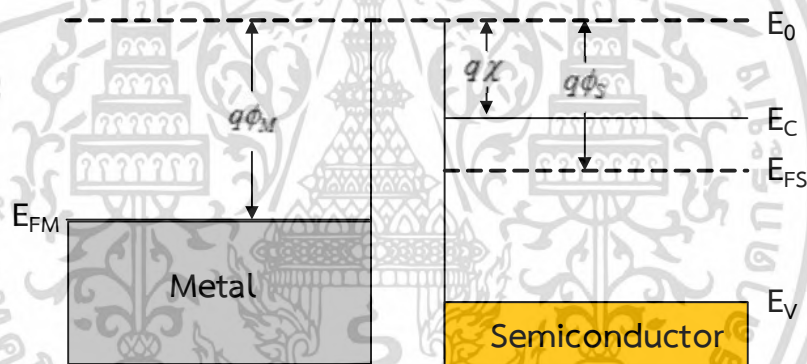
(2) กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม (indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่วงว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ อะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากจุดบกพร่องของโครงสร้างผลึก โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (recombination center: R-center) [14] กระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้อะตอมภายในโครงสร้างผลึกเกิดการสั่นได้ โดยพลังงานที่ใช้สำหรับการสั่นนี้อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน หรือเรียกว่า โฟนอน (phonon) ในการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (โฟนอน) ให้กับโครงสร้างผลึกเรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (non-radiative recombination)

2.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

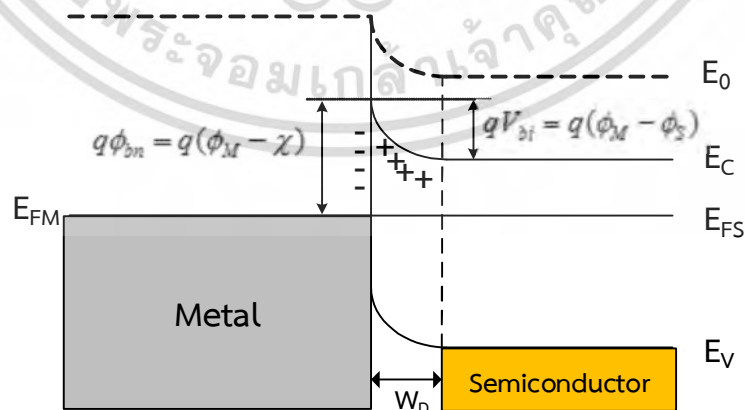
รอยสัมผัสที่เกิดระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ (1) รอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับรอยต่อแบบเรกติไฟร์ ส่วนมากนิยมใช้เป็นเชื่อมต่อลวดลายโลหะระหว่างส่วนต่างๆ ภายในตัว และ (2) รอยสัมผัสช็อตต์กี (Schottky contact) หรือเรกติไฟร์ เป็นรอยสัมผัสที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทิศทางเดียว โดยแสดงคุณสมบัติเรกติไฟร์คล้ายกับรอยต่อ p-n แต่มีคุณสมบัติบางส่วนที่มีข้อได้เปรียบกว่า เช่น แรงดันภายในมีค่าต่ำกว่า ความจุไฟฟ้าแฝงภายในโครงสร้างมีค่าต่ำกว่า และทำงานด้วยพาหะส่วนมาก เป็นต้น อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (Al/n-Si) [15] ที่ทำหน้าที่เป็นรอยสัมผัสแบบช็อตต์กี เนื่องจากสอดคล้องกับผลการทดลองดังที่แสดงในบทที่ 4

2.2.1 การเกิดรอยสัมผัสแบบซีออตต์กีในภาวะสมดุล

การเกิดรอยสัมผัสแบบซีออตต์กี ในรูปที่ 2.7 เป็นแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ก่อนเกิดรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_M > q\phi_S$) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิ (fermi level : E_{FM}) ของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ และเมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งจะเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ (N_D^+) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ [16] ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อนดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสซีออตต์กี



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสซีออตต์กี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier : qV_{bi}) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.7

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (2.7)$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ช็อตต์กี (schottky barrier : $q\phi_{bn}$) ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อตต์กีต่างๆกัน [17] สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2.8

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.8)$$

โดยที่ค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity : χ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.05 V

2.2.2 การทำงานของรอยสัมผัสแบบช็อตต์กี

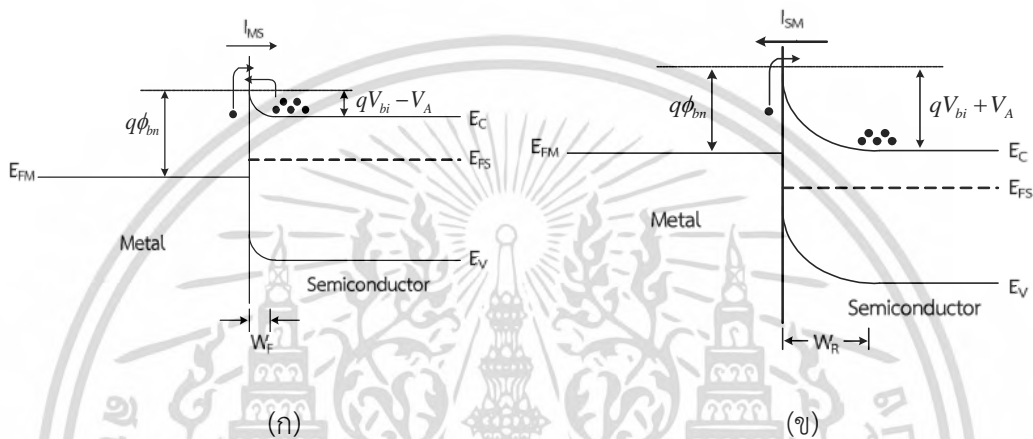
การทำงานของรอยสัมผัสแบบช็อตต์กีแบ่งออกได้เป็นสองแบบ คือ การให้แรงดันไบอัสตรง และการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ มีรายละเอียดดังนี้

การให้ให้แรงดันไบอัสตรง (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้แรงดันบวกเข้าที่ขั้วแอนอด (ด้านโลหะ) และแรงดันลบเข้าที่ขั้วคาโทด (ด้านสารกึ่งตัวนำ) ดังรูปที่ 2.9 (ก) ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น $(V_{bi} - V_A)$ และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะเดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงช็อตต์กีเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากกำแพงช็อตต์กีมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรง (I_F) [18] มีค่าดังสมการที่ 2.9

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[\exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อ	A	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
	R	คือ	ค่าคงตัวรีชาร์ดสัน (n-Si) มีค่า $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ [16]
	ϕ_{bn}	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ช็อคตีกี (eV)
	q	คือ	ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
	k	คือ	ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
	T	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสช็อคตีกี

(ก) แรงดันไบอัสตรง และ (ข) แรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้ให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ($-V_A$) แก่รอยสัมผัสโดยให้แรงดันลบเข้าที่ขั้วคาโทด (ด้านโลหะ) และแรงดันบวกเข้าที่ขั้วคาโนด (ด้านสารกึ่งตัวนำ) แสดงดังรูปที่ 2.9 (ข) กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_A)$ และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคตีกีเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล [17] โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ (I_R) มีค่าดังสมการที่ 2.10

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อมีการแรงดันไบอัสค่าต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width : W_D) โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม ดังสมการที่ 2.11

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.11)$$

เมื่อ V_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C

N_D คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ (V)

V_A คือ แรงดันไบอัส (V)

สรุปฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีในทางอุดมคติที่ทำให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มิกและรอยสัมผัสช็อคติกี ดังแสดงในตารางที่ 1.1

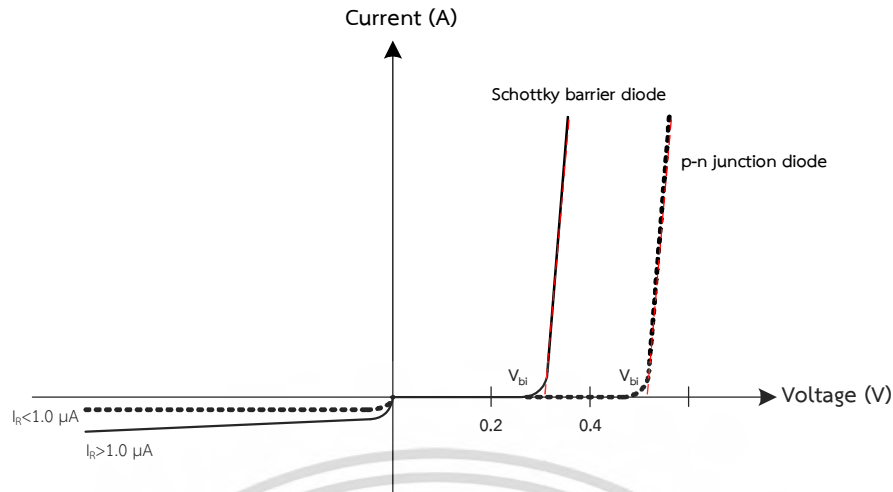
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติการเกิดรอยสัมผัสโอห์มิกและรอยสัมผัสช็อคติกี [1]

ชนิดรอยสัมผัส	รอยสัมผัสโอห์มิก	รอยสัมผัสช็อคติกี
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	$q\phi_M > q\phi_s$	$q\phi_M < q\phi_s$
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	$q\phi_M < q\phi_s$	$q\phi_M > q\phi_s$

2.2.3 ลักษณะเฉพาะกระแส – แรงดันของรอยสัมผัสช็อคติกี

จากการให้แรงดันไบอัสที่กล่าวมาแสดงให้เห็นว่า รอยสัมผัสดังกล่าวเป็นรอยสัมผัสช็อคติกีจะคล้ายกับไดโอดรอยต่อแบบพี-เอ็น คือ ยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก (กระแสรั่ว) ดังแสดงในรูปที่ 2.10 จากรูปพบว่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคติกีมีค่าประมาณ 0.2-0.4 V โดยที่แบบรอยสัมผัสแบบพี-เอ็นมีค่าประมาณ 0.5-0.7 V ซึ่งแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อคติกีจะมีค่าต่ำกว่ารอยสัมผัสแบบพี-เอ็น และเนื่องจากกระแสที่ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยส่งผลให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว [13] ส่วนกระแสรั่วของรอยสัมผัสช็อคติกีมีค่าสูงกว่ารอยสัมผัสแบบพี-เอ็น ประมาณ 10^4 เท่า เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของซีดอตทีย์ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

2.3 ตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสง (photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในด้านภาพและแสงอย่างกว้างขวาง มักเป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันต่างๆ โดยลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงมีอยู่หลายลักษณะด้วยกัน ซึ่งลักษณะหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือ โครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) หรือโครงสร้างแบบเชิงราบ (Planar) [8] เป็นอุปกรณ์ที่มีกระบวนการสร้างไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการผลิต งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาหลักการทํางาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่สามารถอธิบายเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสซีดอตทีย์ชนิด Al/n-Si/Al เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสซีดอตทีย์มีจุดเด่นคือ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดีกระแสรั่วไหลต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย

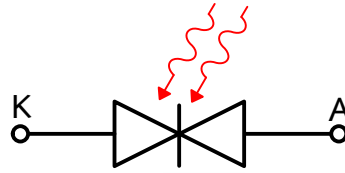
2.3.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสซีดอตทีย์ ชนิด Al/n-Si/Al ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ (อะลูมิเนียม) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจำนวนสองรอยสัมผัสเชื่อมต่อกันแบบหันชนกัน (back to back) [3] โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (D) ในรูปที่ 2.11 จะแสดงแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสซีดอตทีย์ในสภาวะสมดุลความร้อน จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสซีดอตทีย์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode: K) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode: A) [18] โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดจะเป็นโลหะ (อะลูมิเนียม) ชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ซีดอตทีย์ของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $\phi_{bn1} =$

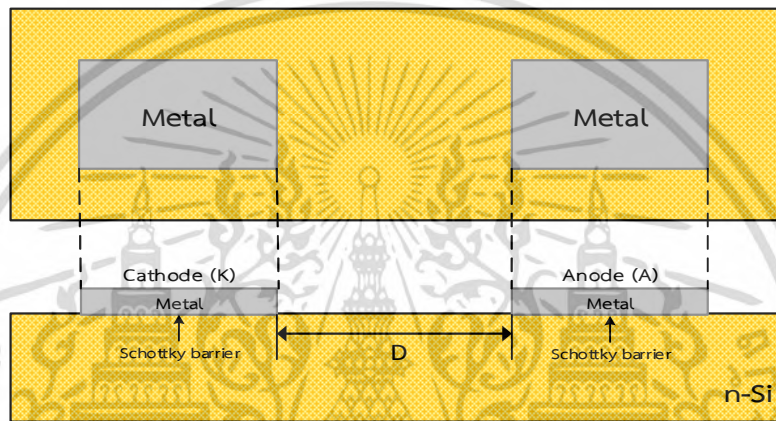
$\phi_{bn2} = \phi_n$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใด
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

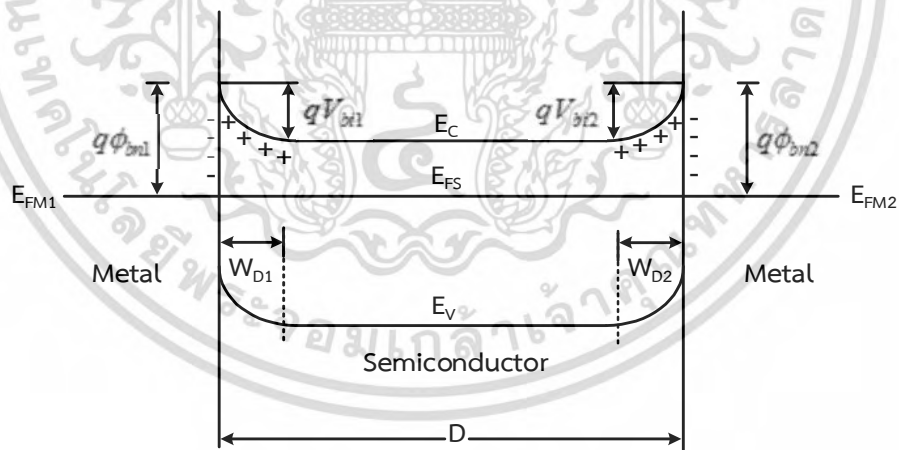
$V_{bi1}=V_{bi2}=V_{bi}$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1}=W_{d2}=W_d$ ซึ่งมีสอดคล้องกับสมการที่ 2.11 เมื่อให้ $V_A = 0$



(ก)



(ข)



(ค)

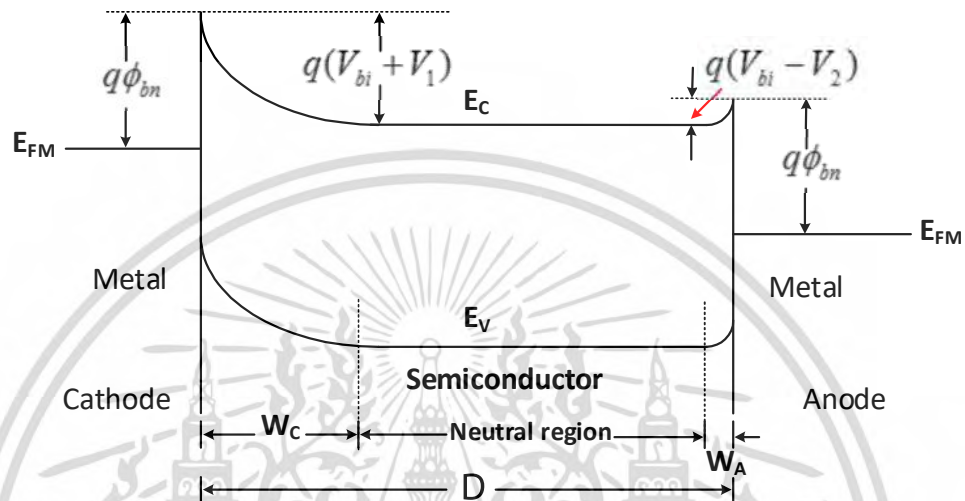
รูปที่ 2.11 ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีอิตต์กี

- (ก) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง
- (ข) ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ
- (ค) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีอิตต์กีในสภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตีก็ยเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.12 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง



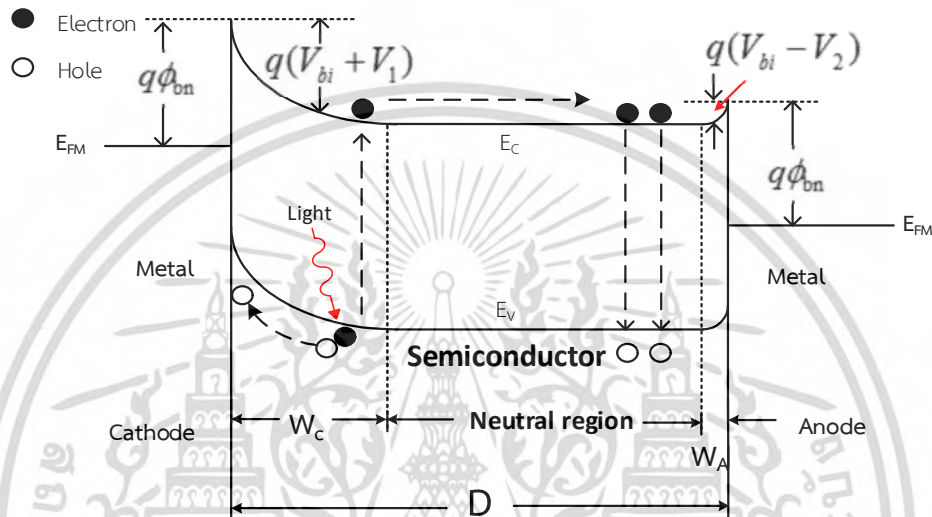
รูปที่ 2.12 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตีก็ยเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

การไบอัสย้อนกลับ จะทำให้บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้น และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ชนิดตีก็ยไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดตีก็ย ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้น และมีค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) [7] ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตีก็ย โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตีก็ย จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตีก็ย กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้ความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณปลอดพาหะที่

เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นที่บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก [6] ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบ

โครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น เมื่อได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (D) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 แถบพลังงานของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ

เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์จะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณหลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณหลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณหลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทด เกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า กระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) [7] ของตัวตรวจวัดแสง มีค่าเท่ากับ

$$I_p = I - I_{\text{dark}} \quad (2.12)$$

เมื่อ I คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ทั้งหมด (A)

I_{dark} คือ กระแสมืด (A)

ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โอลที่อยู่ใต้อานสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด [15] ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็นพี ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล

โดยที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม (W_T) ของตัวตรวจวัดแสงจะเป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านแคโทด (W_C) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านอาน (W_A) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.13

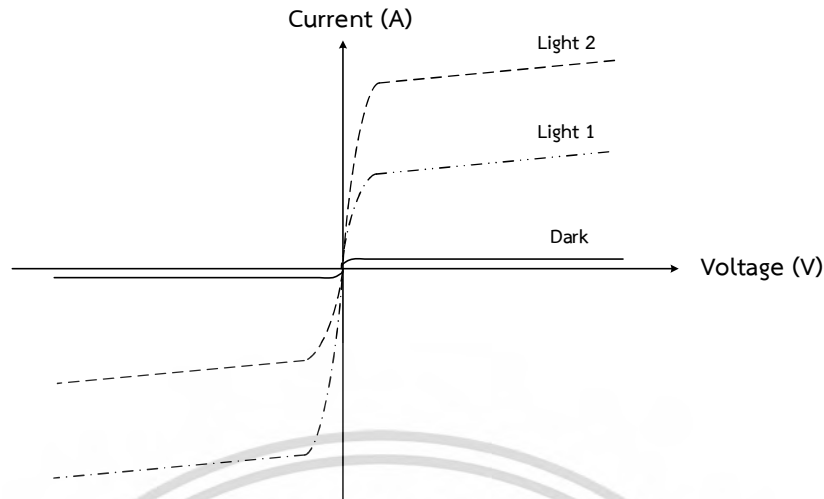
$$W_T = W_C + W_A \quad (2.13)$$

โดยที่

$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.14)$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.15)$$

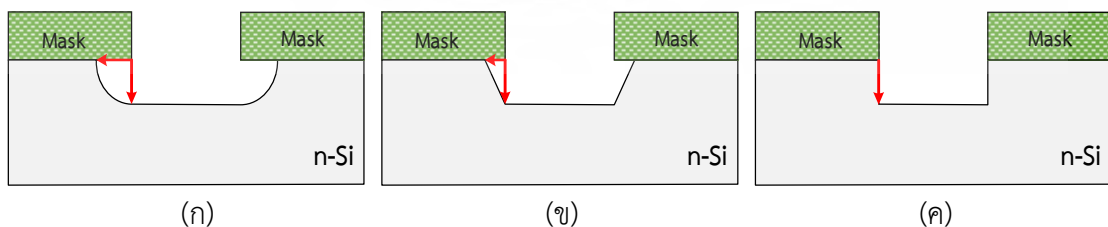
ลักษณะสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่ถูกพิจารณา คือ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน โดยในรูปที่ 2.14 เป็นลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็นพี เมื่อได้รับความเข้มแสงตกกระทบมีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อได้รับค่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.14 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

2.4 กระบวนการกัด

ในปัจจุบันกระบวนการสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กนั้นมีอยู่หลากหลายวิธีและมีความยากง่ายแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับต้นทุนในการผลิตและความต้องการของผู้ที่นำไปใช้งานหรือปัจจัยอื่นๆ วิธีการสร้างอุปกรณ์ขนาดเล็ก (Microfabrication) ที่มีความน่าสนใจวิธีหนึ่งคือ กระบวนการกัด (Etching process) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอุปกรณ์ให้มีลวดลายวงจรที่ได้ทำงานออกแบบ หรือการกัดวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากตัวอุปกรณ์ กระบวนการกัดแบ่งออกเป็นสองประเภท คือ การกัดแบบแห้ง (Dry etching) การกัดแบบเปียก (Wet etching) โดยมีลักษณะการกัดที่ต่างกัน เมื่อกัดผิวหน้าของวัสดุโดยสารเคมีมีส่วนผสมของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) และกรดอะซิติก (Acetic acid) หรือก๊าซจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุนั้นมีความสม่ำเสมอในทุกทิศทาง เรียกลักษณะการกัดนี้ว่า ไอโซทรอปิก (Isotropic) [7] และเมื่อกัดผิวหน้าของวัสดุแต่ละระนาบไม่เท่ากันนั้นคือจะเลือกกัดระนาบ 111 มากกว่าระนาบ 100 หรือจะเลือกกัดระนาบ 100 มากกว่าระนาบ 111 โดยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเคมีที่นำมาใช้ เรียกลักษณะการกัดนี้ว่า แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) [6] ดังแสดงในรูปที่ 2.15



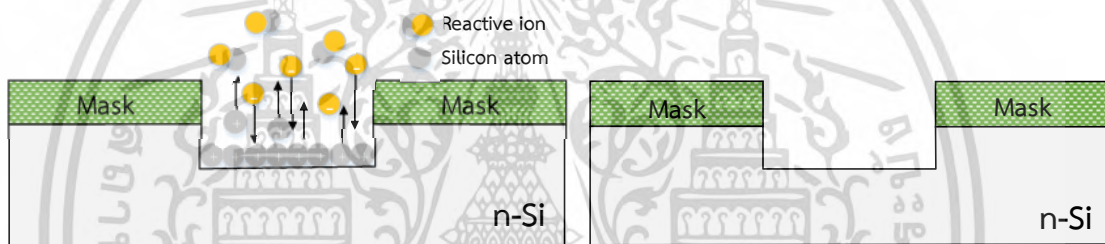
รูปที่ 2.15 ลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิกและการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก [19]

(ก) ไอโซทรอปิก (ข) แอนไอโซทรอปิก และ (ค) แอนไอโซทรอปิกแบบสมบูรณ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.1 กระบวนการกัดแบบแห้ง

ในกระบวนการกัดแบบแห้งนี้ใช้พลาสมาหรือก๊าซในการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ การเกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้พลังงานของอนุภาคที่เกิดการเคลื่อน และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การกัดแบบพลาสมา (Plasma etching) เป็นกระบวนการนี้จะมีการกำเนิดพลาสมาที่ความดันต่ำโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีไอออนบวกและลบ ไอออนบวกจะกระจายตัวไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการกำจัดออก เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้นหลุดออกมาจากอะตอมบนพื้นผิวของวัสดุจะระเหยไปซึ่งจะไม่มีปฏิกิริยาทางเคมี [6] การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Ion Etching : RIE) เป็นการกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาจะใช้ปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีความหลากหลายและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางด้านอุตสาหกรรม กระบวนการนี้จะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วมาก การชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากไอออนไนซ์จะช่วยให้สารละลายแตกตัวและทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุ [7] ดังแสดงในรูปที่ 2.16



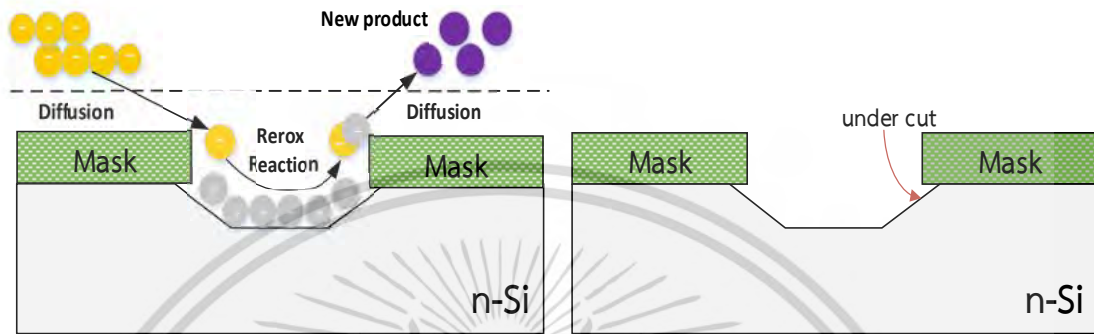
รูปที่ 2.16 ขณะการเกิดปฏิกิริยาและหลังกระบวนการกัดแบบแห้ง [8]

2.4.2 กระบวนการกัดแบบเปียก

ในการใช้กระบวนการกัดแบบเปียก (Wet etching) คือ การสกัดพื้นผิวของชิ้นงานหรือวัสดุที่ใช้สารละลายในกระบวนการกัด เพื่อสกัดชิ้นที่ไม่ต้องการออกสามารถกัด ชั้นฟิล์มบาง ชั้นซิลิคอนออกไซด์ และกระจกหรือแก้ว การเลือกชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการกัดขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานที่นำมาใช้หรือชั้นป้องกันในการกัดว่าสามารถทนการกัดได้หรือไม่เนื่องจากอัตราการกัดของแต่ละสารละลายไม่เท่ากัน เมื่อสารละลายทำปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) กับแผ่นฐานรองหรือชิ้นงาน หากไม่มีการสร้างชั้นป้องกันในการกัด (Hard mask) [8] ชิ้นงานจะถูกสกัดออกไปในทุกทิศทางหรือที่เรียกว่าลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิก ขณะที่บริเวณที่มีชั้นป้องกันจะไม่ถูกสกัด จากงานวิจัยที่ผ่านมาเราพบว่าหากต้องการป้องกันชั้นอะลูมิเนียมในการสกัดด้วยสารละลายให้ยังคงอยู่ต้องทำการเติมผงของซิลิคอน [6] ซึ่งการเติมผงของซิลิคอนสามารถช่วยลดอัตราการกัดของสารละลายลงได้แต่ก็ทำให้พบกับปัญหาอย่างอื่นตามมาด้วยเช่นกันยกตัวอย่างเช่น อัตราการกัดซิลิคอนที่ลดลง ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถใช้การกัดแบบเปียกให้มีลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกหรือการกัดแต่ละระนาบไม่เท่ากัน ได้เป็นอย่างดีโดยการออกแบบลวดลายบนชิ้นงานเป็นการบังคับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

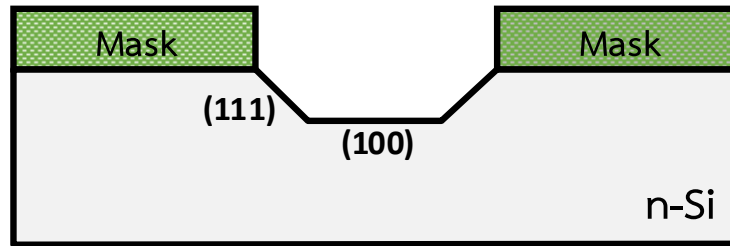
ทิศทางในการสกัดและใช้หน้ากากป้องกันในการกัด คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ด้วยกระบวนการ PE-CVD ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้สามารถควบคุมสารละลายที่ใช้กัดได้ แต่ถ้าทำการออกแบบลวดลายของชิ้นงานหรือสร้างชั้นป้องกันในการกัดไม่ดีอาจเกิดปฏิกิริยาการกัดใต้หน้ากากป้องกันในการกัด (Under cut) [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.17 อาจส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างหรือการกัดที่ไม่สมบูรณ์



รูปที่ 2.17 ขณะการเกิดปฏิกิริยาและหลังกระบวนการกัดแบบเปียก [8]

2.4.2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายที่ใช้กัด

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) คือ กระบวนการกัดที่สารละลาย (Etchant) เลือกกัดเนื้อซิลิคอนในแต่ละระนาบไม่เท่ากัน ซึ่งอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของซิลิคอน ดังนั้นร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นภาพทรงเรขาคณิตแน่นอน ตัวอย่างความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ (HKL) และ (hkl) เช่น ระนาบ (100), (110), (111) มีมุมระหว่างระนาบ (HKL) และ (hkl) คือ 0.00, 45.00 และ 54.74 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นระนาบที่เลือกกัดควรเป็นระนาบใดบ้างสารละลายที่ทำการกัดบนผิวหน้าของฐานรองหรือวัสดุ [20] ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่ต่างแตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลายหรือโครงสร้างผลึกของหรือระนาบของผลึกในวัสดุ เช่น ซิลิคอนจะเกิดการกัดในลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกสูงมากและจะมีสารละลายบางตัวเท่านั้นที่จะทำให้เกิดการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกได้ ยกตัวอย่างเช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เอธิลีนไดแอมมีน ไพรอคาทิกอล (EDP) และเตตระเมทิล แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) การกัดซิลิคอนระนาบ (100) จะเลือกการกัดในระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) [21] ทำให้มีลักษณะที่เกิดขึ้นเป็นร่องรูปตัวยูดังในรูปที่ 2.18 อย่างไรก็ตามการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกจะไม่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการกัดทั้งหมดของพื้นผิวรวมทั้งสารละลายที่มีอัตราการกัดเข้าที่สูงสุดจะขึ้นอยู่กับสารละลาย ไม่ว่าจะเป็นการจ่ายประจุพาหะที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการกัดประจุพาหะที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการกัดแบบไอโซทรอปิกในกรด HF แต่ไม่ได้เกิดขึ้นในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย KOH [8]



รูปที่ 2.18 ภาคตัดขวางของลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกทำให้เกิดชิ้นงานมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูจากการเปิดช่องเลือกกัดบนระนาบผลึกที่ต่างกัน แต่ผนังที่เกิดขึ้นก็คือระนาบที่มีอัตราการกัดช้าที่สุด การกัดแผ่นซิลิคอนระนาบ (100) ถ้าเปิดบริเวณเลือกกัดเป็นสี่เหลี่ยมมุมฉากที่มีด้านตั้งสี่ขนานกับทิศทาง [110] จะได้ผนังสี่ด้านเป็นระนาบ (111) ทั้งหมด พื้นที่หลุมจะเป็นระนาบ (100) โดยความสัมพันธ์ของเรขาคณิตที่แน่นอนของระนาบ (100) และระนาบ (111) แต่ถ้าเปิดช่องเลือกกัดเป็นวงกลมร่องรูปตัวยูที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยผนังสองด้านเอียงทำมุม 54.74 องศา ขนานกับพื้นระนาบ (100) แนวขอบผนังขนานกับทิศทาง [110] ระนาบนั้นคือระนาบ (111) และยังมีระนาบ (100) ร่วมกันประกอบเป็นผนัง

2.4.2.2 การสร้างโครงสร้างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอน

สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้จุดมุ่งหมายอีกประการหนึ่งเป็นการเน้นการสร้างพื้นผิวซิลิคอนให้มีความขรุขระของพีระมิดจำนวนมาก การสร้างผิวหน้าซิลิคอนให้มีโครงสร้างขรุขระ (surface texturing) สามารถเพิ่มพื้นที่รับแสง และยังสามารถเพิ่มโอกาสให้แสงผ่านเข้าสู่เนื้อซิลิคอนจากการสะท้อนกลับของแสงน้อยจะทำให้ได้จำนวนการผ่านของแสงภายในตัวอุปกรณ์มีมาก [22] ส่งผลให้ตัวอุปกรณ์สามารถดูดกลืนแสงหรือพลังงานโฟตอนมาใช้ประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้เกิดการรวมตัวของพาหะได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มกระแสแสงและการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงดีขึ้น

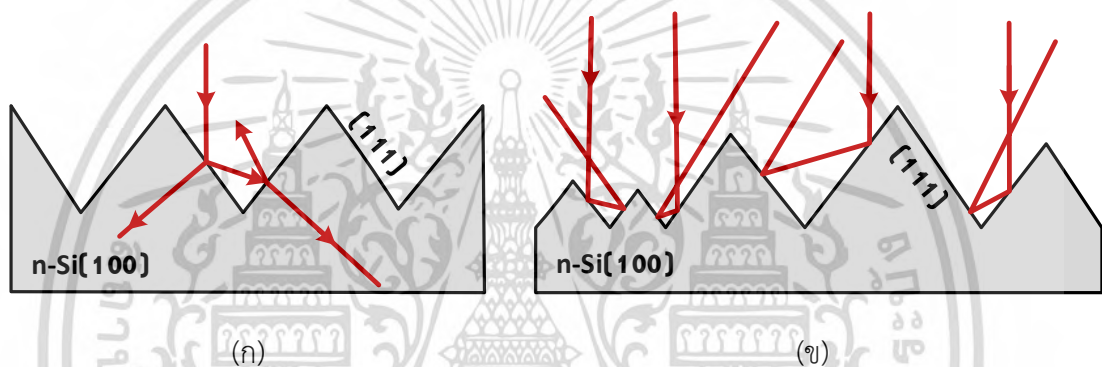
ความขรุขระของพีระมิดจากการกัดพื้นผิวซิลิคอน เนื่องจากกระบวนการและวัสดุที่เกี่ยวข้องที่นำมากัด เช่น ความบกพร่องในผลึกซิลิคอน สารเคมีตกค้างหรือตกตะกอนบนพื้นผิว การแพร่ปฏิกิริยาการสลายตัวระหว่างโมเลกุลน้ำ (H_2O) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ (OH) กับซิลิกेटทำให้เกิดเป็น native-oxide และฟองอากาศไฮโดรเจนที่เกิดบนผิวซิลิคอนรวมถึงการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กทำให้กระบวนการกัดพื้นผิวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้กระบวนการกัดดำเนินอย่างต่อเนื่องในบริเวณนั้น ดังนั้นพีระมิดที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวที่ดี [23] ฟองก๊าซไฮโดรเจนเล็กๆ ที่เกิดในปฏิกิริยานี้เกาะติดผิวซิลิคอนได้ง่ายเสมือนเป็นหน้ากากเล็กๆ ป้องกันผิวจากสารละลายที่จะกัดอะตอมซิลิคอน ดังนั้นในกรณีปริมาณการกระจายและขนาดของฟองก๊าซไฮโดรเจนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องควบคุม เพื่อให้พื้นผิวเกิดพีระมิดที่สม่ำเสมอ ซึ่งขนาดของพีระมิดที่มีขนาดใหญ่

จะทำให้การสะท้อนแสงมีค่าต่ำกว่าพีระมิดที่มีขนาดเล็ก ค่าการสะท้อนแสงกลับที่ผิวมีค่าต่ำนั้นจะทำให้มีการดูดกลืนแสงของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกระแสแสงที่สูงขึ้น

โครงสร้างลวดลายแบบพีระมิด ถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

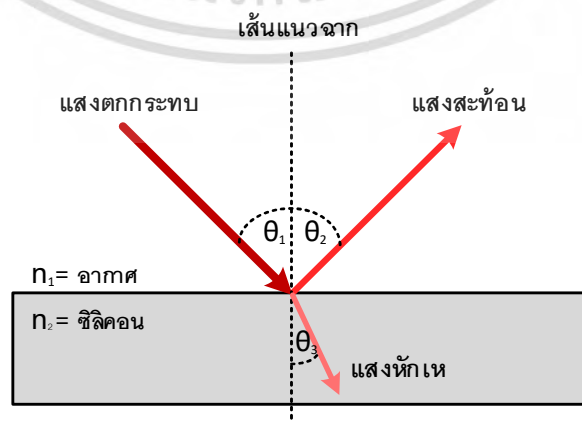
(1) ลวดลายพีระมิดแบบสม่ำเสมอ (Regular pyramid layout) คือ โครงสร้างอย่างง่ายในปัจจุบันที่มีลวดลายเป็นแบบพีระมิดขนาดเท่ากัน และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ [24] แสดงดังรูปที่ 2.19 (ก) ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยการใช้เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography) หรือการใช้เลเซอร์ (laser) สร้างลวดลายเปิดช่อง

(2) ลวดลายพีระมิดแบบสุ่ม (Random pyramid layout) คือ โครงสร้างที่มีลวดลายเป็นแบบพีระมิดขนาดไม่เท่ากัน และมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (ไม่สม่ำเสมอ) [24] ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยการใช้เทคนิคการกัด (Etching) ด้วยกระบวนการทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.19 (ข)



รูปที่ 2.19 ลวดลายพีระมิดบนผิวซิลิคอน (ก) พีระมิดแบบสม่ำเสมอ และ(ข) พีระมิดแบบสุ่ม [25]

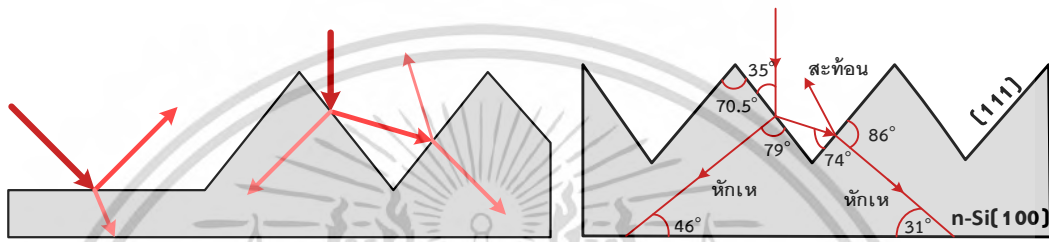
เมื่อพิจารณาแสงเคลื่อนที่ไปถึงขอบของตัวกลางที่สอง บางส่วนของรังสีตกกระทบจะสะท้อนกลับมาในตัวกลางเดิม แสงของหลายเส้นเมื่อสะท้อนผิวเรียบจะสะท้อนกลับมาแบบขนานกัน [25] และมีมุมของแสงที่ตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนบนตำแหน่งที่แสงตกกระทบกับแสงสะท้อนบนพื้นผิวจะเป็นตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ลักษณะการสะท้อนของแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้จัดทำเห็นว่าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พิจารณาพื้นผิวไม่เรียบแสงอาทิตย์ในหลายๆทิศทางมีลักษณะการสะท้อนแสงไม่เป็นระเบียบหรือการทำพื้นผิวไม่เรียบ หรือที่เรียกว่า ตัวสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเตียน (Lambertian reflectors) [22] การทำให้แสงสะท้อนกลับน้อยลงสามารถช่วยลดผลของการสะท้อนแสงกลับที่ผิวหน้าซิลิคอน เนื่องจากแสงที่ตกกระทบผิวของพีระมิดด้านหนึ่งจะมีการสะท้อนไปยังผิวของพีระมิดอีกด้านหนึ่ง ซึ่งสามารถลดการสูญเสียจากแสงสะท้อนกลับที่ผิวของตัวตรวจวัดแสงจึงต้องทำการสร้างพีระมิดบนผิวหน้าของซิลิคอนเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสง และส่งผลให้เพิ่มการดูดกลืนแสงอีกด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 ลักษณะการสะท้อนแสงบนวัตถุผิวเรียบและผิวขรุขระ [24]

การวัดความขรุขระนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ 1) การวัดความขรุขระผิวเฉลี่ย (Average Parameter) คือการวัดและคำนวณความขรุขระผิว ทำให้เรารู้ความขรุขระโดยรวม แต่ไม่สามารถรู้ลักษณะความคลาดเคลื่อนสูงต่ำของความขรุขระผิว พารามิเตอร์ของการวัดแบบเฉลี่ย ได้แก่ R_a และ R_q เป็นต้น และ 2) การวัดความขรุขระผิวโดยขนาด (Amplitude Parameter) คือ อาศัยการวัดค่าสูงต่ำของขนาดความขรุขระของพื้นผิว ทำให้เรารู้ลักษณะของความขรุขระพื้นผิวได้ชัดเจนกว่า พารามิเตอร์ของวิธีวัดนี้ ได้แก่ R_z [26]

เมื่อ ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต (roughness average : R_a) คือ เป็นการแสดงความขรุขระด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดค่าเฉลี่ยความสูง เฉพาะส่วนที่นูนขึ้นมา (peak)

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (4.16)$$

ความขรุขระผิวเฉลี่ยกำลังสอง (roughness root mean squared : R_q) คือ ค่าที่แสดงถึงลักษณะพื้นผิวโดยรวม ซึ่งคำนวณจากทั้งส่วนที่นูนขึ้นมา (peak) และส่วนที่เป็นร่อง (valley)

$$R_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|^2} \quad (4.17)$$

และความขรุขระผิวขนาดโดยเฉลี่ย (Roughness Ten-Point mean : R_z) เป็นการแสดงความขรุขระพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม โดยแสดงความขรุขระเฉลี่ยของระยะระหว่างความสูงของยอดกับความลึกของหลุม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อซิลิคอนส่วนใหญ่จะผสมกับน้ำหรือสารเคมีของเหลว เรียกว่า “etchants” เพื่อกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยจะสร้างลวดลายไว้บนผิวหน้าของวัสดุ เช่น เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) [27] ไฮดราซีน (Hydrazine) และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) [28] เป็นต้น สารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติทั้งไอโซทรอปิก (Isotropic etching) และ แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic etching) อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของ สารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด [24] สารละลายเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการ เลือกหน้ากปกป้องกันการกัดให้เหมาะสมกับสารละลายที่ใช้ในการกัดจึงมีความจำเป็นด้วย

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก

สารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) กรดอะซิติก (Acetic acid) หรือที่เรียกกันว่า HNA [20] นั้นเป็นสารละลายที่มีลักษณะการกัด แบบไอโซทรอปิก ซึ่งอัตราการกัดแปรผันกันอย่างมากระหว่างอัตราการกัดยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของ อะตอมสารเจือ อัตราส่วนผสมที่ต่างกันจะทำให้อัตราการกัดเปลี่ยนแปลงไปมาก และหน้ากปกป้องกันสำหรับ กรด HNA มีทั้งซิลิคอนไนไตรด์ (Si_3N_4) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ซึ่งไม่สามารถป้องกันการกัดใน ระยะเวลาอันยาวนานได้

สารละลายเอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) เป็นสารละลายที่ใช้กัดประเภทแอนไอโซ ทรอปิก ที่เลือกกระบวนการกัดได้อย่างเด่นชัดที่สุด สามารถใช้หน้ากปกป้องกันในการกัดได้หลาย ชนิด ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่เลือกใช้

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารละลายไม่เป็นพิษ มีราคาที่ถูกและนิยม ใช้กันแพร่หลาย การกัดซิลิคอนจะใช้ความเป็นด่างของไฮดรอกไซด์ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่สูงและการ กัดแบบแอนไอโซทรอปิกในระดับสูง ส่วนพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะเป็นลักษณะขรุขระ แต่สารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะกัดโลหะอะลูมิเนียมอย่างรวดเร็วและไม่นิยมนำไปใช้ในการกัดงานจำพวก MOS หรือ CMOS [6] เนื่องจากพบไอออนของด่างบางส่วนที่หลงเหลืออยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน

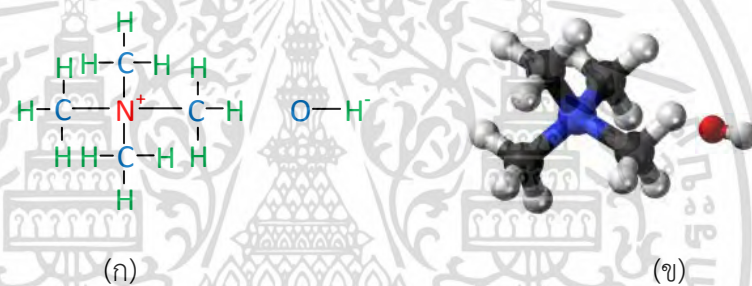
สารละลาย KOH ผสมด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เป็นสารละลายกัดที่ขึ้นอยู่กับทิศทาง ระบายและมีอัตราการกัดระบาย (100) ต่อ ระบาย (111) สูงที่สุด และเกิด undercutting ได้ขึ้น ออกไซด์ต่ำที่สุด แต่มีจุดด้อยเนื่องจากสารละลาย KOH มีอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์สูง [20] จึง ต้องอาศัยชั้นหน้ากปกป้องกันแบบอื่นแทน

สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอกระบวนการกัดเปียกลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิก โดย ใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ผสมด้วยกรดซิลิสิก (silicic acid) ซึ่งเป็น สารละลายที่มีการกัดที่ขึ้นกับทิศทางและระบายและเลือกกัดในระบาย (100) มากกว่าระบาย (111) สารละลาย TMAH ที่ทำการกัดซิลิคอนนั้นพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระและค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงจะ ทำให้กัดอะลูมิเนียมได้เร็ว [6] แต่เมื่อสารละลาย TMAH ถูกเติมด้วยปริมาณที่เหมาะสมของ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กรดซิลิซิกผสมให้ลดการกัดอะลูมิเนียมที่สมบูรณ์และกีดกันป้องกันซิลิคอนไดออกไซด์ที่ต่ำพร้อมกับกรดซิลิคอนให้เป็นพื้นผิวขรุขระ [30]

2.4.3.1 สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH)

สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) สูตรทางเคมี $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ เป็นสารละลายที่มี quaternary ammonium hydroxide มากที่สุดและเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน มีอัตราการกัดออกไซด์ที่ต่ำมากและจะไม่กัดอะลูมิเนียมถ้ามีซิลิเกตจำนวนมากพอ สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้จะมีราคาที่สูงเพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับงานจำพวก MOS หรือ CMOS ได้ ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง [9] สมการปฏิกิริยาการแตกตัวของของสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ดังนี้

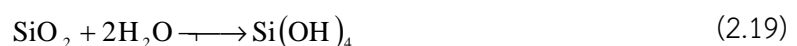


รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางเคมีของเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ [31]

(ก) โครงสร้างลิวอิส และ(ข) โครงสร้างแบบจำลองสามมิติ

2.4.3.2 กรดซิลิซิก (silicic acid)

กรดซิลิซิก (silicic acid) หรือกรดออร์โธซิลิก (orthosilicic acid) สูตรทางเคมี H_4SiO_4 หรือ $\text{Si}(\text{OH})_4$ ชื่อทั่วไปของกลุ่มสารประกอบเคมีนี้ มีองค์ประกอบของซิลิคอนออกไซด์ (ซิลิกา) และหมู่ของไฮดรอกซิล อยู่ในรูปของแข็งมีลักษณะเป็นผงเกล็ดสีขาวไม่มีกลิ่น กรดซิลิซิกเป็นกรดอ่อนที่มีค่าคงตัวสมดุลน้อย ทำให้กรดแตกตัวได้น้อยโดยจะละลายน้ำได้ในปริมาณที่น้อยมาก ๆ [32] กรดซิลิซิกเกิดจากซิลิคอนออกไซด์จับตัวกับน้ำทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) [33-34] ดังสมการเคมีที่ 2.19

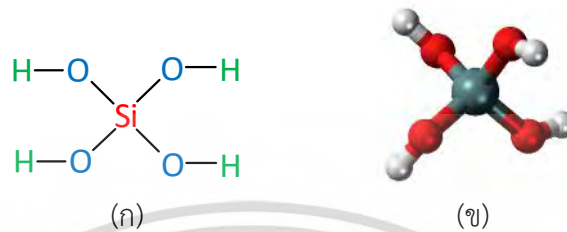


ปฏิกิริยาสมดุลเขียนสมการได้เป็น

$$K_{p,\text{total}} = \frac{[\text{Si}(\text{OH})_4]}{[\text{SiO}_2][\text{H}_2\text{O}]^2} \quad (2.20)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

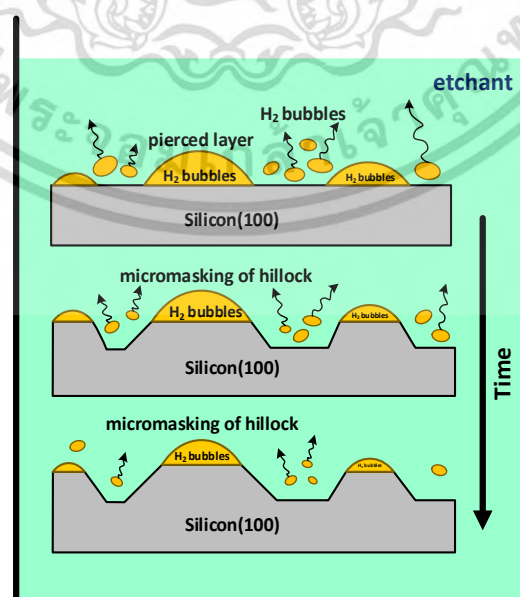
จากปฏิกิริยาการเกิดกรดซิลิซิกนั้นมีความสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ของปฏิกิริยากัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH ในสมการเคมีที่ 2.24 อะตอมของไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งไปทำปฏิกิริยาการรวมตัวกับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการก่อตัวขึ้นกลายเป็นกรดออร์โธซิลิก (orthosilicic acid) โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก แสดงดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก [33]

(ก) โครงสร้างลิวอิส และโครงสร้างแบบจำลองสามมิติ (ข)

กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนจากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH จะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของซิลิเกตหรือชั้นหน้ากักป้องกันบนผิวหน้าอะลูมิเนียม จึงส่งผลให้อะลูมิเนียม ซิลิคอน ไดออกไซด์ได้ซ้าลง [35] อย่างไรก็ตามการเติมกรดซิลิซิกนั้นจะส่งผลให้สารละลาย TMAH มีค่า pH ต่ำกว่า 13 ทำให้เกิดความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนมาก เนื่องจากการก่อตัวของเนินพีระมิดแบบสุ่ม (hillock) ซึ่งเนินพีระมิดแบบสุ่ม (hillock) เกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เปรียบเสมือนชั้นหน้ากักป้องกันการกัด (micromasking) บนพื้นผิวซิลิคอน [36-37] และสาเหตุที่เป็นไปได้จากการรวมกันจากการทับถมหรือตกตะกอน (redeposition) ของสารละลายบางส่วนที่ไม่ละลายน้ำ จากรูปที่ 2.24 คือ ภาพพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ที่ปกคลุมด้วยฟองก๊าซไฮโดรเจน



รูปที่ 2.24 จำลองการเกิดพีระมิดแบบสุ่มจากฟองก๊าซไฮโดรเจนบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนเวลาสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ให้ใช้โดยไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 ปฏิบัติการกัดซิลิคอน

เทคโนโลยีหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คือ การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกเป็นกระบวนการที่ใช้สารละลาย (Etchant) ในการกัดเนื้อซิลิคอนแต่ละระนาบไม่เท่ากันหรือกล่าวได้ว่าอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของซิลิคอน สารเคมีที่นิยมใช้กัดซิลิคอนนั้นมีหลากหลายชนิด ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยต่างผสมกับน้ำ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) [38] เอธิลีนไดแอมีน (Ethylenediamine) ไฮดราซีน (Hydrazine) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นต้น อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลาย [7] ดังนั้นการเลือกใช้สารละลายให้เหมาะสมที่นำมาใช้ในการกัดนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่กัดและการนำไปใช้งานอีกด้วย

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการกัดแบบเปียกที่ผิวหน้าของจะอธิบายได้คร่าวๆ 3 ขั้นตอนดังนี้

(1) เกิดปฏิกิริยาในการแพร่กระจายของสารละลายบนผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการหรือลวดลายที่ถูกเปิดชั้นป้องกันออก

(2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายและผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (Reduction-Oxidation) หรือที่เรียกว่า “ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction)” ปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้ออกซิเดชันของวัสดุที่ละลายแล้วเกิดออกไซด์ อธิบายให้ง่ายขึ้น คือ ผิวหน้าของวัสดุจับตัวกับสารละลายและถูกดึงออกไปยังระบบของสารละลาย

(3) เกิดการแพร่กระจายของผิวหน้าของวัสดุที่จับตัวอยู่กับสารละลายสารละลาย ซึ่งจะทำการเกิดปฏิกิริยาซ้ำลง [20]

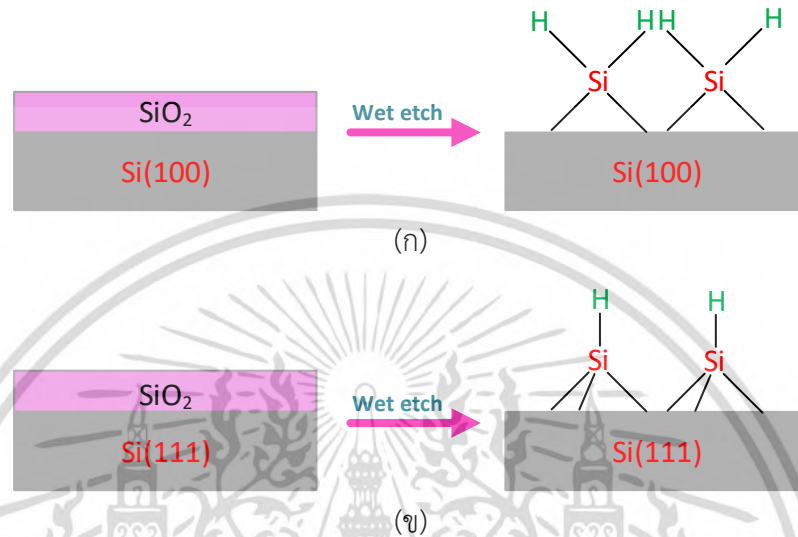
สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และน้ำปราศจากประจุ มีชื่อย่อว่า (TMAH) เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกอัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนในระนาบต่างๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้ (110) > (100) > (111)

ในโครงสร้างอะตอมซิลิคอนจะมีระนาบต่างๆ จะมีจำนวนพันธะที่ถูกกัดออกไปก่อน และจำนวนพันธะที่จะถูกดึงออกสู่สารละลายไม่เท่ากัน [39] ดังจะกล่าวต่อไป

1. ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกกัดออกจะมี 2 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวระนาบและมี 2 อะตอมที่ถูกกัดออกก่อน ดังนั้นการที่จะดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึง 2 พันธะ
2. ระนาบ (111) จะมี 3 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมี 1 อะตอม ที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้าจึงเป็น ระนาบที่แข็งแกร่งที่สุด

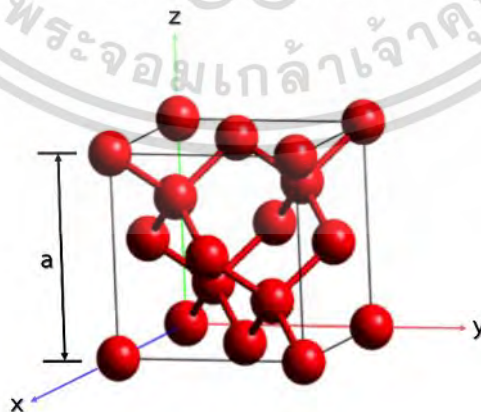
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. ระนาบ (110) จะมี 3 อะตอมอยู่ที่ผิวหน้า 1 อะตอมอยู่ที่ใต้ผิวหน้า และ 1 อะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้านี้นี้ แม้ว่าจะมี 2 อะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมตรงกลางที่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่ ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกกัดไปพร้อมกันกับระนาบ (100) จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงน้อยกว่าระนาบ (100) และระนาบ (111) [20] ดังที่แสดงให้เห็นในแผนผังของพันธะซิลิคอนในรูปที่ 2.25



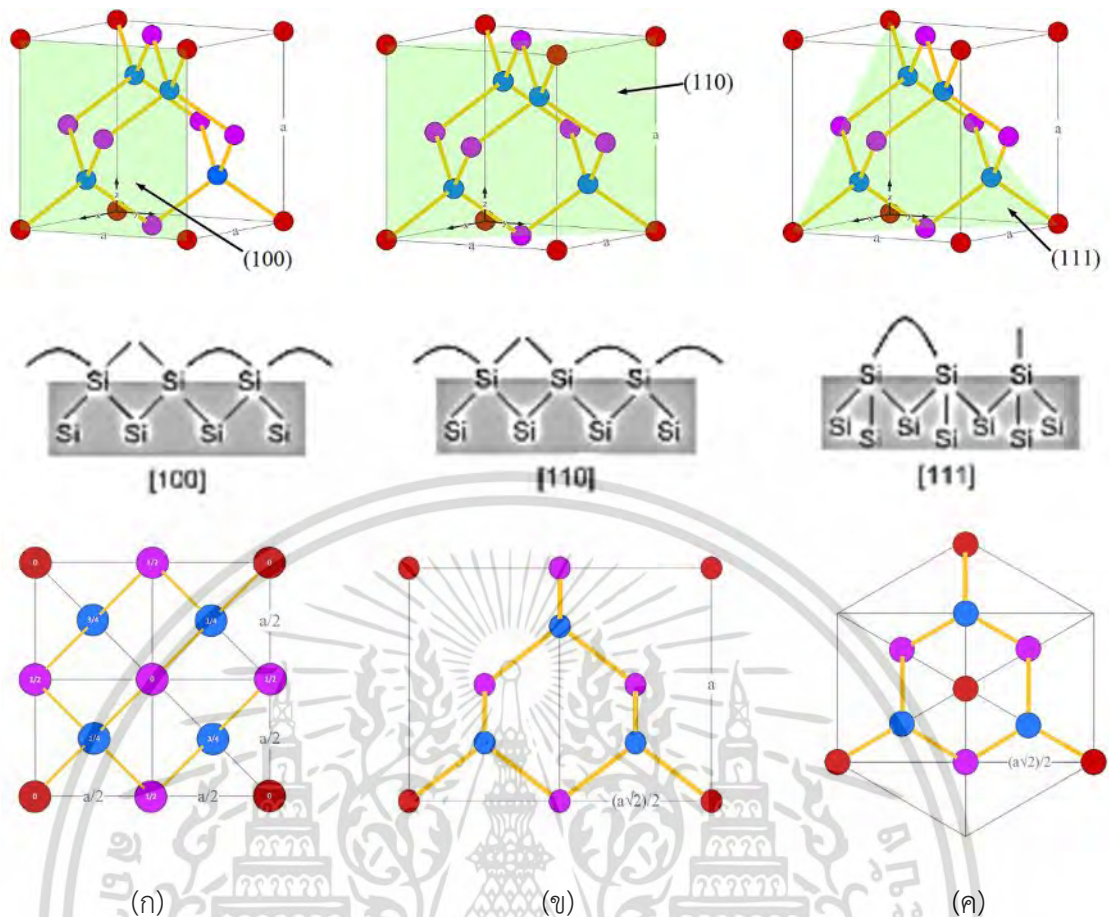
รูปที่ 2.25 แผนผังของพันธะซิลิคอน (ก) ระนาบ (100) และ (ข) ระนาบ (111) [40]

เนื่องจากสารละลาย TMAH เป็นสารละลายที่ทำการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โครงสร้างของสารละลาย TMAH ต้องเพิ่มอุณหภูมิช่วยในการกัดระนาบของซิลิคอน เพื่อให้สารละลาย TMAH ทำการกัด ควรรู้ว่าโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือ แบบเพชรมีค่าคงที่ของโครงสร้างอะตอมประกอบเท่ากับ 5.43 Å เป็นโครงสร้างแบบ Face Centred Cubic (FCC) [9] แต่มีอะตอมสองอะตอมในหน่วยเซลล์ ในรูปที่ 2.26 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน และรูปที่ 2.27 แสดงระนาบต่างๆของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.26 ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic) [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.27 ทิศทางโครงสร้างผลึกของซิลิคอน [32]

(ก) พื้นระนาบอะตอมซิลิคอนระนาบ (100)

(ข) พื้นระนาบอะตอมซิลิคอนระนาบ (110)

(ค) พื้นระนาบอะตอมซิลิคอนระนาบ (111)

การกัดซิลิคอนนั้นมีขั้นตอนหลักอยู่ 4 ขั้นตอน

(1) โสไลจากสารละลายเข้าสู่ซิลิคอน เพื่อยกระดับสถานะออกซิเดชัน (oxidation state) ของซิลิคอนเป็นซิลิคอนประจุบวก (Si^+)

(2) การรวมตัวของอะตอมอนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH^-) และซิลิคอนประจุบวก (Si^+) เป็นซิลิคอนออกไซด์ที่ละลายน้ำได้

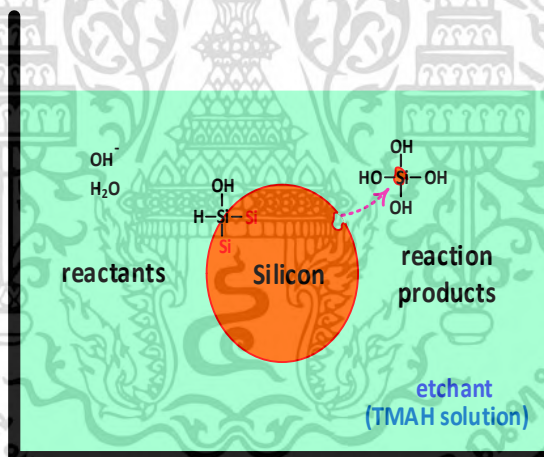
(3) การรวมตัวของซิลิคอนและองค์ประกอบในสารละลายกลายเป็นสารประกอบเชิงซ้อนหรือคอมเพลกซิงเอเจนต์ (complexing agent) สารนี้สามารถเกิดสารประกอบเชิงซ้อนกับไอออนของโลหะ เป็นสารที่ละลายน้ำได้ในสภาวะต่าง ไอออนเหล่านี้จะเกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ที่ไม่ละลายน้ำในสภาวะต่างปกติ

(4) การดึงซิลิคอนที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายออกสู่น้ำ ทำให้ซิลิคอนถูกกัดออกไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากขั้นตอนเหล่านี้ [42] สารเคมีที่จะกัดซิลิคอนได้ต้องแตกตัวให้โพลกับซิลิคอนและตัวมันเองต้องมีอะตอมไฮดรอกซิลเกิดขึ้นรวมทั้งสารประกอบเชิงซ้อน (complexing agent) นั้นต้องสามารถละลายน้ำได้

โดยทั่วไปปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการกัดซิลิคอนด้วยสารละลายที่ใช้กัด แสดงดังรูปที่ 2.28 เป็นกระบวนการที่ค่อยๆเกิดขึ้นในส่วนของสารเคมีที่ละลายได้ และในกระบวนการทางเคมีจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนขึ้นในขนาดต่างๆ โดยที่ไฮโดรเจน 2 โมเลกุลนั้นก่อเกิดจากอะตอมซิลิคอนแต่ละอะตอมละลายแตกออกจากโครงผลึกไปในระหว่างการกัด สำหรับกลไกของการกัด จะได้ผลิตภัณฑ์จากสารประกอบ $\text{SiO}_2(\text{OH})^{2-}_2$ โดยพบว่า ไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ยังเป็น Species ชนิดหนึ่งสำหรับ Activate etching อีกด้วย ซึ่งความหนาแน่นของไฮดรอกไซด์ไอออนจะลดลงในระหว่างการกัด รวมถึงน้ำก็ยังเป็น Activate etching ชนิดหนึ่งเพราะซิลิคอนจะยังไม่ถูกกัดด้วยสารละลายที่ไม่มีส่วนของน้ำ ผลรวมของปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนในสารละลาย จากปฏิกิริยาพบว่า โมเลกุลของน้ำและไฮดรอกไซด์ไอออนแสดงคุณสมบัติเป็นตัวตั้งต้น (Reactants) และส่วน $\text{Si}(\text{OH})_2(\text{O})_2$ แสดงผลผลิตของปฏิกิริยา (Reaction products) [22] ดังสมการที่ 2.28

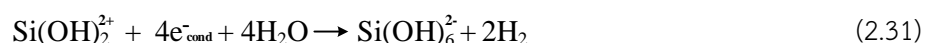
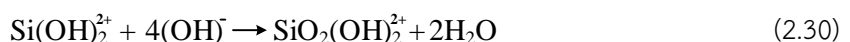
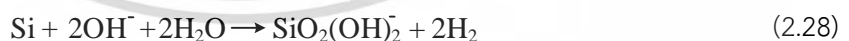
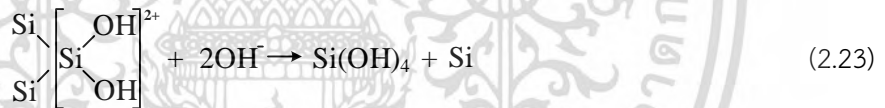
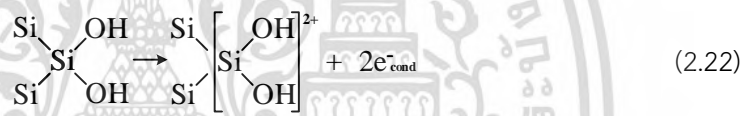
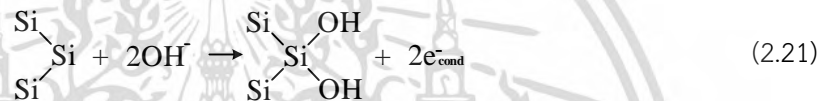


รูปที่ 2.28 ภาพจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนระนาบ (100) [43]

กระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์นั้นมีกลไกกระบวนการกัดดังนี้

ในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ซึ่งสารละลายนี้จะลดรูปเป็นอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (Hydroxyl radical) คือ รูปที่เป็นกลางของไฮดรอกไซด์ไอออน (Hydroxide ion) และมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก เมื่อทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะทำให้อะตอมหรืออนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH^\cdot) เกิดการแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation state) ทำให้ยกระดับสถานะออกซิเดชันของซิลิคอนได้เป็นเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

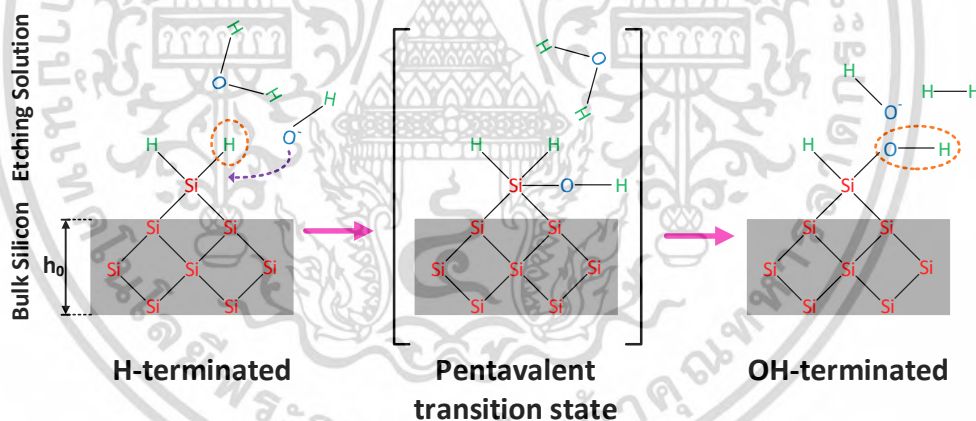
ซิลิคอนประจุบวก (Si^+) โดยอะตอมไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิคอน และพันธะซิลิคอนหลัก (Back bond) ที่ยังไม่ถูกตัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $\text{Si}(\text{OH})_2^{2+}$ เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์” และซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำ คือ ปฏิกิริยาแตกตัว (Decomposition reaction) เกิดเป็นอะตอมของไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ (OH^-) ซึ่งไปทำปฏิกิริยาการรวมตัว (Combination reaction) กับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งก่อตัวขึ้นให้เกิดผลิตภัณฑ์ เรียกว่า กรดออร์โธซิลิก (Orthosilic acid) ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย [8] โดยกรดออร์โธซิลิกนี้จะแตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ 2.21-2.31 [44] แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของของสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ตามลำดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.29 เป็นการเกิดปฏิกิริยาสารละลายนี้จะลดรูปเป็นไอออนของไฮดรอกไซด์ (Hydroxide ion) และทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนร่วมกับโมเลกุลของน้ำ ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (Electronegativity) ของอะตอมไฮดรอกไซด์ (2.2) มีค่าใกล้เคียงกับของซิลิคอน (1.9) ทำให้อะตอมของธาตุต่างชนิดรวมตัวเป็นโมเลกุลโดยใช้อิเล็กตรอนคู่ร่วมกัน นิวเคลียสของอะตอมทั้งสองจะดึงดูดอิเล็กตรอนคู่ที่ใช้ร่วมกันด้วยแรงที่ต่างกัน เกิดการสร้างพันธะเคมี (Chemical bond) ต่อกัน เนื่องจากพันธะของซิลิคอน-ไฮดรอกไซด์ (Si-H) มีค่าโพลาไรซ์ที่ต่ำ การยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะต่ำทำให้ง่ายต่อการแตกตัวของนิวคลีโอไฟล์ (nucleophiles) ส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) [45] เป็นปฏิกิริยาที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะระหว่างอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนและอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ทำให้สารโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารโมเลกุลเล็กลง

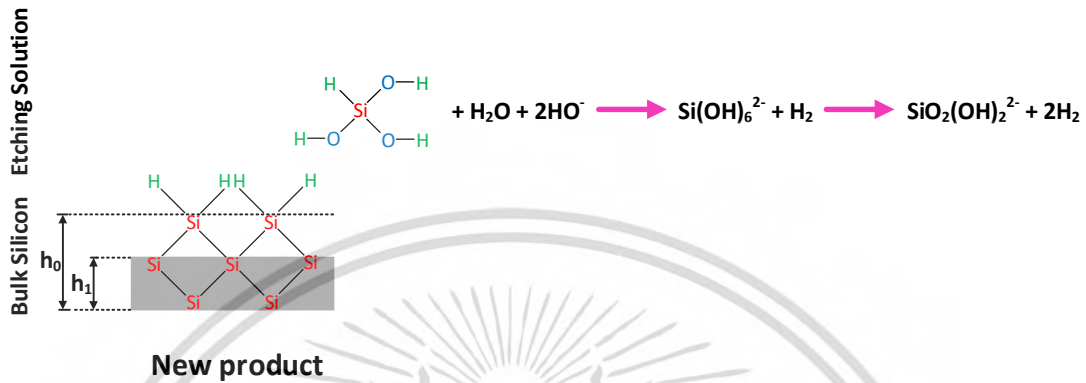
ในกรณีของซิลิคอนไดไฮดรอกไซด์ (100) ที่แรงดึงดูดของพันธะ Si-H รอบข้างช่วยให้เกิดการแทนที่ระหว่างอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนและอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนนี้ออนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์เป็นตัวการเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็น Species ชนิดหนึ่งสำหรับ Activate etching อีกด้วย ขณะที่โมเลกุลของน้ำมีขั้วทำให้สามารถยึดจับกับสารที่มีขั้วได้ ทำให้น้ำสามารถเป็นตัวทำละลายที่ดีมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (Active species) โดยการเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H_2) เป็นผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนนี้



รูปที่ 2.29 แบบจำลองปฏิกิริยาเริ่มต้นของการกัดซิลิคอนระนาบ (100)

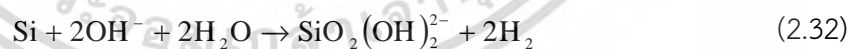
ในปฏิกิริยาการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารเคมี โดยโมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของไฮดรอกไซด์สำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแทนที่ของไฮดรอกไซด์มีความรวดเร็วยิ่งขึ้น และปริมาณของไฮดรอกไซด์ซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิว ในการที่มีจำนวนของพันธะ Si-H มากขึ้น ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยการออกซิเดชันเป็นขั้นตอนในการชะลอการกัด ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

เมื่อเกิดปฏิกิริยาการแทนที่อะตอมของไฮโดรเจนไอออนด้วยอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์อย่างรวดเร็ว จากความแตกต่างของค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีระหว่างซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) เป็นตัวทำให้อัตราการกัดของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแยกพันธะของ Si-Si และเกิดการผลัดอะตอมของซิลิคอนจากพื้นผิวในรูปของ HSi(OH)_3 [32] ดังแสดงในรูปที่ 2.30



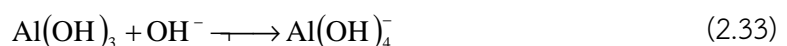
รูปที่ 2.30 แบบจำลองปฏิกิริยาสุดท้ายของการกัดซิลิคอนระนาบ (100)

อะตอมของซิลิคอนจะถูกแทนที่โดยไฮโดรเจนไอออน และเงื่อนไขในการแทนที่ของไฮโดรเจนไอออน (H) ตัวที่สอง (dihydride) อาจทำให้เกิด Si(OH)_4 หลังจาก HSi(OH)_3 กระทำกับสารละลายอัลคาไลน์ส่วนใหญ่จะเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับผลิตภัณฑ์ Si(OH)_6^{2-} และก๊าซไฮโดรเจน (H_2) โดยที่ผลิตภัณฑ์ Si(OH)_6^{2-} จะสลายตัวเป็นซิลิเกต ($\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$) และ 2H^+ ซึ่งทำปฏิกิริยากับอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ในสารละลายส่วนใหญ่จากน้ำ ดังสมการที่ 2.32 โดย $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$ จะเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายของกระบวนการสลายซิลิคอน [32] ในกรณีของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (111) มีความสัมพันธ์ระหว่างลักษณะของปฏิกิริยาการละลายตัว และโครงสร้างพื้นผิวทำให้ได้พื้นผิวที่เรียบ การเกิดละลายตัวของสารเคมี เช่น ในกรณีของค่าความเป็นกรด-ด่าง pH เพิ่มขึ้น อัตราการกัดของสารละลายเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากพันธะของ Si-H มีเสถียรภาพลดลง



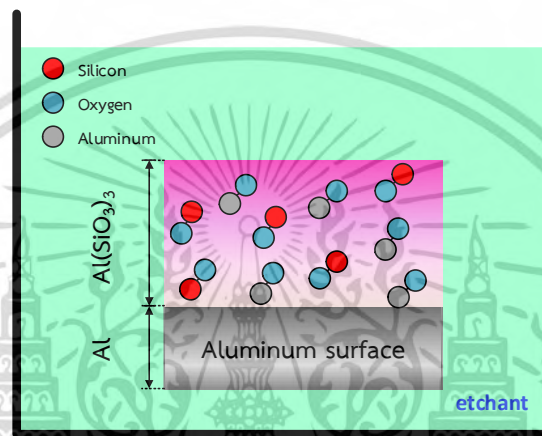
2.4.5 ปฏิกิริยาการกัดอะลูมิเนียม

กระบวนการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกมีความสำคัญมีความต้องการเลือกใช้อะลูมิเนียมเป็นชั้น metallization พิล์มอะลูมิเนียมจะถูกควบคุมด้วยสารละลายที่เป็นกรดและต่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงอะลูมิเนียมไม่สามารถรักษาได้เพราะชั้นออกไซด์มี Al(OH)_3 [45] ซึ่งทำปฏิกิริยาในสารละลายต่างอะลูมิเนียมดังสมการที่ 2.33



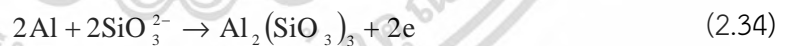
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่ำลง จากการแตกตัวของน้ำจะอยู่ในสภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของคูกรด (HO^+) และคูเบส (OH^-) ซึ่งมีค่าเท่ากัน ดังสมการ 2.33 ดังนั้นการละลายน้ำของสารที่เป็นกรดจึงไปทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น การกัดของอะลูมิเนียมจากฟังก์ชันของสารแอมโฟเทอริก (H_2O) ของอะลูมิเนียมเป็นชั้นป้องกันกรด ซึ่งจะสามารถช่วยป้องกันการกัดอะลูมิเนียมได้ สำหรับฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ซิลิเกตในสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide: $\text{Al}(\text{OH})_3$) ในรูปแบบซิลิเกต (pyrophyllite-type) ที่ละลายได้น้อยซึ่งเป็นพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.31 [24]



รูปที่ 2.31 ภาพจำลองตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม

การเติมกรดซิลิซิกปริมาณที่เหมาะสมลงในสารละลาย TMAH จะส่งผลต่อการป้องกันการกัดของชั้นอะลูมิเนียมและชั้นออกไซด์เป็นอย่างมาก เนื่องจากไอออนไฮดรอกไซด์ในสารละลายส่วนมากจะทำปฏิกิริยากับกรดที่เติมลงไปแทนการกัดอะลูมิเนียมและการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ ปฏิกิริยาการกัดของอะลูมิเนียม แสดงดังสมการต่อไปนี้

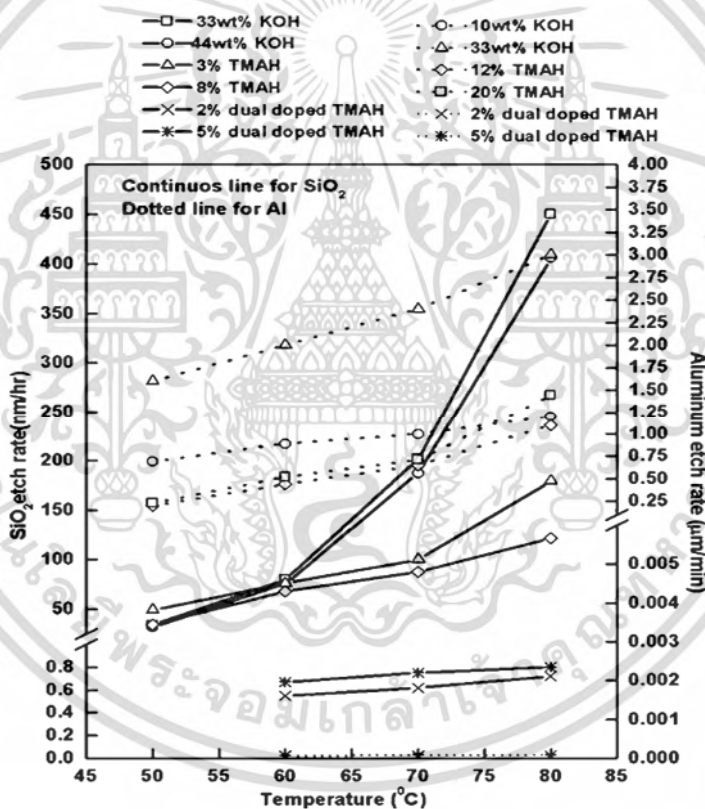


จากสมการที่ 2.34 เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดซิลิซิกและอะลูมิเนียม เนื่องจากการเติมซิลิเกต (SiO_3) เข้าไปในระบบปฏิกิริยาสารเคมี จึงซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีนั้นคืออะลูมิเนียมซิลิเกต $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$ ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมานี้สามารถละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นในระหว่างกระบวนการกัด ผลิตภัณฑ์ $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$ นี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนชั้นหน้ากปกป้องการกัดบนชั้นอะลูมิเนียมและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ [35] และเมื่อเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH จะทำให้มีความเป็นกรด-ด่างอยู่ในระดับปานกลาง (ค่า pH ระหว่าง 8 ถึง 12) ส่งผลทำให้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ลดลง [23]

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (K. Biswas, 2006; งามจิต, 2017; ยุทธนา, 2017)

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะการกัดเป็ยกแบบแอนไอโซทรอปิก ด้วยสารเคมีที่ใช้กัดในการสร้างตัวตรวจวัดแสง พบงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

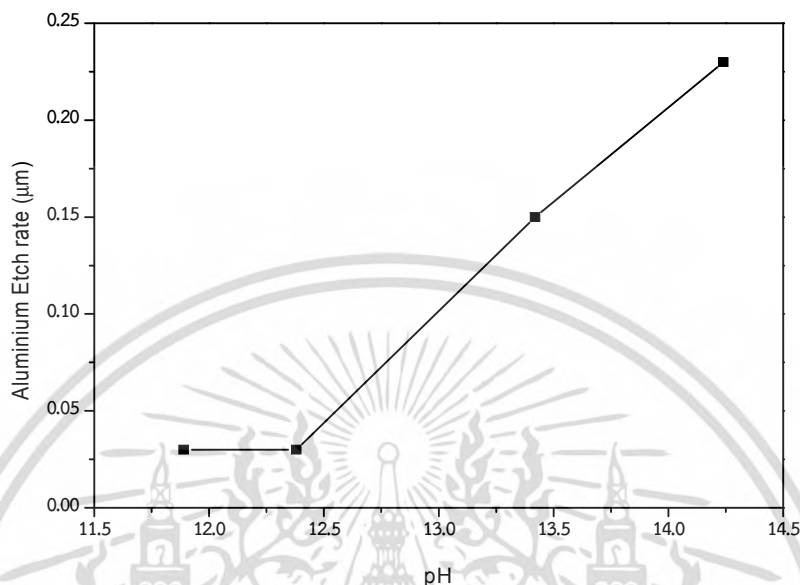
เค บิสวาร์ชและคณะ (K. Biswas, 2006) ได้วิจัยเรื่องการศึกษาลักษณะการกัดของสารละลาย KOH, TMAH และคู่สารเจือ TMAH สำหรับโครงสร้างจุลภาคในเนื้อซิลิคอนสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ [46] ได้ผลการศึกษาซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) และอะลูมิเนียม (Al) จากรูปที่ 2.32 แสดงให้เห็นว่าอัตราการกัดซิลิคอนสูงสุดที่ใช้สารละลาย KOH ที่ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ขณะที่สารละลายคู่สารเจือ TMAH มีการสร้างชั้นป้องกันอะลูมิเนียมที่สมบูรณ์ และอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ในสารละลาย KOH สูงประมาณสองเท่า เมื่อเทียบกับสารละลาย TMAH ที่ไม่เติมสารเจือ และสูงกว่าสารละลายคู่สารเจือ TMAH ประมาณ 1,000 เท่า



รูปที่ 2.32 การเปรียบเทียบระหว่างอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียมที่เปลี่ยนแปลงไป กับสารละลาย KOH, TMAH และคู่สารเจือ TMAH [46]

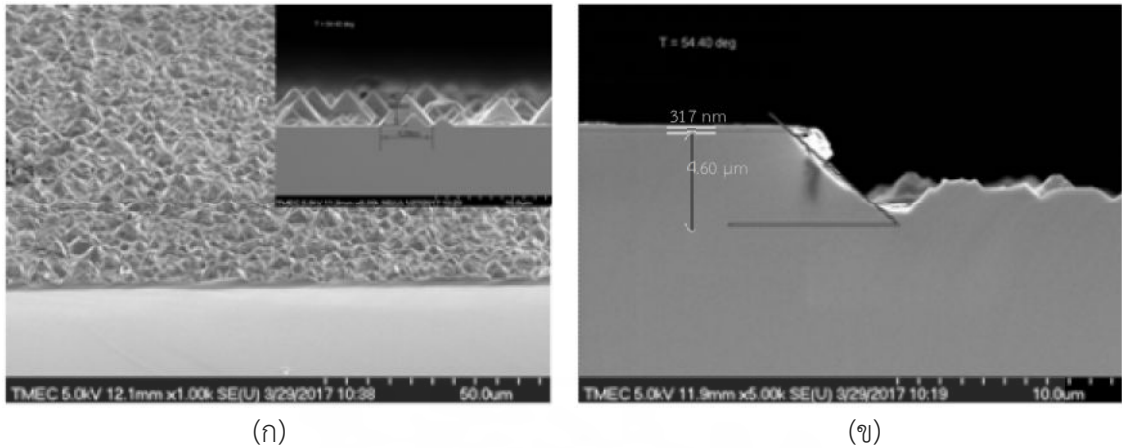
งานวิจัยของ (งามจิต, 2017) ได้ทำการวิจัยเรื่องการศึกษากการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM [6] ได้ผลการศึกษาคความลึกของการกัดด้วยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ด้วยเงื่อนไขการผสมสารละลาย TMAH ที่มีอัตราส่วนผสมเป็น 1:0, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4 และ 1:5 และเมื่อเติมผงซิลิคอนลงในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายด้วยปริมาณ 15, 25, 37.5 และ 50 กรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 2.33 เพื่อลดการกัดอะลูมิเนียมที่ใช้สำหรับเป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผลการทดลองการวัดค่าความเปลี่ยนแปลงของความเป็นกรด-ด่างในสารละลายที่มีผลต่อการกัดพื้นผิวของซิลิคอน



รูปที่ 2.33 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ [6]

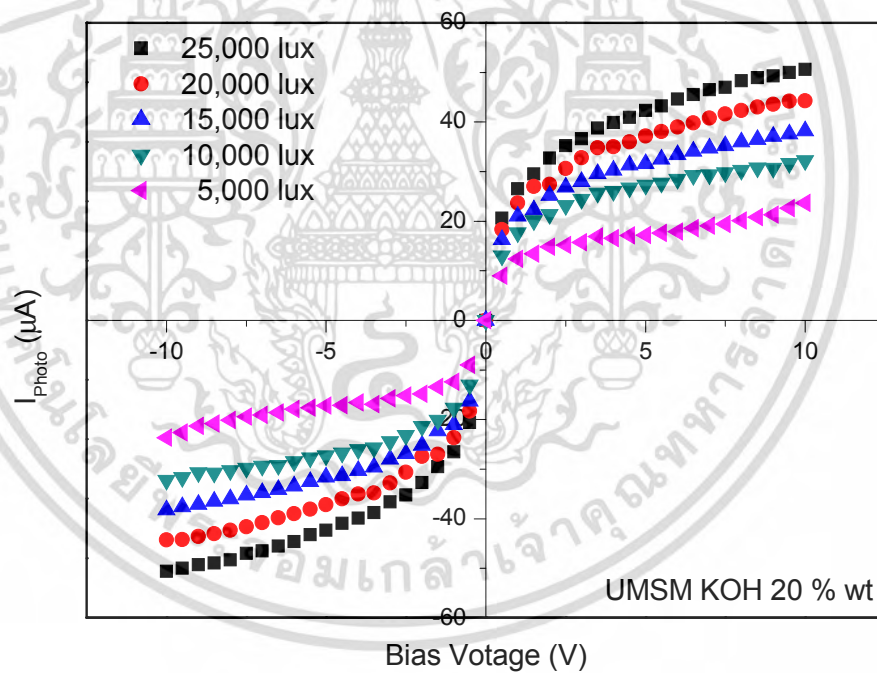
งานวิจัยของ (ยุทธนา, 2018) ได้ทำการวิจัยเรื่องการเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม [8] ได้ผลการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะได้รับแสงตกกระทบที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ของโฟโตไดโอดผลการทดสอบสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 2.35 เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสตรง 10 V ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt มีค่ากระแสแสงประมาณ 50.2 μA ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มโดยการใช้สารละลาย KOH ทำให้มีค่ากระแสแสงมากขึ้นอันเนื่องมาจากพีระมิดแบบสุ่มบนพื้นผิวของซิลิคอนภายในร่องรูปตัวยูทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวช่วยที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง และเมื่อมีแสงตกกระทบที่พื้นผิวของพีระมิด ดังแสดงในรูปที่ 2.34



รูปที่ 2.34 ภาพพื้นผิวและภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า และ 5,000 เท่า [8]

(ก) พื้นผิวซิงค์ออกไซด์ที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 wt%

(ข) ภาพตัดขวางของพื้นผิวซิงค์ออกไซด์ที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 wt%



รูปที่ 2.35 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างทำการสร้าง พิระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 wt% ขณะรับแสงตกกระทบ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบลวดลายต้นแบบและการเตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ซึ่งเตรียมโดยวิธีการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด 80 องศาเซลเซียส โดยใช้แผ่นซิลิคอน Czochralski silicon (CZ) ชนิดเอ็นระนาบ (100) มีสภาพต้านทาน 5-10 $\Omega\cdot\text{cm}$ ความหนา 625 μm ลักษณะโครงสร้างรอยสัมผัสระหว่าง Al/n-Si/Al ในการออกแบบการทดลองจะแบ่งออกเป็นสองส่วนหลักๆ คือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง เพื่อใช้สำหรับการสร้างและการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มากขึ้น และส่วนที่สองกระบวนการกัดเพื่อสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

ในการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเพื่อทำการสร้างตัวตรวจวัดแสง ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X6 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ออกแบบไปทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์ม จากนั้นนำแผ่นฟิล์มไปติดบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป

โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสชนิดต่อกัน 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากัน คือ 1 mm^2 มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านมีขนาด 80 μm ซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป เพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ให้แก่ตัวอุปกรณ์ และไม่เล็กจนทำให้ลวดลายต้นแบบอาจสัมผัสถึงกันทำให้เกิดการลัดวงจรในภายหลังได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสต่อกัน



รูปที่ 3.1 การออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณความเข้มแสง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการกระตุ้นพาหะจากการดูดกลืนพลังงานโฟตอนให้เกิดการปลดปล่อยพาหะอิสระ ทำให้เกิดการนำไฟฟ้า สำหรับการออกแบบหลอดลายต้นแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นจะต้องคำนึงพารามิเตอร์แรกที่สำคัญ คือ ค่าความกว้างบริเวณปลดพาหะ (Depletion region) เนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมที่บริเวณปลดพาหะ ซึ่งส่งผลให้กระแสแสงเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น ในสมการที่ 3.1 เป็นสมการคำนวณหาค่าความกว้างบริเวณปลดพาหะ [4]

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (3.1)$$

โดยที่ ε_s คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

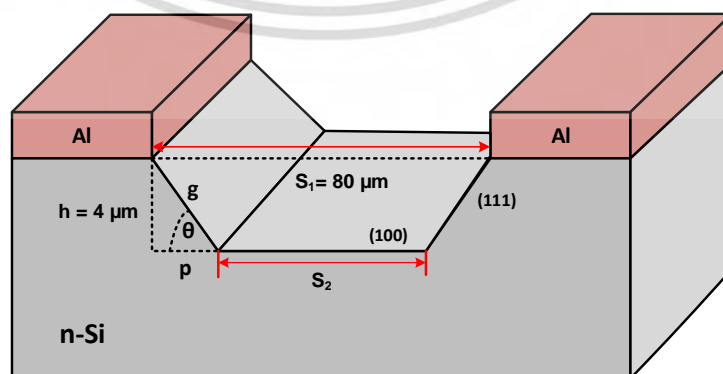
q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมบ์

N_D คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้

V_{bi} คือ แรงดันภายใน

V_A คือ แรงดันไบอัส

จากการคำนวณจะได้ว่าค่าการขยายตัวของบริเวณปลดพาหะที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V มีค่าเท่ากับ $4.0 \mu\text{m}$ และ $5.5 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความลึกการกัดร่องรูปตัวยูในช่วง $4\text{-}5 \mu\text{m}$ จากนั้นคำนวณการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สูตรทางตรีโกณมิติดังแสดงในสมการที่ 3.2 และ 3.3 โดยใช้ความลึก (ด้าน h) ที่ได้จากการขยายตัวของบริเวณปลดพาหะเท่ากับ $4 \mu\text{m}$ มุมของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเท่ากับ 54.74 องศา [8] พบว่าพื้นที่รับแสงแนวระนาบ (111) ของร่องรูปตัวยู (ด้าน g) มีค่าพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นเป็น 1.73 เท่าของพื้นที่รับแสงแนวราบของร่องรูปตัวยู (ด้าน p) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพของภาคตัดขวางโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เราสามารถคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงของการกัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูได้จากสมการ

$$\frac{h}{g} = \sin \theta \quad (3.2)$$

$$\frac{p}{g} = \cos \theta \quad (3.3)$$

โดยที่ p คือ พื้นที่รับแสงแนวราบของร่องรูปตัวยู

g คือ พื้นที่รับแสงแนวระนาบ (111) ของร่องรูปตัวยู

h คือ ความลึกการกัด

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นซิลิคอนเพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

ชนิด AU/n-Si/Al

1. แผ่นซิลิคอน
2. ปีกเกอร์
3. กระดาษกรอง (whatman)
4. กระดาษผ้า Micro Pure SL (Bemcot wiper)
5. อะลูมิเนียมฟอยล์
6. หน้ากากป้องกันสารเคมี
7. ถังมือยาง (ไม่มีแป้ง)
8. ถังมือป้องกันกรด
9. กระจกต้นแบบ (photomask)
10. เครื่องปรับซ้อนมาส์ค (mask aligner)
11. เครื่องอัลตราโซนิค
12. เครื่องเป่าก๊าซไนโตรเจน
13. เตอบ
14. เครื่องสปินเนอร์ (Spinner)
15. เตอบออกซิเดชัน
16. เครื่องตัดแผ่นซิลิคอน (wafer cutting)
17. เครื่องชั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AY220
18. สารเคมี ได้แก่ อะซีโตน กรดไฮโดรฟลูออริก สารละลาย BOE สารละลายผสม กรดฟอสฟอริก กรดปิรันยา น้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 น้ำยาขึ้นลวดละลาย (AZ Devolper)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สวทช. รับผิดชอบการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของตัวตรวจวัดแสง จากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC)

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและวัดสมบัติทางไฟฟ้า

1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
3. เครื่อง Surface profilometer รุ่น TENCOR P10
4. กล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)
5. เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า
6. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง
7. เครื่อง sintering รุ่น tube 60-300/12P
8. ชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์
9. กาวเงิน
10. สายไฟ
11. แผ่นวงจรพิมพ์แบบโซลดา
12. ขั้วต่อสำหรับไฟเส้น RGB LED

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและวัดสมบัติทางไฟฟ้า

จากศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC)

3.3 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ชนิด Al/n-Si/Al ในวิทยานิพนธ์นี้ถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพความต้านทาน 5-10 Ω .cm ความหนา 625 μ m ระยะห่างระหว่างขั้ว 80 μ m ขนาดขั้วไฟฟ้า 1x1 mm²

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ประกอบด้วยกระบวนการสร้าง 7 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน 2) กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมด้วยวิธีกระบวนการอาร์เอฟสเปคเตอริง 3) กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยเทคนิคไอสารเคมีแบบพลาสมา เพื่อใช้เป็นหน้ากักป้องกันการกัดชั้นอะลูมิเนียม 4) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง 5) การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด 6) กระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยูโดยใช้การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก และ 7) กระบวนการซินเตอร์ริงเพื่อทำให้รอยสัมผัสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมและเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ โดยแต่ละขั้นตอนนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด และถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานส่งผลต่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนกระบวนการขึ้นลวดลายและประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงลดลงได้ โดยมีขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน ดังต่อไปนี้

- 1) อัลตราโซนิก (ultrasonic) ผ่านผลึกซิลิคอนในน้ำปราศจากไอออน (de-ionization water: DI water) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 2) ต้มในกรดปिरินยา ($3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$: piranha) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ ล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 3) จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid: HF) ที่ความเข้มข้น 5% เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native oxide) บนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในอากาศ ล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.6 การลอกชั้นออกไซด์ที่เกิดจากธรรมชาติ (native oxide) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก

3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม

หลังจากผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้วจากนั้นทำการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมโดยทำการเคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง (RF sputtering) เป็นกระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมให้มีความหนา $1.5 \mu\text{m}$ โดยอาศัยหลักการที่อะตอมของผิวหน้าสารเคลือบซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นเป้าถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง จากนั้นอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะวิ่งมาเคลือบบนแผ่นผลึกซิลิคอน โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับความถี่สูง (RF power source) เพื่อสร้างพลาสมาของอาร์กอน (Ar^+) แทนระยะห่างระหว่างเป้าและแผ่นเวเฟอร์จะอยู่ค้ำข้างใกล้กัน เช่น ต่ำกว่า 10 cm และความดันของก๊าซอาร์กอนจะอยู่ในระดับประมาณ 0.1 Torr [1] ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้ไอออนของอาร์กอนเคลื่อนที่เข้าหาเป้าได้มากขึ้นทำให้อัตราการเกิดชั้นอะลูมิเนียม (Deposition rate) สูงขึ้น

3.3.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

การปลูกฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา (PE-CVD) ใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ $<400 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นวิธีการปลูกชั้นฟิล์มบางที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสถานะก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์การปลูกฟิล์มวิธีนี้ใช้หลักการพลาสมาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ จึงทำให้สามารถปลูกชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำ [47] ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)

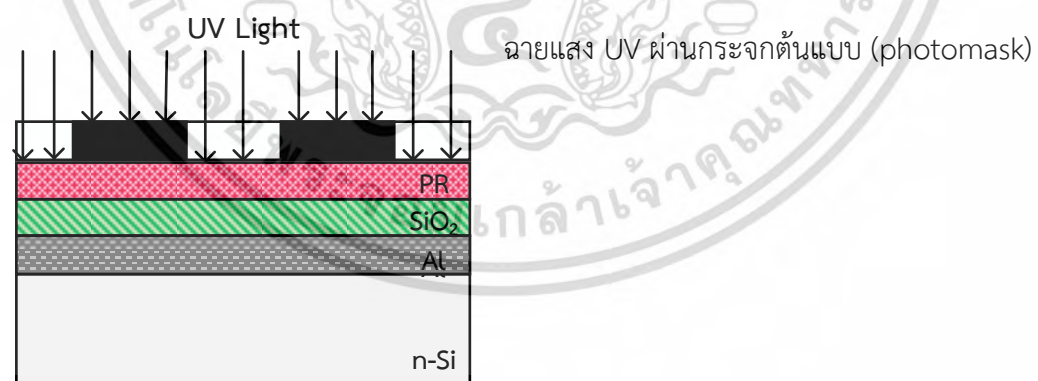
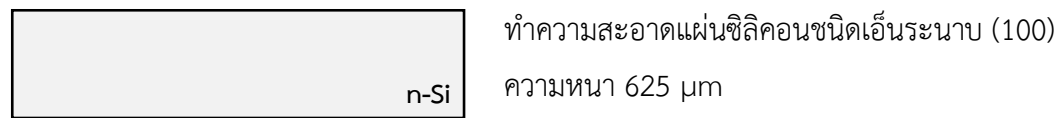
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ในกระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงานสำหรับสร้างลวดลายขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระจกต้นแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบนี้จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายทึบ แสงจะไม่สามารถผ่านได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ไม่ถูกแสงและบางบริเวณที่ถูกแสง เมื่อนำไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้

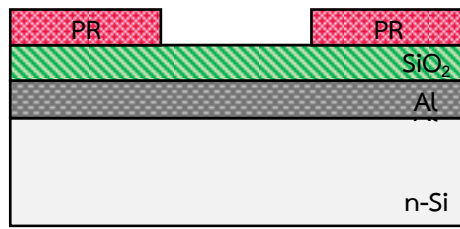
- 1) อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นออก ที่อุณหภูมิ 90-100 °C เป็นเวลา 30 นาที
- 2) เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์
- 3) อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- 4) ฉายแสงย่านอัลตราไวโอเล็ตผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- 5) ชื่นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาชื่นลวดลาย (AZ developer) ล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 6) อบครั้งที่สอง (post bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- 7) กัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลาย BOE แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 8) กัดชั้นอะลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลายผสมกรดฟอสฟอริก แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 9) ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออกด้วยอะซิโตน แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ในรูปที่ 3.7 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูป
ด้วย ชนิด Al/n-Si/Al



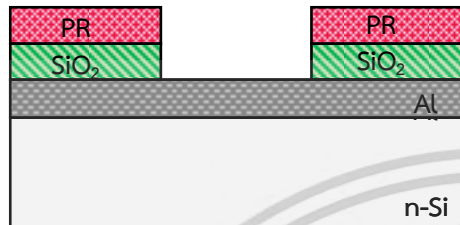
รูปที่ 3.7 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วย ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ฉ)

ชั้นลวดลายด้วยน้ำยา AZ Developer



(ช)

กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกด้วยสารละลาย BOE



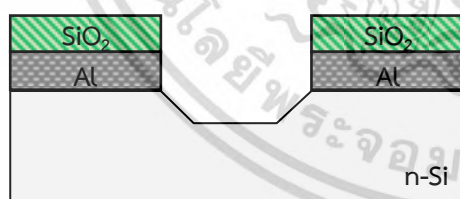
(ซ)

กัดชั้นอะลูมิเนียมออกด้วยน้ำยาลอกอะลูมิเนียม



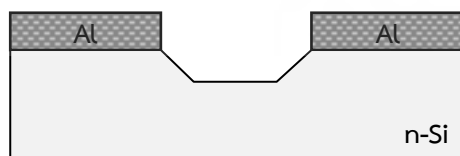
(ค)

ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออกด้วยสาร Acetone



(ข)

ทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยสารละลายตามเงื่อนไขที่กำหนด



(ฅ)

ลอกชั้นออกไซด์ที่เหลือออกด้วยสารละลาย BOE



รูปที่ 3.7 (ต่อ) กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด

สารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู สามารถเตรียมได้จากการคำนวณการผสมของสารละลาย TMAH และกรดซัลฟิวริก ในปริมาณอัตราส่วนดังต่อไปนี้

การเตรียมสารเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

ในการเตรียมสารเคมีเพื่อใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ จะต้องใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงที่ต้องการเปิดลวดลายออก สารละลายที่ใช้ในการกัด เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution) ทำได้โดยการเตรียม HF : NH_4F ในอัตราส่วน 1 : 5 จะมีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 Å/min

การเตรียมสารเคมีกัดชั้นอะลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอะลูมิเนียม (Al etching) จะเป็นส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกเป็นหลักทำได้โดยการเตรียม H_3PO_4 : HNO_3 : CH_3COOH : DI ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ใช้อุณหภูมิในการกัด 40 °C เป็นเวลาประมาณ 4-5 นาที

การคำนวณการเตรียมสารละลายที่ใช้กัด

การเจือจางสารละลายเป็นการทำให้สารละลายมีความเข้มข้นลดลงตามที่ต้องการ โดยจะต้องมีการเติมตัวทำละลายลงในสารละลายนั้น ซึ่งสามารถคำนวณความเข้มข้นของสารละลายได้ดังนี้

$$\text{จากสมการ} \quad C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.4)$$

เมื่อ C_1 = ความเข้มข้นเริ่มต้น

V_1 = ปริมาตรเริ่มต้น

C_2 = ความเข้มข้นสุดท้าย

V_2 = ปริมาตรสุดท้าย

กรณี สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt%

$$\text{วิธีทำ} \quad C_1V_1 = C_2V_2$$

$$(25 \text{ wt}\%) \times V_1 = (5 \text{ wt}\%) \times (150 \text{ ml})$$

$$\text{จะได้} \quad V_1 = 30 \text{ ml}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาตรเริ่มต้นของสารละลาย TMAH จะได้เท่ากับ 30 ml

ถ้าต้องการใช้สารละลาย TMAH 5 wt% จะต้องเติมน้ำของปริมาตรสุดท้าย 150 ml เท่ากับ

$$150 \text{ ml} - 30 \text{ ml} = 120 \text{ ml}$$

ดังนั้น ต้องเปิดสารละลาย TMAH 25 wt% มา 30 ml แล้วเติมน้ำให้ปริมาตร 120 ml

กรณี กรดซัลฟิวริกปริมาณ 34 g/l

วิธีทำ $C_1V_1 = C_2V_2$

$$(1000 \text{ ml}) \times V_1 = (34 \text{ g/l}) \times (150 \text{ ml})$$

จะได้ $V_1 = 5.1 \text{ g/150ml}$

ดังนั้น เติมกรดซัลฟิวริก จำนวน 5.1 กรัมต่อปริมาตรสารละลาย TMAH 150 มิลลิลิตร

ตารางที่ 3.1 การเตรียมกรดซัลฟิวริกที่ปริมาณความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการกัดของตัวตรวจ
วัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

ปริมาณของ กรดซัลฟิวริก (g/l)	ปริมาณสาร (g)	ปริมาตรสารละลาย TMAH 5 wt% (ml)
30	4.5	150
32	4.8	150
34	5.1	150
36	5.4	150
38	5.7	150

หมายเหตุ : ปริมาณของสารละลายที่ใช้กัด 150 ml จึงต้องคำนวณปริมาณของกรดซัลฟิวริกจาก (g/l)
แปลงเป็น (g/ml)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



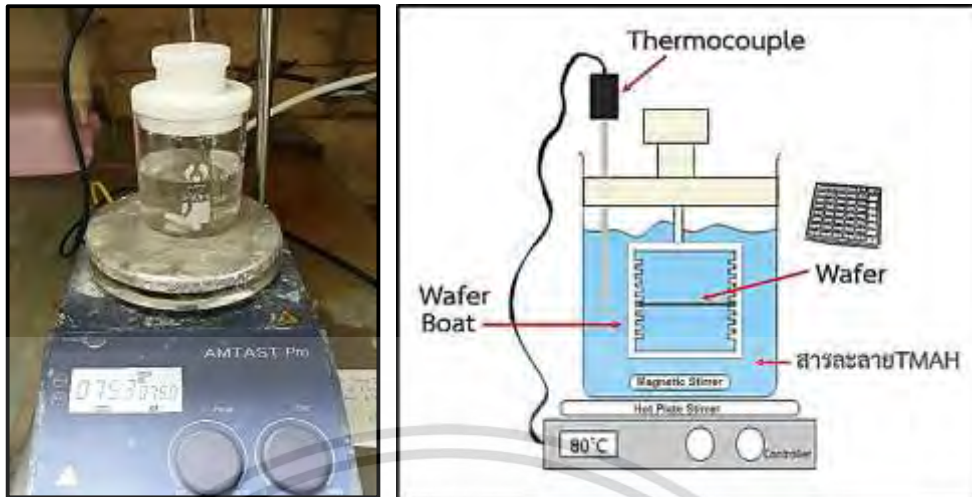
รูปที่ 3.8 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด

3.3.6 กระบวนการกัด

กระบวนการกัด (etching process) จะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100 ความหนา 625 μm มีขั้วโลหะเป็นอะลูมิเนียม โดยลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก สารละลายที่ใช้กัดคือ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ผสมด้วยกรดซิลิซิก (silicic acid) เพื่อใช้ในการลดอัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ และสร้างพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู ระหว่างขั้วอะลูมิเนียม โดยมีเงื่อนไขและขั้นตอนการกัด ดังต่อไปนี้

- 1) กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt%
- 2) เติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% จำนวน 30, 32, 34, 36 และ 38 g/l เพื่อลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ และสร้างลักษณะพื้นผิวซิลิคอนให้เป็นพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู
- 3) ต้มสารละลายที่ใช้กัดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องกวนสารละลายหมุนด้วยแท่งแม่เหล็กความเร็ว 200 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ทำการกัด
- 4) เมื่อทำการกัดชิ้นงานเรียบร้อยแล้วให้ทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ แล้วเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)

(ข)

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด

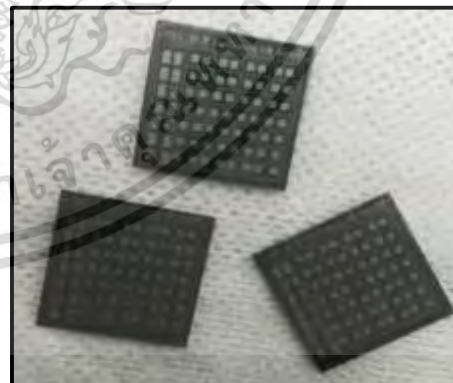
(ก) ชุดอุปกรณ์จริงที่ใช้ในกระบวนการกัด

(ข) ชุดอุปกรณ์จำลองที่ใช้ในกระบวนการกัด

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.10 (ก) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการกัดเข้าสู่กระบวนการขึ้นเตอริง เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมและเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.10 (ข)



(ก)



(ข)

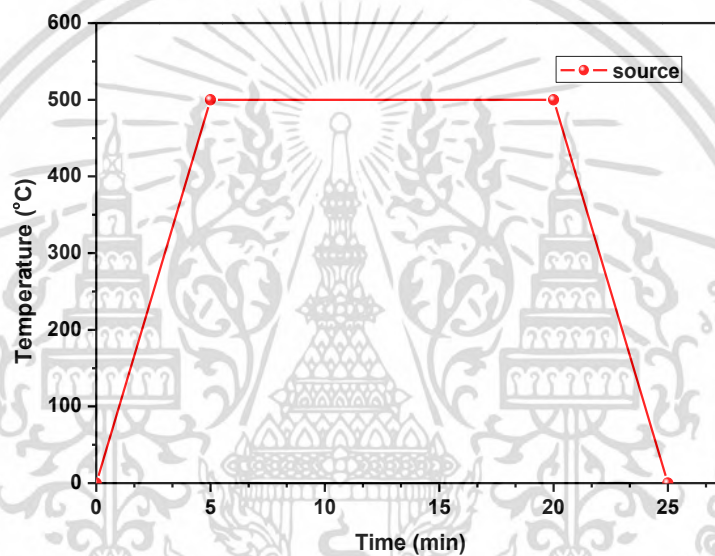
รูปที่ 3.10 (ก) ภาพถ่าย SEM ด้านบนของพื้นผิวชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l

(ข) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการกัดสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

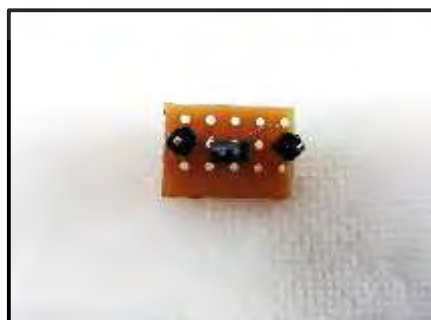
3.3.7 กระบวนการซินเตอร์ริง

เมื่อทำการกัดชิ้นงานแล้วจากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้รอยสัมผัสระหว่างส่วนของโลหะอะลูมิเนียมกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ [7] โดยปกติแล้วจะนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 0.7 ลิตร/นาที ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แต่สำหรับการศึกษาในกระบวนการสร้างรอยสัมผัส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงจะเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่เป็นตัวกำหนดว่ารอยสัมผัสที่ได้เป็นรอยสัมผัสแบบข้อต่อตักหรืออัลลอย ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนนี้จึงทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส



รูปที่ 3.11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ริงตัวตรวจวัดแสงหลังการกัดที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อใช้เวลาในการซินเตอร์ริง 15 นาที

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างทั้งหมดจากนั้นจะนำชิ้นงานไปตัดแยกออกจากกัน แล้วนำมาเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงินมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.12 เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงต่อไป



รูปที่ 3.12 ตัวตรวจวัดแสงหลังการซินเตอร์ริงนำมาเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใดเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

บทนี้จะกล่าวถึงผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ชนิด $Al/n-Si/Al$ ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยแผ่นซิลิคอน ระบาย (100) สภาพต้านทาน $5-10 \Omega \cdot cm$ ความหนาของแผ่น $625 \mu m$ สารเคมีที่เลือกนำมาใช้ในการกัด คือ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) และกรดซิลิซิก (silicic acid) โดยมีวัตถุประสงค์ในการลดการกัดชั้นอะลูมิเนียม (Al) และซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ให้น้อยที่สุด เพื่อให้อะลูมิเนียมที่เป็นขั้วไฟฟ้ามีความสมบูรณ์ และเพื่อลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งจะสามารถประหยัดเวลาและต้นทุนในการผลิตของตัวอุปกรณ์ นอกเหนือจากนั้นต้องการสร้างให้พื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดมีลักษณะเป็นพีระมิดขนาดใหญ่ เพื่อใช้ในการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มากขึ้นซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพที่ดีของอุปกรณ์ชนิดพิเศษ ในการทดลองจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการศึกษาทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงและสารเคมีที่ใช้ในการกัด ส่วนที่สองการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง และส่วนสุดท้ายการเปรียบเทียบเงื่อนไขของสารละลายแต่ละชนิดที่ใช้ในการกัดตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

4.1 การศึกษาการกัดของสารละลายที่ใช้กัดในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาการใช้สารละลายที่นำมาเข้ากระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกให้เกิดเป็นร่องรูปตัวยู ในกระบวนการกัดพื้นผิวซิลิคอนจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการกัดกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดซิลิคอน ได้แก่ ประเภทของสารละลายที่ใช้ในการกัด เช่น สารละลาย KOH สารละลาย TMAH และสารละลาย NH_4OH รวมถึงความเข้มข้นของสารละลาย ระบายของแผ่นผลึก จุดบกพร่องของผลึก ชนิดของพาหะส่วนมากในแผ่นผลึก ความเป็นกรดต่าง การเติมแต่งสารเคมี การเตรียมสารละลาย การกวนสารละลาย อุณหภูมิและเวลาในการกัด เป็นต้น [32] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะต้องคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ โดยมีพารามิเตอร์ที่สำคัญที่สามารถควบคุมปัจจัยเหล่านี้ เพื่อให้ชิ้นงานที่ออกมาสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น จากการใช้สารละลาย TMAH จึงทำการกำหนดเงื่อนไขต่างๆ ซึ่งมีรายละเอียดข้อมูลอ้างอิงจากงานวิจัยที่ผ่านมาดังต่อไปนี้

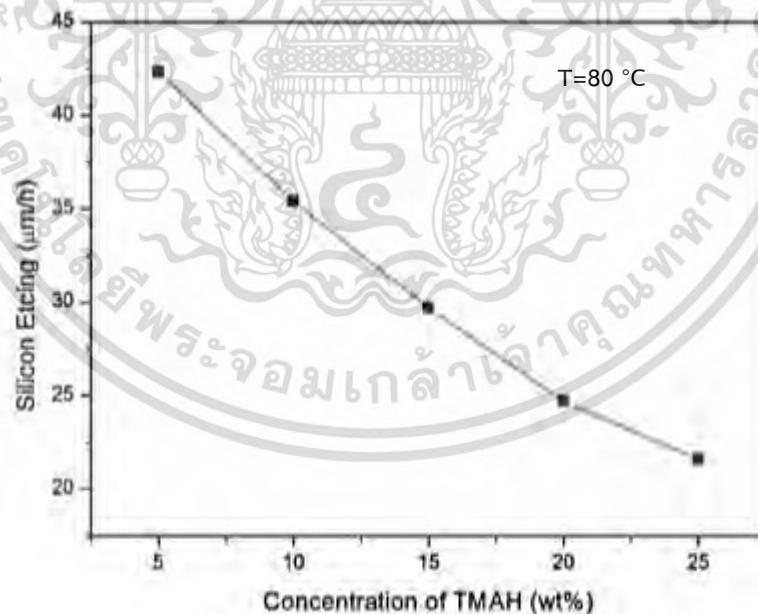
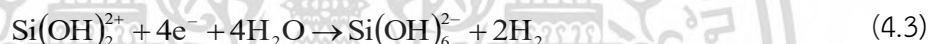
1. ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH

การทดสอบการกัดแผ่นซิลิคอนโดยจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ซึ่งในหัวข้อนี้ก็จะทำการกัดแผ่นซิลิคอนที่ความเข้มข้นของสารละลายต่างๆ ความเข้มข้นสารละลายตั้งแต่ 5 - 25 wt% เพื่อดูพื้นผิวซิลิคอนที่เกิดขึ้นหลังการกัด โดยใช้อุณหภูมิในการกัดอยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบในการกวนสารอยู่ที่ 200-250 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง เท่ากันทุกเงื่อนไข การกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt% นั้นจะมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อัตราการกัดน้อยกว่าสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เกิดจากไอออนไฮดรอกไซด์มีการแตกตัวน้อยเป็นผลให้ซิลิคอนที่หลุดออกจากผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนน้อยกว่า [9]

สำหรับการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ซึ่งสารละลายนี้มีส่วนประกอบของอนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH^-) อยู่ เมื่อทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะทำให้อะตอมหรืออนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH^-) เกิดการแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ยกระดับสถานะออกซิเดชันของซิลิคอนได้เป็น Si^+ และจับตัวกันทำให้ได้ $\text{Si}(\text{OH})_2^{2+}$ หรือ “ SiOH^{3-} ” เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์” และยังมีปฏิกิริยาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำ คือ ปฏิกิริยาแตกตัว (decomposition reaction) เกิดเป็นอะตอมของไฮโดรเจนไอออน (H^+) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ (OH^-) จะไปทำปฏิกิริยาการรวมตัว (combination reaction) กับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งก่อตัวขึ้นให้เกิดผลิตภัณฑ์ เรียกว่ากรดออร์โธซิลิก (Orthosilic acid) ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย [8] แสดงดังสมการที่ 4.1-4.3 เป็นปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) [48] ตามลำดับ

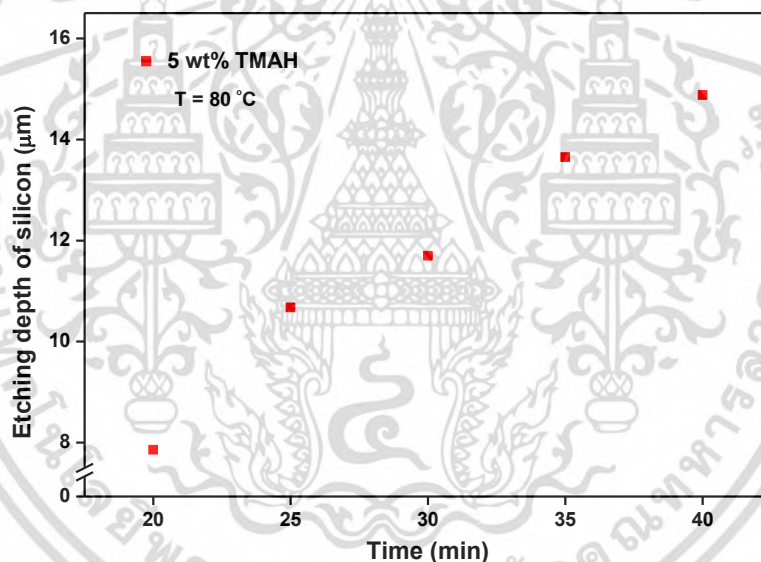


รูปที่ 4.1 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนกับความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ [9]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.1 [9] เป็นการกัดแผ่นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทดลอง เพื่อหาค่าความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด พบว่าเมื่อเติมน้ำในสารละลายมากขึ้น เพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH น้อยลง อัตราการกัดแผ่นซิลิคอนของสารละลายจะเริ่มเพิ่มขึ้น เนื่องจากไอออนไฮดรอกไซด์ที่เกิดจากแตกตัวของน้ำมีจำนวนมากขึ้นส่งผลกระทบให้การกัดแผ่นซิลิคอนเร็วขึ้น

ผลจากการทดลองนี้จะเห็นได้ว่าที่สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% มีความเหมาะสมที่นำมาทำการศึกษาและพัฒนาต่อจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ เนื่องจากการใช้ความเข้มข้นของสารละลายน้อยๆ ทำให้อัตราการกัดชิ้นงานเร็วขึ้นลดเวลาในการกัด และยังสามารถประหยัดปริมาณสารละลายให้น้อยลง และยังช่วยลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้ความเข้มข้นที่ 5 wt% ของสารละลาย TMAH มาทำการศึกษาหาความลึกของซิลิคอนตามเวลาในการกัดที่เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.2 โดยอุณหภูมิที่ใช้กัด 80 องศาเซลเซียส ความลึกที่ได้จากการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพด้วยเครื่อง Tencor P-10 surface profilometer



รูปที่ 4.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาหลังกัดซิลิคอนในระนาบ (100) ของสารละลาย TMAH 5 wt%

2. อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด

หัวข้อนี้กล่าวถึงอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองในการกัดของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 10 wt% นั้น แล้วทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการกัดโดยอุณหภูมิที่ใช้ คือ 40, 60 และ 80 องศาเซลเซียส โดยหน้าที่หลักของอุณหภูมิคือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในสารละลาย TMAH เพื่อให้มีการแตกตัวของไอออนไฮดรอกไซด์มากขึ้น ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้อุณหภูมิในการกัดที่ 80 องศาเซลเซียส เนื่องจากที่อุณหภูมิสูงจะทำให้การแตกตัวของที่ได้ไอออนไฮดรอกไซด์นั้นมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่อุณหภูมิต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

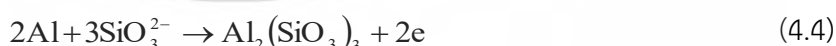
โดยที่ความลึกที่ได้นั้นจะแตกต่างกันเนื่องจากที่อุณหภูมิสูงย่อมมีอัตราการกัดมากกว่าอุณหภูมิต่ำ และพบว่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่มที่ดีที่สุด [8] และถ้าอุณหภูมิมากกว่า 80 องศาเซลเซียส สารละลาย TMAH ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กพลังงานยึดเหนี่ยวน้อยส่งผลให้การแตกตัวมากจะทำให้เกิดการระเหยของสารละลาย [35]

3. ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงความเร็วรอบในการกวนสารเพื่อศึกษาพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัด โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 10 wt% อุณหภูมิที่ใช้อยู่ที่ 80 องศาเซลเซียส ใช้เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง โดยจะทำการปรับรอบการหมุนในการกวนสารอยู่ที่ 100-400 รอบต่อนาที จากผลการทดลองพบว่าความเร็วรอบในการกวนสารที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนเกิดการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 200 รอบต่อนาที เนื่องจากการกระจายตัวของพีระมิดเกิดจากปฏิกิริยาการแพร่ในกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอน [9] ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ความเร็วรอบในการกวนสารละลาย TMAH ที่ 200 รอบต่อนาที โดยการปรับความเร็วรอบในการกวนสารนั้นจะเป็นการทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันทั้งระบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาการแพร่ของสารละลาย และความสม่ำเสมอของการเกิดพีระมิดแบบสุ่มด้วย

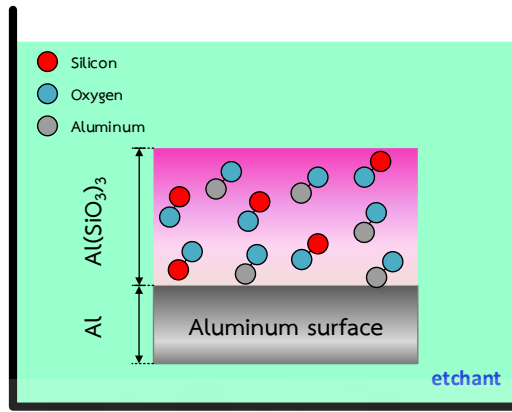
4.1.1 การศึกษาสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก

กระบวนการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกมีความสำคัญต่อการเกิดร่องรูปตัวยู ส่วนการเลือกใช้อะลูมิเนียมเป็นขั้วโลหะเนื่องจากหาได้โดยทั่วไป ราคาถูก และสามารถสร้างเป็นรอยสัมผัสแบบซีออตต์ก็ยได้ง่ายกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ชั้นอะลูมิเนียมจะถูกควบคุมด้วยสารละลายที่เป็นกรดและต่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงอะลูมิเนียมไม่สามารถคงอยู่ได้ [48] จึงต้องใช้ซิลิคอนไดออกไซด์เป็นชั้นป้องกันการกัด แต่ซิลิคอนไดออกไซด์สามารถป้องกันได้ในระดับหนึ่งก็จะถูกสารละลายกัดออกหมด ดังนั้นในงานวิจัยนี้ได้ทำการเลือกใช้กรดซิลิซิกเติมลงในสารละลาย TMAH เพื่อคงเหลือชั้นอะลูมิเนียมหรือลดปฏิกิริยาการกัดอะลูมิเนียมให้น้อยลง รวมถึงลักษณะการกัดของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) โดยผลจากการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ที่ลดลงนั้นสามารถอธิบายได้จากสมการต่อไปนี้



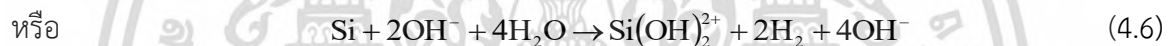
จากสมการที่ 4.4 เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดซิลิซิกและอะลูมิเนียม เนื่องจากการเติมซิลิเกต (SiO_3)₃ เข้าไปในระบบปฏิกิริยาสารเคมี จึงซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีนั้นคือ อะลูมิเนียมซิลิเกต $Al_2(SiO_3)_3$ โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมานี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการกัด ผลิตภัณฑ์ $Al_2(SiO_3)_3$ นี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนชั้นหน้าากป้องกันการกัดบนชั้นอะลูมิเนียมและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ [35] ส่งผลทำให้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ลดลงแสดงดังรูปที่ 4.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

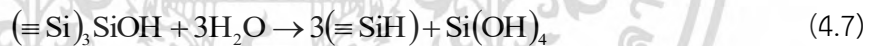


รูปที่ 4.3 แบบจำลองตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม

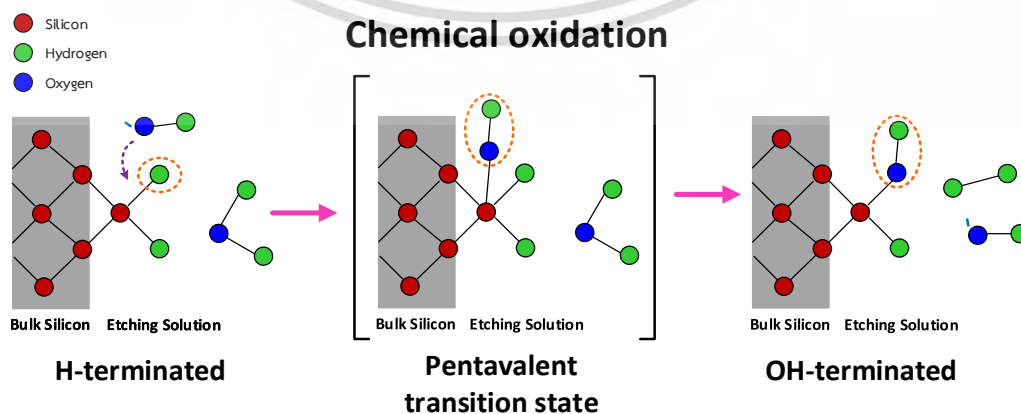
ปฏิกิริยาของสารละลาย TMAH ในระหว่างกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกจะเกิดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนจำนวนมากโดยสามารถทำปฏิกิริยากับไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) และโมเลกุลของน้ำ (H₂O) ดังสมการที่ 4.5-4.6



จากปฏิกิริยาในสมการที่ 4.5 จะได้ ((≡ Si)₃SiOH) ที่ยังคงทำปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำ (H₂O) อย่างต่อเนื่อง ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ คือ หมู่ไฮดรอกซิลของกรดซิลิซิก (Si(OH)₄) ดังสมการที่ 4.7



ในปฏิกิริยาข้างต้นจะเห็นได้ว่า ไฮดรอกซิลไอออน (OH⁻) จะทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งจะลดพลังงานกระตุ้นลง เพื่อใช้ในการทดแทนของไฮโดรเจน (H) และไฮดรอกไซด์ไอออนโดยโมเลกุลของน้ำเป็นตัวทำปฏิกิริยา ซึ่งจำนวนไฮดรอกไซด์ไอออนจะลดลงกลายเป็น Si(OH)₄ [35] และรวมตัวกับโมเลกุลของน้ำต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 4.4



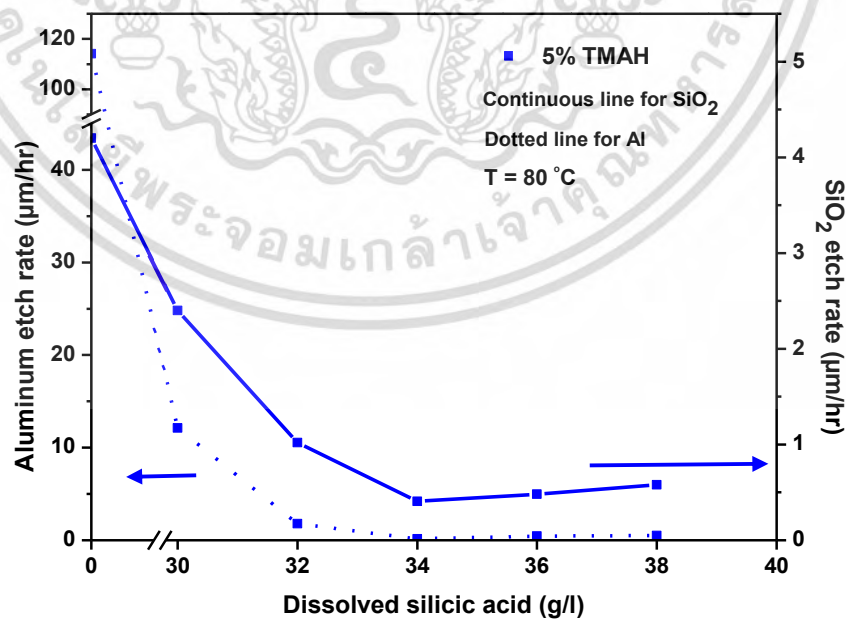
รูปที่ 4.4 แบบจำลองการเกิดปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนระนาบ (100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้เห็นได้เห็นประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.1.1 อัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์

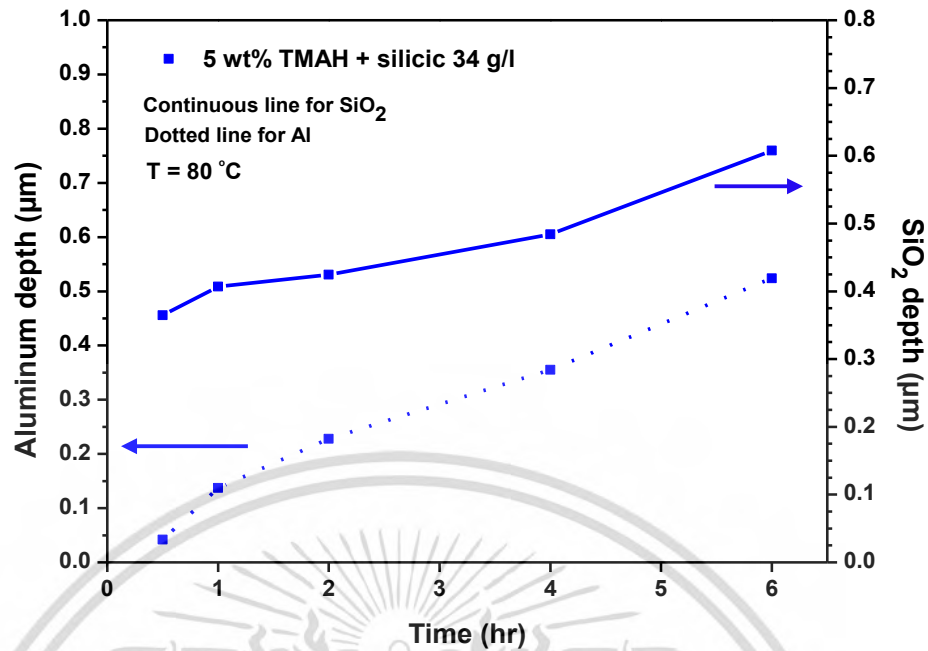
จากการศึกษาอัตราการกัดอะลูมิเนียม (Al) และอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จากปริมาณกรดซิลิซิกต่างๆ ที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 wt% ในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงแนวโน้มของอัตราการกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์กับปริมาณของกรดซิลิซิกที่ 30, 32, 34, 36 และ 38 g/l ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่สารละลาย TMAH 5 wt% ที่ไม่เติมกรดซิลิซิกมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์อย่างรวดเร็วอยู่ที่ 114.06 $\mu\text{m}/\text{h}$ และ 4.2 $\mu\text{m}/\text{h}$ ตามลำดับ ขณะที่เติมกรดซิลิซิกที่ความเข้มข้นต่างๆ ทำให้อัตราการกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์น้อยลง

เมื่อพิจารณาที่ปริมาณของกรดซิลิซิกที่ 34 g/l อัตราการกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์น้อยที่สุดเท่ากับ 0.14 $\mu\text{m}/\text{hr}$ และ 0.41 $\mu\text{m}/\text{hr}$ ตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณต่างๆของกรดซิลิซิกมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์มีค่าแตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด โดยเฉพาะที่ปริมาณกรดซิลิซิกที่ 34 g/l จะช่วยให้การกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ลดลงประมาณ 1,000 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย TMAH 5 wt% ที่ไม่เติมกรดซิลิซิก ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าการเติมกรดซิลิซิกปริมาณที่เหมาะสมลงในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นของ 5 wt% สามารถป้องกันการกัดของชั้นอะลูมิเนียมและชั้นออกไซด์เป็นอย่างมาก เนื่องจากการเติมกรดซิลิซิกนั้นเป็นการเติมตัวซิลิเกต (SiO_3) เข้าไปในระบบปฏิกิริยาของสารเคมี จึงทำให้เกิดเป็นผลิตภัณฑ์อะลูมิเนียมซิลิเกต $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$ โดยมีค่าน้อยกว่าไฮดรอกไซด์อะลูมิเนียมออกไซด์ ซึ่งอะลูมิเนียมซิลิเกตนี้เปรียบเสมือนเป็นหน้ากากป้องกันชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และชั้นอะลูมิเนียม [56] และทำให้เกิดปฏิกิริยาอื่นบนผิวหน้าของชั้นโลหะ หรือทำปฏิกิริยากับกรดที่เติมลงไปแทนการกัดอะลูมิเนียมและการกัดซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดอะลูมิเนียมและอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์

กับกรดซิลิซิกที่ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 5 wt% เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในเชิงวิชาการเท่านั้น เมื่อผู้ยูสเซอร์เห็นหน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์กับเวลาที่ใช้ในการกัดของสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l

จากรูปที่ 4.6 แสดงความลึกของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามเวลาที่ใช้ในการกัดของสารละลาย TMAH 5 wt% โดยการเติมกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l พบว่าความลึกของอะลูมิเนียมกับซิลิคอนไดออกไซด์ที่ได้มีลักษณะเป็นเชิงเส้น และมีแนวโน้มไปในทางเดียวกัน ความลึกของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ลึกมากขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการกัดเพิ่มขึ้น โดยความลึกของอะลูมิเนียมน้อยกว่าความลึกของซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่น้อยกว่าอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1 ถึง 8 เท่า

4.1.1.2 อัตราการกัดซิลิคอน

การออกแบบการทดลองกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนประกอบด้วยเวลาที่ใช้ในการกัด ซึ่งเป็นปัจจัยเชิงปริมาณของอัตราการกัด (etch rate: R) อัตราการกัดได้พิจารณาเป็นอัตราส่วนการสูญเสียมวลหรือความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด (material depth: h) ต่อเวลาในการกัด (etching time: t) หน่วยของอัตราการกัด คือ ความยาวต่อหน่วยของเวลา [6] ดังสมการความสัมพันธ์

$$R = \frac{h}{t} \quad (4.8)$$

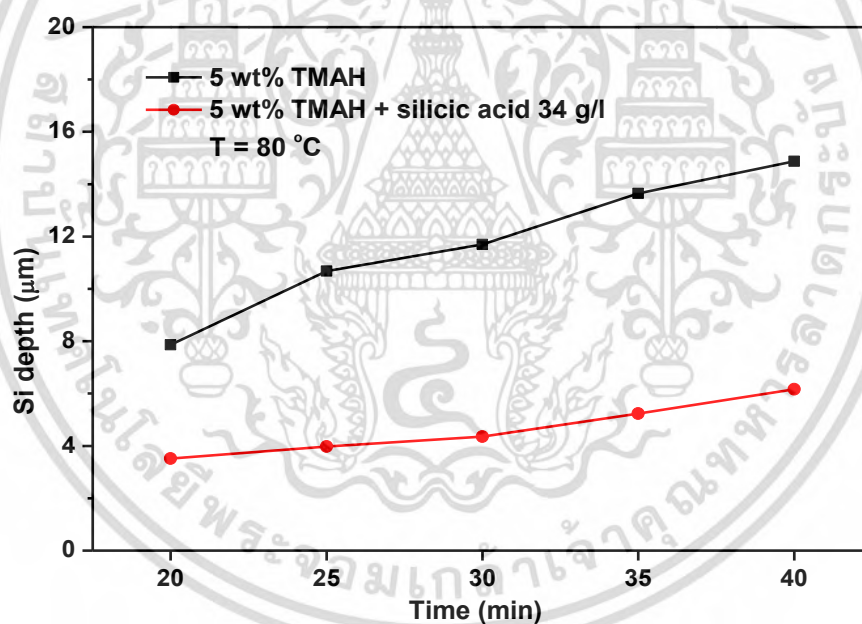
โดยที่ R คือ อัตราการกัดในแนวตั้งของซิลิคอน

h คือ ขนาดความลึกของแผ่นซิลิคอน

t คือ เวลาในการกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการตรวจสอบความลึกของพื้นผิวซิลิคอนจากเครื่อง Tencor P-10 surface profilometer โดยใช้ปลายวัดลากไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด จากนั้นเครื่องจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นค่าคุณสมบัติของพื้นผิว ทำให้เราสามารถวิเคราะห์หาความลึกของซิลิคอนหลังการกัดในเงื่อนไขสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% ที่ไม่มีการเติมกรดซิลิซิก และสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l อุณหภูมิที่ใช้กัด 80 องศาเซลเซียส จากการศึกษาความลึกของแผ่นซิลิคอนที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาที่ใช้กัด ในรูปที่ 4.7 และจากการคำนวณค่าอัตราการกัดซิลิคอนที่ได้ ดังสมการที่ 4.8 เงื่อนไขของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l มีค่าอัตราการกัดซิลิคอนเท่ากับ $0.15 \mu\text{m}/\text{min}$ ดังตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าผลที่ได้จากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ทำให้กัดซิลิคอนลดลง เนื่องจากการเติมกรดซิลิซิกเปรียบเสมือนการลดความเป็นด่างของสารละลายลง หรือค่า pH ต่ำกว่า 13 ทำให้ลดจำนวนไอออนไฮดรอกไซด์ที่แตกตัวกับโมเลกุลของน้ำน้อยลง รวมถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของซิลิคอนที่มีมาก จึงทำให้เกิดแยกตัวของพันธะ Si-Si ได้น้อย ดังนั้นการจับตัวระหว่างอะตอมซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) หรือการแทนที่โดยไฮโดรเจนไอออนข้าง เป็นผลทำให้การกัดซิลิคอนน้อยลง



รูปที่ 4.7 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับเวลาหลังกัดซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% และสารละลาย TMAH 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบอัตราการกัดซิลิคอนระหว่างสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% และสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5wt% เติมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l เวลาที่กัด 30 นาที

เงื่อนไขสารละลาย	อัตราการกัดซิลิคอน ($\mu\text{m}/\text{min}$)
สารละลาย TMAH 5 wt%	0.40
สารละลาย TMAH 5 wt% เติมกรดซิลิซิก 34 g/l	0.15

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก

จากผลการทดลองที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาอัตราการกัดซิลิคอน ซิลิคอนไดออกไซด์ และอะลูมิเนียม ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก เพื่อทำการดูพื้นผิวแผ่นซิลิคอนว่าเกิดเป็นพีระมิดหรือมีการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มเป็นลักษณะใด โดยนำพื้นผิวของซิลิคอนที่กัดลึกลงไปประมาณ $4\ \mu\text{m}$ เวลาที่ใช้ในการกัด 30 นาที สารละลายที่ใช้ในการกัด คือ สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt% และเติมด้วยกรดซิลิซิกที่ปริมาณ 34 g/l เนื่องจากสารละลายเงื่อนโซ่นี้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์น้อยที่สุด จึงเลือกเงื่อนโซของสารละลายนี้มาทำการศึกษาคือ สำหรับการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงเบื้องต้นนั้นจะตรวจสอบลักษณะพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

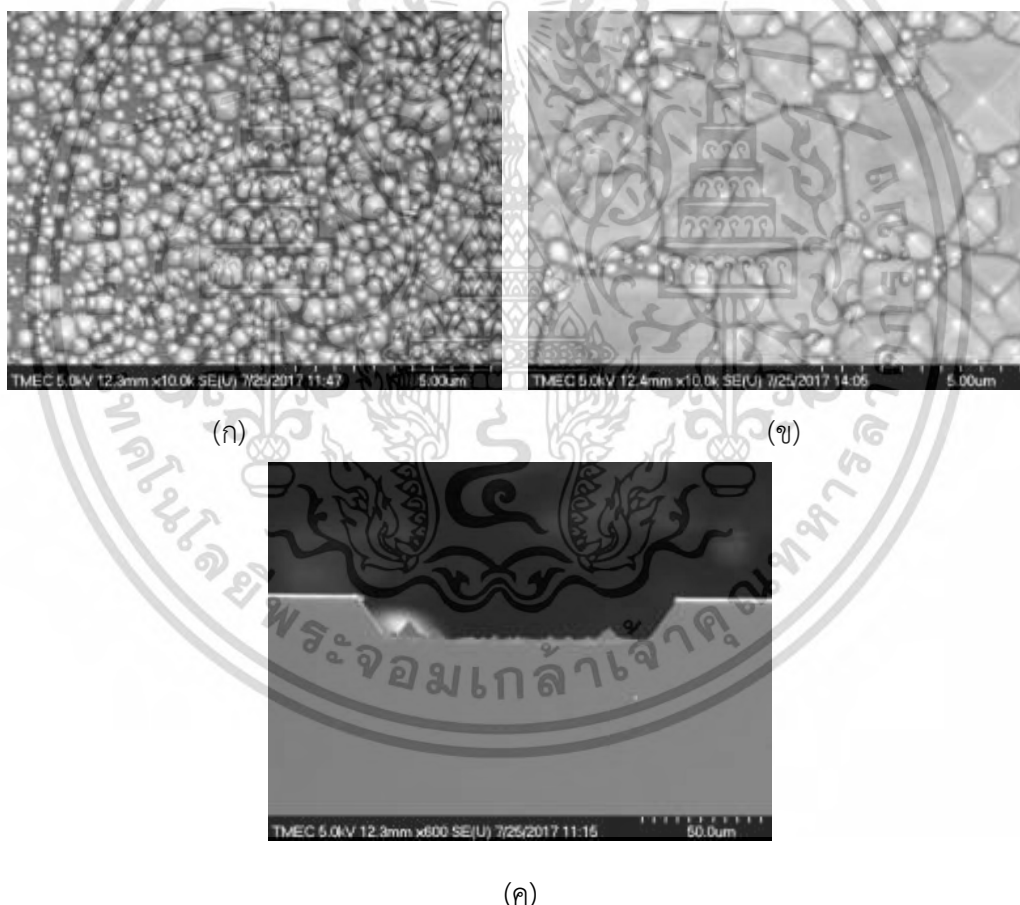


รูปที่ 4.8 พื้นผิวซิลิคอนหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% ที่เติมกรดซิลิซิก 34 g/l ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ที่กำลังขยาย 1,500 เท่า

จากรูปที่ 4.8 เป็นรูปพื้นผิวซิลิคอนหลังจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5 wt% ที่เติมกรดซิลิซิก 34 g/l ซึ่งจะเห็นว่ากรดซิลิซิกที่เติมลงไปนั้นทำให้ผิวหน้าของซิลิคอนมีค่าความขรุขระมาก ขนาดของฐานพีระมิดโดยประมาณเท่ากับ $3-4\ \mu\text{m}$ การเกิดพีระมิดที่ซ้อนเหลื่อมเป็นจำนวนมากและการกระจายตัวของขนาดพีระมิดแบบสุ่มบนผิวหน้าซิลิคอนที่ค่อนข้างใหญ่ เนื่องจากสารที่เกิดจากกรดซิลิซิกที่ทำให้ฟองไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นไม่หลุดออกจากผิวหน้าหรือหลุดน้อยลงจึงเกิดเป็นรูปทรงพีระมิด

4.2.1 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยเทคนิค SEM ของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก

จากผลการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงเงื่อนไขสารละลายที่นำมาทำการศึกษาต่อโดยเลือกใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% ไม่ได้เติมด้วยกรดซิลิซิก ในงานวิจัยนี้จะเรียกว่า “สารละลาย TMAH pure¹” และใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l หรือเรียกว่า “สารละลาย TMAH doped silicic acid²” ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง โดยใช้อุณหภูมิในการกัดที่ 80 องศาเซลเซียส และความเร็วโดยรอบ 200 รอบต่อนาที ซึ่งสารละลายที่ใช้กัดนี้จะทำปฏิกิริยาในการเลือกกัดแผ่นซิลิคอนที่ระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) มีลักษณะโครงสร้างเป็นแบบร่องรูปตัวยู จากการตรวจสอบพื้นผิวซิลิคอนจะเห็นได้ว่ามีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม ได้จากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด 5.0 kV ที่กำลังขยาย 5,000 เท่า (รูปที่ 4.9 (ค)) และ 10,000 เท่า ((รูปที่ 4.9 (ก) และ(ข))

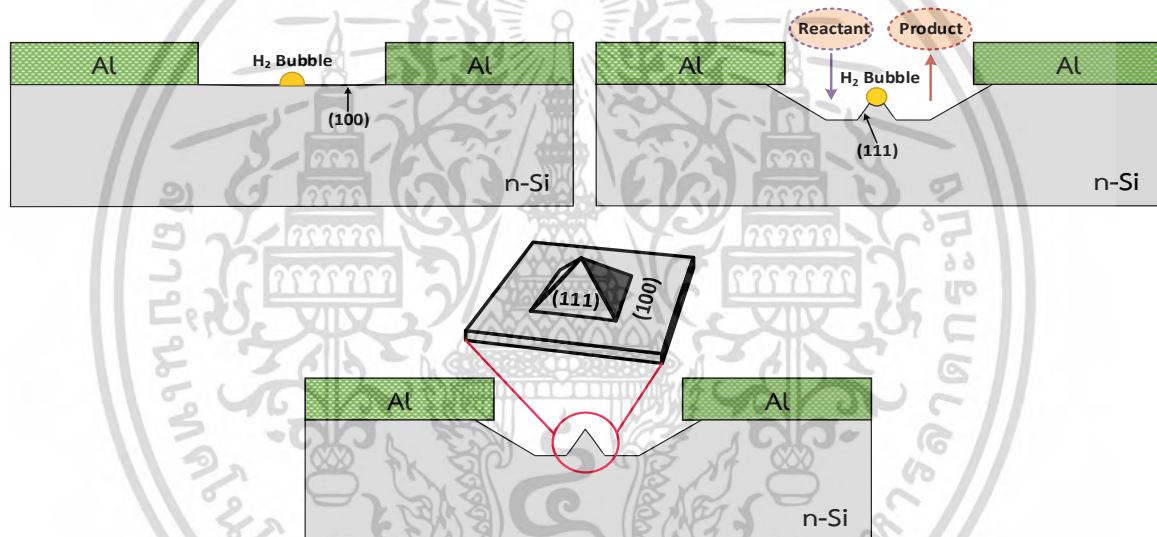


รูปที่ 4.9 ภาพถ่าย SEM ของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ของตัวตรวจวัดแสง ที่อุณหภูมิ 80 °C
(ก) สารละลาย TMAH pure (ข) สารละลาย TMAH doped silicic acid
และ (ค) ภาพตัดขวางบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าสารละลาย TMAH doped silicic acid

¹ สารละลาย TMAH pure หมายถึง สารละลาย TMAH ที่ไม่มีการเติมกรดซิลิซิก

² สารละลาย TMAH doped silicic acid หมายถึง การเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ไม่ว่าจะกรณีใดก็ตาม อีกทั้งยังมีให้ข้อมูลเกี่ยวกับราคา และต้องอ้างอิงถึงราคาของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
การใช้จ่ายว่า doped เป็นคำที่อ้างอิงมาจากบทความต่างประเทศ

จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 10,000 เท่า ของสารละลาย TMAH pure และสารละลาย TMAH doped silicic acid จากรูปที่ 4.9 (ก) พบว่าที่สารละลาย TMAH pure มีค่าเฉลี่ยขนาดฐานของพีระมิดแบบสุ่มประมาณ 0.5 μm และการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มน้อยกว่าสารละลาย TMAH doped silicic acid ที่มีค่าเฉลี่ยขนาดฐานพีระมิดเท่ากับประมาณ 4 μm ในรูปที่ 4.9 (ข) ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนจะมีความหนาแน่นของพีระมิดที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากเมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย TMAH pure จะเห็นได้ว่าผิวหน้าของซิลิคอนที่บริเวณพื้นที่รับแสงมีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาในการกัดที่มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ปัจจัยหนึ่งนี้อาจเกิดจากทิศทางการกัดไม่เท่ากัน ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย และการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่ม ซึ่งเกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.9 [49] และในรูปที่ 4.9 (ค) เป็นลักษณะการกัดแผ่นซิลิคอนระนาบ (100) แบบแอนไอโซโทรปิกระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมทั้งสอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเลือกกัดแผ่นซิลิคอนที่ระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111)



รูปที่ 4.10 ภาพจำลองเกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าซิลิคอนระนาบ (100)

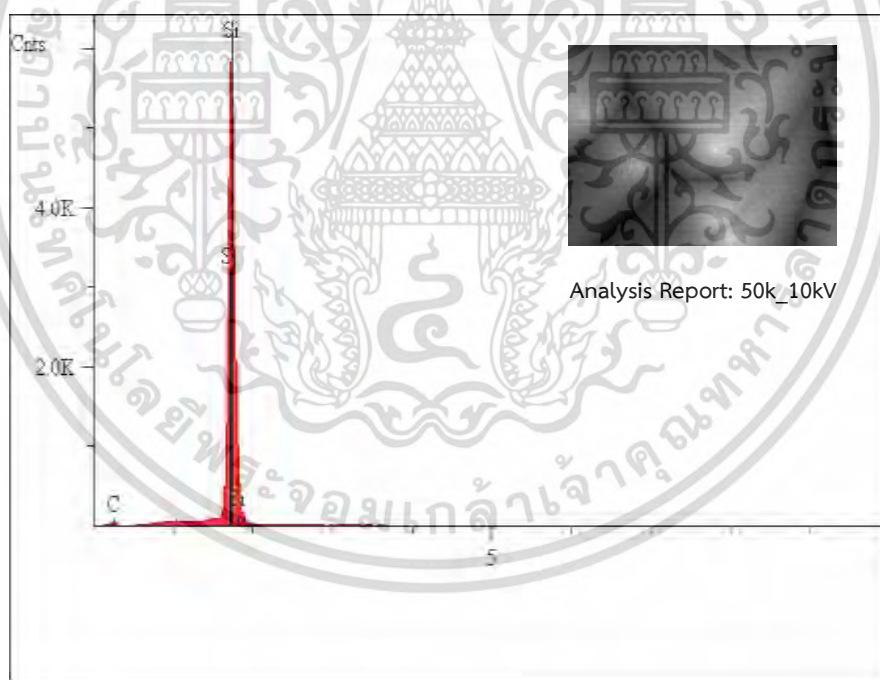
เมื่อพิจารณาขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดที่เกิดขึ้นสำหรับเงื่อนไขของสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิกนั้น โดยวิเคราะห์จากปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการกัด เมื่อสารละลายกัดไปพบจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนก็จะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลายที่จะทำให้ได้อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน [50] โดยอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนนี้จะไปจับตัวกับอะตอมของซิลิคอนจะทำให้เกิดสารใหม่ที่เรียกว่า กรดออร์โธซิลิก โดยกรดออร์โธซิลิกนี้จะแตกตัวเพื่อรวมกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ฟองก๊าซไฮโดรเจนเปรียบเสมือนหน้ากากป้องกันในการกัดของสารละลาย [49] จนทำให้เกิดพีระมิดขึ้นมาได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าสารใหม่ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีการกัดนั้นรวมกับกรดซิลิซิกที่เติมเพิ่มไปนั้นซึ่งเป็นสารเคมีตัวเดียวกันจึงทำให้เกิดจำนวนของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อขนาดใหญ่และการกระจายตัวของพีระมิดมากขึ้นเช่นกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของบริเวณผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสง

แบบร่องรูปตัวยู

จากผลการวิเคราะห์ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบในธาตุจากพลังงานของรังสีเอ็กซ์ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารเคมีบนเนื้อซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสง โดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-ray Spectrometer: EDX) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.11 พบว่าบริเวณบนพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยความเข้มข้นของธาตุหลัก คือ ซิลิคอน (Si) เท่ากับ 1,974.22 c/s และคาร์บอน (C) เท่ากับ 7.70 c/s จะเห็นได้ว่าบนพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดนั้นไม่พบสารเคมีที่ใช้กัดตกค้างในบริเวณผิวซิลิคอน ซึ่งผลที่ได้จะเป็นการยืนยันได้ว่าการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ไม่มีการคงค้างของประจุโลหะหรือสารเคมี ซึ่งสามารถการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูร่วมกับกระบวนการสร้างซีมอส (CMOS) หรือร่วมกับวงจรรวมได้ ด้วยการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH แทนการใช้สารละลายที่อาจทิ้งโลหะอัลคาไลน์ (alkali metal) ตัวอย่างของสารละลายในกลุ่มอัลคาไลน์ (alkaline) เช่น ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น [51]

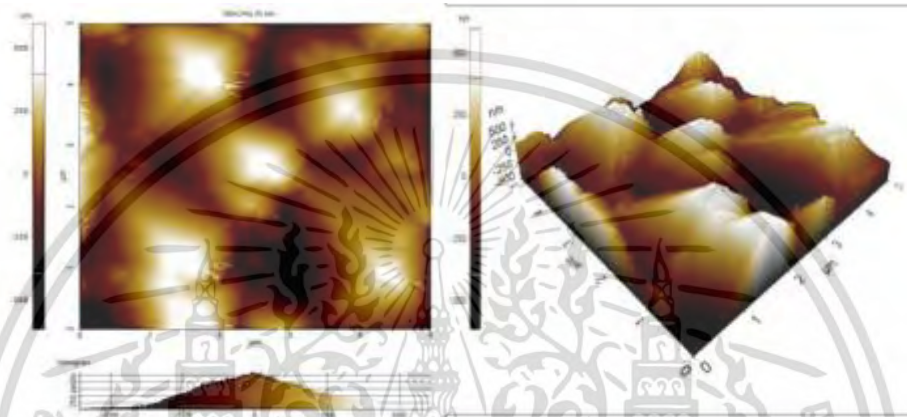


รูปที่ 4.11 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid (TMAH 5 wt% และ silicic acid 34 g/l) อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.3 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนความขรุขระด้วยเทคนิค AFM ของบริเวณผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

การวิเคราะห์ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscopy: AFM) โดยใช้การสัมผัสพื้นผิวโดยให้หัววัด (Probe) ที่มีปลายแหลมเล็กสัมผัสกับพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสง ในขณะที่สแกนบนพื้นผิวซิลิคอนถูกนำมาแปรเป็นสัญญาณและประมวลผลด้วยคอมพิวเตอร์ เพื่อนำมาสร้างเป็นสามมิติของพื้นผิวที่กำลังขยายสูงไปแสดงบนจอภาพ (Monitor)



รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (AFM) ที่บริเวณผิวหน้าของซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส

จากการวิเคราะห์ผลของค่าความขรุขระพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัด ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 4.12 โดยใช้สารละลาย TMAH doped silicic acid ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่มีความเหมาะสมที่นำมาใช้กัด เนื่องจากมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์น้อยที่สุด พบว่าลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดเกิดพีระมิดแบบสุ่มจำนวนมากบนพื้นผิวของซิลิคอนและมีความขรุขระพื้นผิวซิลิคอนที่สูง เนื่องจากการกัดเซาะร่องใต้จุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนจึงช้ากว่าการกัดผิวในแนวตั้ง หรือระนาบ (100) จึงเป็นเหตุผลอย่างหนึ่งที่ทำให้พีระมิดมีขนาดใหญ่ และค่าความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนทั้งการวัดแบบเฉลี่ยและแบบโดยขนาด ดังแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดแต่ละเงื่อนไข

พารามิเตอร์ของการวัด	สารละลาย TMAH doped silicic acid
ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต: R_a^1 (nm)	161.318
ความขรุขระผิวเฉลี่ยกำลังสอง: R_q^2 (nm)	201.780
ความขรุขระผิวขนาดโดยเฉลี่ย: R_z^3 (nm)	1201.205

¹ R_a คือ ค่าความขรุขระด้วยค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดค่า เฉลี่ยความสูง เฉพาะส่วนที่นูนขึ้นมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่สามารถให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

² R_q คือ ค่าที่แสดงถึงลักษณะพื้นผิวโดยรวม ซึ่งคำนวณจากทั้งส่วนที่นูนขึ้นมา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมีเหตุดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

³ R_z คือ ค่าความขรุขระพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม

4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบและร่องรูปตัวยู

การทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ (MSM) และแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ชนิด Al/n-Si/Al ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 80 μm และมีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่ (A) เท่ากับ 1 mm^2 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง (ยังไม่ได้บรรจุลงบนตัวถัง) แบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดจากตัวตรวจวัดแสง และในขณะที่มีแสงตกกระทบที่ความเข้มต่างๆ ซึ่งในส่วนของความเข้มแสงนั้นมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ 5000 lux ถึง 25000 lux เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการตรวจวัดแสงสำหรับการวัดลักษณะทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกล่องป้องกันแสงจากภายนอก (dark box) โดยจะป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบโฟโตไดโอด เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

(ก) เครื่องมือแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้า

(ข) เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งอยู่ภายในกล่องป้องกันแสง

4.3.1 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

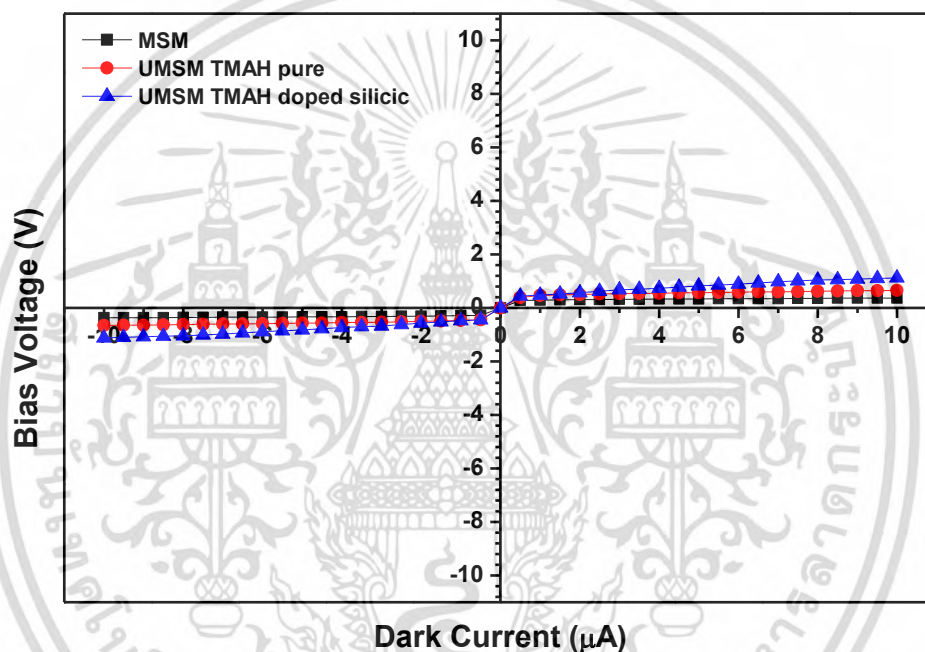
ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงทั้งโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่มีขั้วโลหะที่สร้างจากโลหะชนิดเดียวกัน คือ อะลูมิเนียม (Al) ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงในขณะสมมูล จะมีโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะสมมาตรกัน เนื่องจากความสูงกำแพงศักย์ซีกต่อซีก กำแพงศักย์ภายใน และความกว้างบริเวณปลอดพาหะของขั้วแคโทด และขั้วแอโนด มีขนาดเท่ากัน

เมื่อมีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยให้ขั้วโลหะอีกด้านได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และขั้วโลหะด้านหนึ่งได้รับไบอัสตรง โดยขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้ จะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะ ข้ามกำแพงศักย์ซีกต่อซีกไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่ว หรือเรียกว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง มีทิศทางจากด้านสาร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{sm}) ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดการเกิดกระแสมืดในตัวตรวจวัดแสงได้ คือ กำแพงศักย์ข้อต่อตึกย โดยทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนจากด้านโลหะไหลข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำได้ โดยง่าย ซึ่งค่าความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อตึกยนั้นสามารถกำหนดได้จากชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสัมผัสกัน และขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสง

เมื่อนำตัวตรวจวัดแสงหลังการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที มาทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V ในการทดสอบตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น และทำการจ่ายแรงดันไบอัสขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง



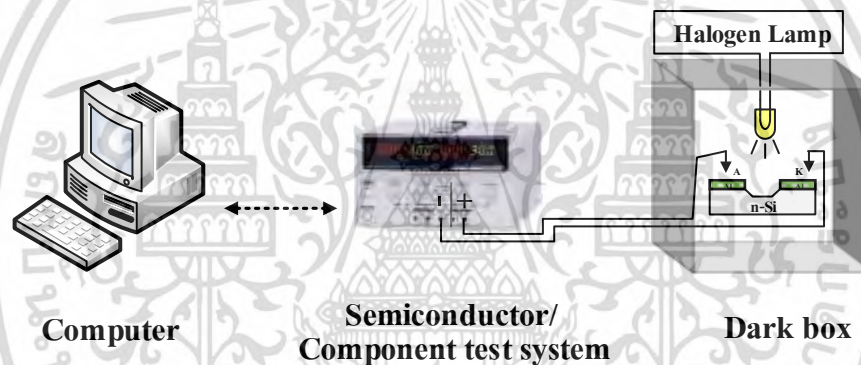
รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) และแบบเชิงราบ (MSM) ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากรูปที่ 4.14 พบว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันไบอัส 10 V กระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบเท่ากับ 0.37 μA ในขณะที่ตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ของสารละลาย TMAH pure และสารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่ากระแสรั่วไหลเท่ากับ 0.66 μA และ 1.12 μA ตามลำดับ สังเกตได้ว่าตัวตรวจวัดแสงทั้งสองแบบมีค่ากระแสรั่วไหลอยู่ในช่วงต่ำกว่า 2 μA เนื่องจากทำการซินเตอร์ริงให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงที่ความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_{bn}) มีค่าสูงขึ้นประมาณ 0.72 eV [7] เป็นผลมาจากขั้วไฟฟ้าโลหะที่เป็นอะลูมิเนียมมีค่าจุดหลอมเหลวต่ำประมาณ 660 องศาเซลเซียส โดยจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมนี้เป็นช่วงอุณหภูมิที่ทำให้อะลูมิเนียมสามารถแพร่ลงเข้าสู่เนื้อซิลิคอนชนิดเอ็นได้ ดังนั้นบริเวณรอยสัมผัสที่มีลักษณะเป็นอัลลอย (alloy) ส่งผลให้รอยสัมผัสเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความสมบูรณ์ เมื่อพิจารณาตรวจวัดแสงแบบเชิงราบนั้นพบว่ามีความกระแสรั่วไหลน้อยกว่ากระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่สารละลาย TMAH pure ประมาณ 1.8 เท่า และน้อยกว่ากระแสรั่วไหลของสารละลาย TMAH doped silicic acid ประมาณ 3 เท่า กระแสรั่วไหลของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่สูงกว่าแบบเชิงราบอาจมีสาเหตุจากความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่มีจำนวนของพีระมิดมากกว่า

4.3.2 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงตกกระทบ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ เพื่อที่จะศึกษาลักษณะการตอบสนองทางแสงกระแสตรง (สัญญาณแบบ Direct current: DC) ที่มีความเข้มแสงแตกต่างกัน และทำการศึกษาผลของกระแสแสง (Photocurrent: I_{photo}) ที่เปลี่ยนแปลงไป โดยจะใช้แหล่งกำเนิดจากหลอดฮาโลเจน (halogen lamp) จะทำการวัดที่แรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง 10 V ดังแผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง A/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู

โดยเมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับการไบอัส เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และเมื่อมีแสงกระทบบริเวณปลอดพาหะส่งผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโนด ในขณะที่โฮลเคลื่อนที่ในทิศทางสวนทิศสนามไฟฟ้า ไปยังขั้วแคโทด การเคลื่อนที่ของโฮลนี้ก่อให้เกิดกระแสโฟโตไดโอดขึ้น ส่งผลให้มีกระแสไหลออกไปยังอุปกรณ์อื่นภายในวงจรต่อไป โดยค่ากระแสแสงหรือกระแสโฟโตไดโอดสามารถหาได้จากสมการที่ 4.9

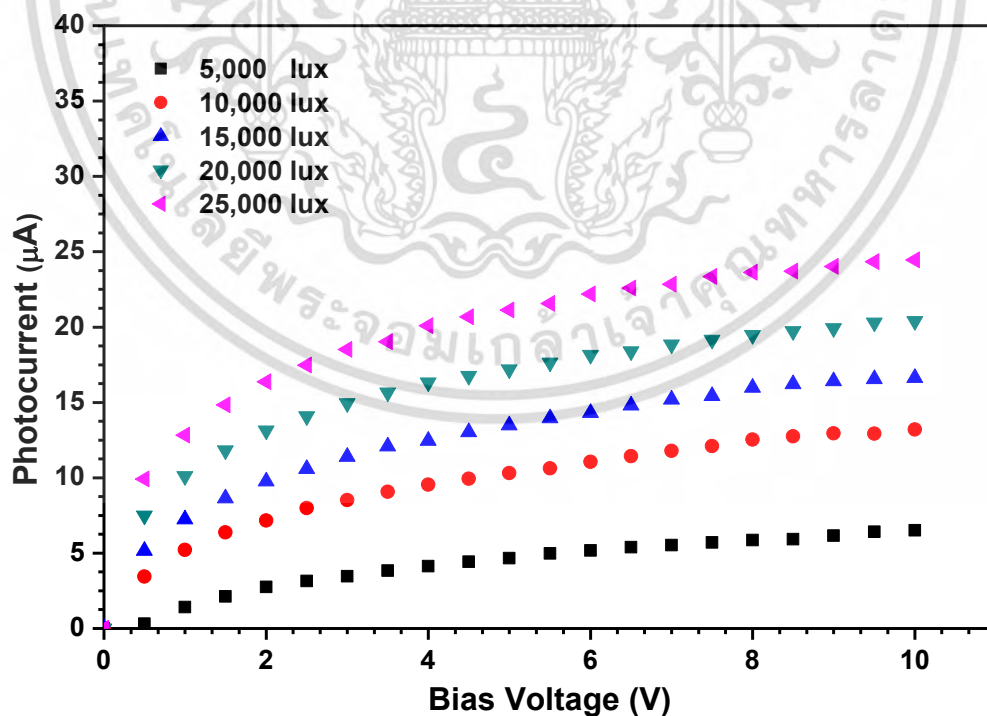
$$I_{photo} = I_{mea} - I_{dark} \quad (4.9)$$

โดยที่ I_{mea} คือ กระแสรวมที่วัดได้จากการทดลอง

I_{dark} คือ กระแสรั่วไหล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

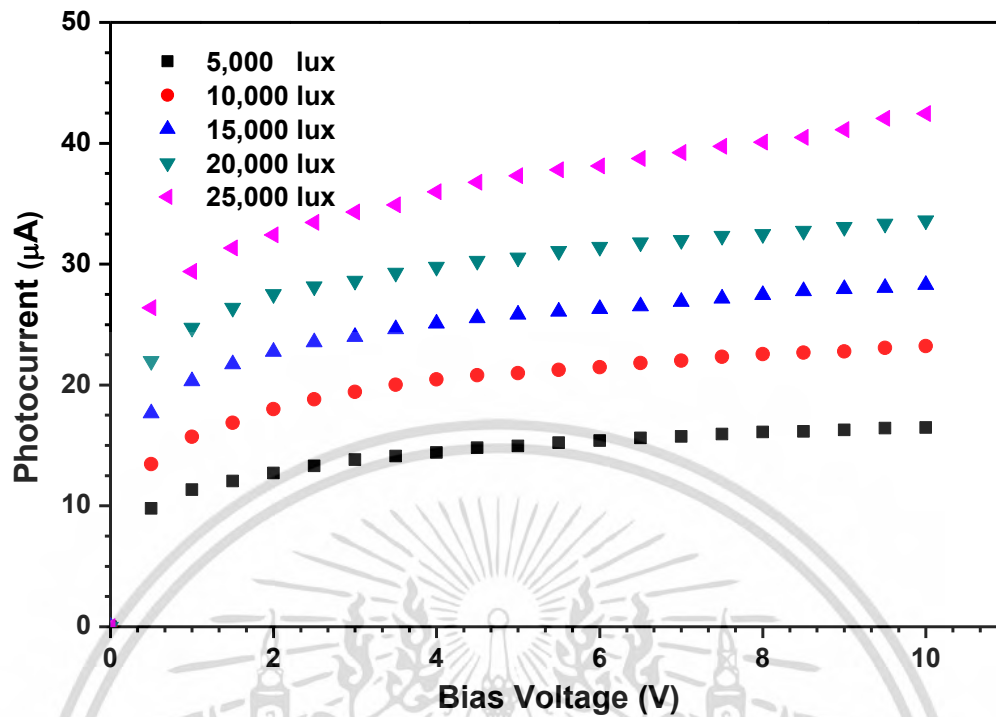
จากผลการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบ ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 5,000 lux ถึง 25,000 lux ป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง 10 V ที่กำหนด ความลึกในการกัดอยู่ในช่วง 4-5 μm ในรูปที่ 4.16 - 4.18 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยการกัดด้วยสารละลาย TMAH pure และสารละลาย TMAH doped silicic acid จะพบว่ากระแสแสงที่เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูในสารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่ามากที่สุดนั้น เนื่องมาจากตัวตรวจวัดแสงในเงื่อนไขนี้มีพื้นผิวซิลิคอนเป็นพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู ซึ่งเป็นปัจจัยในการเพิ่มพื้นที่รับแสงอีกส่วนหนึ่ง เมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณภายในร่องรูปตัวยูบนพื้นผิวพีระมิดจะเกิดภาวะแสงสะท้อน โดยแสงที่สะท้อนออกมาจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของพื้นผิวนั้นคือ แสงที่ตกกระทบผิวของพีระมิดด้านหนึ่งจะมีการสะท้อนไปยังผิวของพีระมิดอีกด้านหนึ่ง ซึ่งจะทำให้แสงที่สะท้อนออกไปนั้นมีน้อยลงหรือลดการสูญเสียแสงจากสะท้อนกลับที่ผิว ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าการสร้างพีระมิดภายในร่องรูปตัวยูนั้นจะสามารถลดปริมาณการสะท้อนและเพิ่มการดูดกลืนแสงส่งผลโดยตรงต่อค่ากระแสแสงที่เพิ่มขึ้นของตัวตรวจวัดแสงนั่นเอง อย่างไรก็ตามตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดี จะเห็นได้ว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบ่งเป็นระดับๆ ตามแรงดันไบอัสและความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น ซึ่งความเข้มแสงเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่า ทำให้กระแสแสงมีการเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าด้วยเช่นกัน โดยลักษณะกระแสแสงที่ได้นั้นมีความสมมาตรเช่นเดียวกับกรณีกระแสมืดในหัวข้อก่อนหน้า



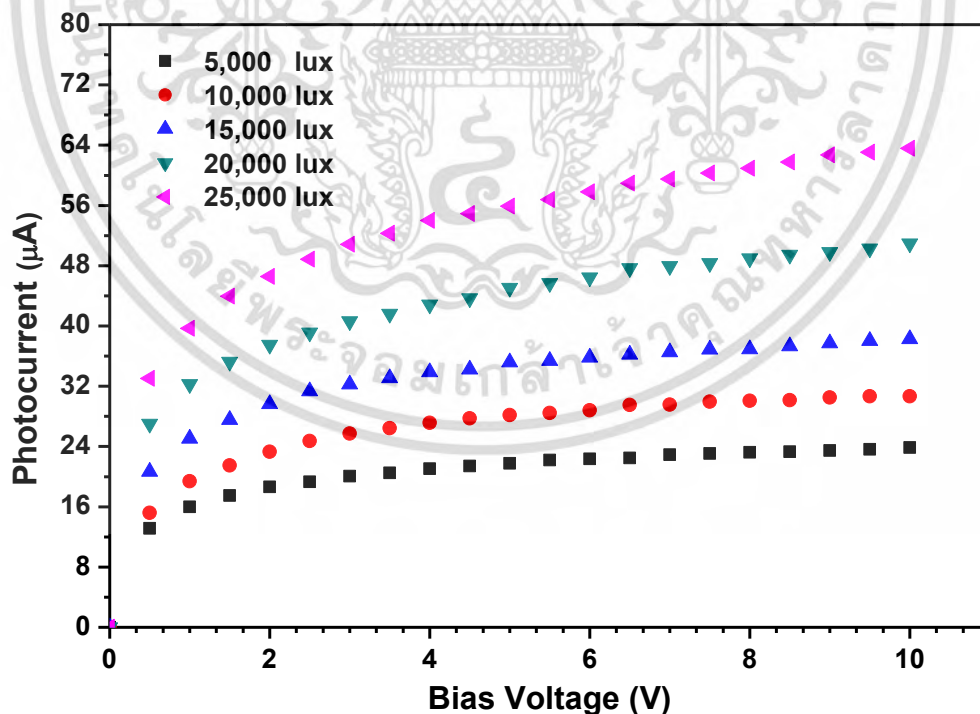
รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ (MSM)

ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

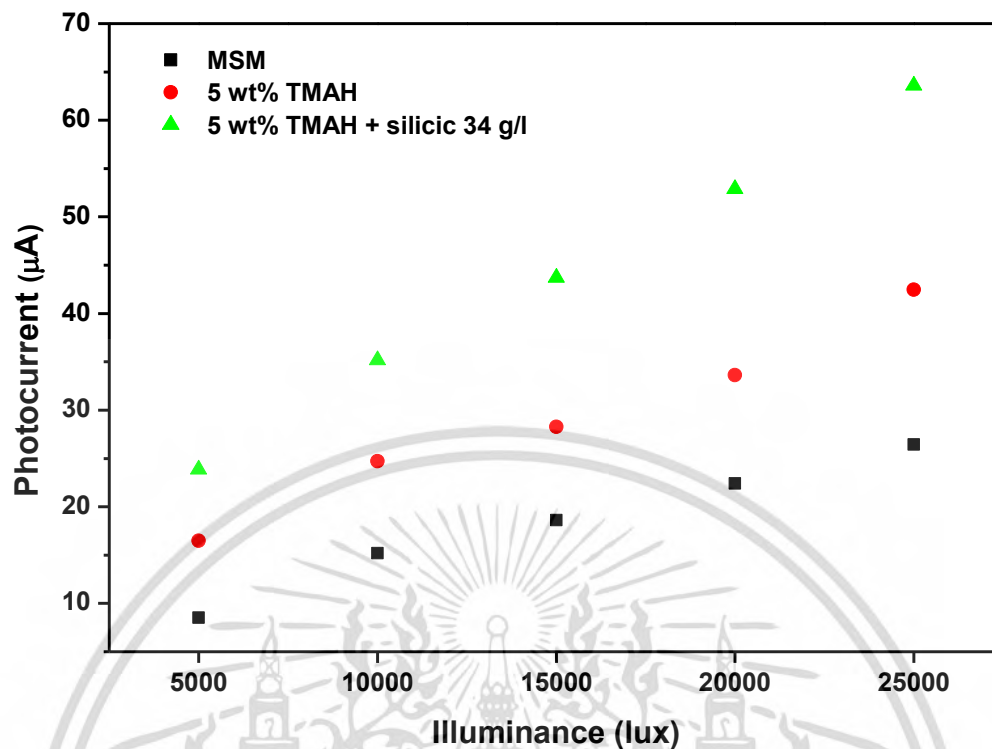


รูปที่ 4.17 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้สารละลาย TMAH pure



รูปที่ 4.18 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้สารละลาย TMAH doped silicic acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับความเข้มแสงต่างๆ ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) และแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่สารละลาย TMAH pure และสารละลาย TMAH doped silicic acid ขณะได้รับแสงตกกระทบ

จากรูปที่ 4.19 กระแสและความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลง ที่แรงดันไบอัส 10 V พบว่ากระแสแสงมีค่าสูงขึ้น เมื่อทำการเพิ่มความเข้มแสงมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลที่มากขึ้น จนทำให้เกิดกระแสแสงที่สูงขึ้น จะเห็นได้ว่ากระแสแสงของโครงสร้างแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยมีลักษณะเป็นเชิงเส้น ค่ากระแสแสงสูงสุดของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ที่สารละลาย TMAH doped silicic acid เท่ากับ 63.60 μA ซึ่งมากกว่ากระแสแสงของสารละลาย TMAH pure เท่ากับ 42.45 μA อยู่ที่ประมาณ 1.5 เท่า และมีค่ากระแสแสงสูงกว่ากระแสแสงของโครงสร้างแบบเชิงราบเท่ากับ 24.45 μA อยู่ที่ 2.6 เท่า ค่ากระแสแสงที่ก่ได้ด้วยสารละลาย TMAH เดิมกรดซิลิซิกมีมากกว่าสารละลาย TMAH ที่ไม่มีการเติมกรดซิลิซิกและมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบนั้น เนื่องจากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ทำให้อัตราการกักตออะลูมิเนียมลดลง ส่งผลให้ชั้นอะลูมิเนียมมีความสมบูรณ์ และอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือ ลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนเป็นพีระมิดแบบสุ่มที่มีความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนมาก ซึ่งเป็นผลทำให้เพิ่มพื้นที่รับแสงภายในร่องรูปตัวยู โดยจะทำให้แสงที่ตกกระทบบริเวณพื้นที่รับแสงทำมุมหักเหของแสงส่วนหนึ่งเข้าไปในส่วนของบริเวณปลอดภัยมากขึ้น จึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อค่ากระแสแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่ก่ได้ด้วยสารละลาย TMAH เดิมกรดซิลิซิกมากกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ก่ได้ด้วยสารละลาย TMAH ที่ไม่เติมกรดซิลิซิกและโครงสร้างแบบเชิงราบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ในแต่ละสารละลายที่ใช้กัด

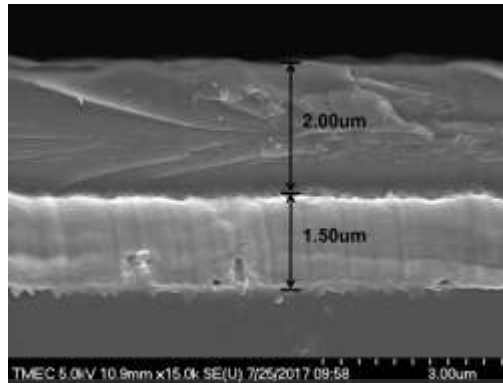
ในหัวข้อนี้เป็นการเปรียบเทียบสารละลายที่ใช้กัดที่มีผลโดยตรงต่อตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเงื่อนไขของสารละลายที่ดีที่สุดในการนำมาเปรียบเทียบนั้นเป็นงานวิจัยที่ทำผ่านมาก่อนหน้านี้ ในการเปรียบเทียบจะแบ่งออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสง วิเคราะห์เกี่ยวกับการกัดของซิลิคอน และอะลูมิเนียม โดยมุ่งเน้นการลดการกัดของอะลูมิเนียม เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงที่ทำให้อะลูมิเนียมเป็นขั้วไฟฟ้าที่สมบูรณ์เงื่อนไขที่นำมาเปรียบเทียบในการวิเคราะห์นี้ คือ สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เติมผงซิลิคอนปริมาณ 37.5 g/l [6] ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอเรียกว่า “สารละลาย TMAH doped Si powder” และทำการวิเคราะห์ที่พื้นผิวซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู เพิ่มพื้นที่รับแสงให้แก่ตัวตรวจวัดแสง สำหรับเงื่อนไขของสารละลายที่นำมาเปรียบเทียบ คือ สารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 wt% [8] ในวิทยานิพนธ์นี้จะขอเรียกว่า “สารละลาย KOH” และในส่วนที่สองเป็นลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากการสร้างพีระมิดภายในร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสง โดยนำเงื่อนไขของสารละลาย KOH มาทำการเปรียบเทียบ ซึ่งมีรายละเอียดในหัวข้อต่อไป

4.4.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

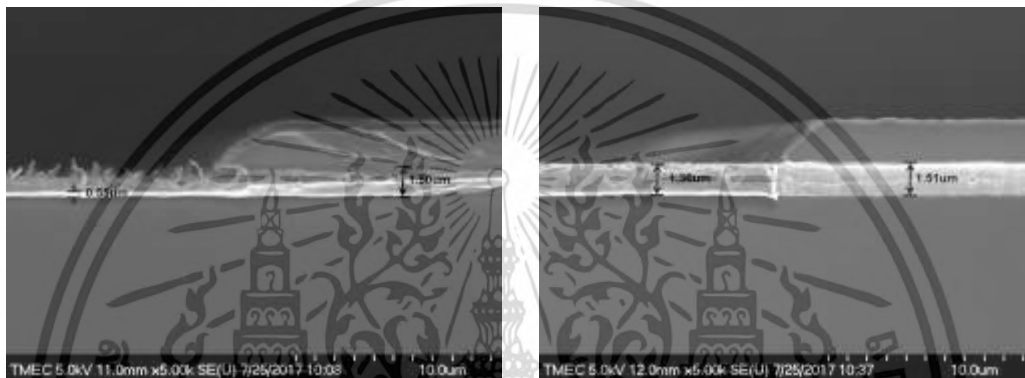
4.4.1.1 การวิเคราะห์การกัดซิลิคอน และอะลูมิเนียม

การศึกษาอัตราการกัดอะลูมิเนียม จากการพิจารณาโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งสามารถบอกถึงชั้นอะลูมิเนียมที่ถูกกัดลึกลงไป ในรูปที่ 4.20 เป็นภาพตัดขวางของชั้นอะลูมิเนียม หลังจากการกัดด้วยเงื่อนไขที่แตกต่างกัน อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด 80 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองเมื่ออ้างอิงจากชั้นอะลูมิเนียมที่ไม่ถูกสารละลายกัด ดังแสดงในรูปที่ 4.20 (ก) พบว่าสารละลาย TMAH pure ที่เวลาในการกัด 30 วินาที และสารละลาย TMAH doped silicic acid ที่เวลาในการกัด 1 ชั่วโมง มีการกัดชั้นอะลูมิเนียมลึกลงไปประมาณ 0.95 μm (รูปที่ 4.20 (ข)) และ 0.15 μm (รูปที่ 4.20 (ค)) ตามลำดับ

การทดลองนี้เป็นการศึกษาอัตราการกัดซิลิคอนและอะลูมิเนียมของชิ้นงาน โดยเปรียบเทียบระหว่างการใช้สารละลาย TMAH ที่ไม่เติมและเติมกรดซิลิซิก และการใช้สารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอน จากผลการทดลองพบว่าสารละลาย TMAH pure มีอัตราการกัดซิลิคอนและอะลูมิเนียมมากที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิกหรือเติมด้วยผงซิลิคอน เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่สูง ทำให้จำนวนไอออนไฮดรอกไซด์ของสารละลาย TMAH ที่มากทำให้เกิดปฏิกิริยากับซิลิคอนและอะลูมิเนียมโดยตรง จึงทำให้กัดซิลิคอนและอะลูมิเนียมได้เร็วขึ้น และเมื่อทำการเติมกรดซิลิซิกและผงซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH พบว่าอัตราการกัดทั้งซิลิคอนและอะลูมิเนียมมีค่าลดลง เนื่องจากไฮดรอกไซด์ในสารละลาย TMAH ส่วนมากจะทำปฏิกิริยากับกรดซิลิซิกและผงซิลิคอนที่เติมลงไปมากกว่าการกัดซิลิคอนและอะลูมิเนียม จึงส่งผลให้กัดซิลิคอนและอะลูมิเนียมช้าลง



(ก)



(ข)

(ค)

รูปที่ 4.20 ภาพตัดขวาง SEM ของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ซึ่งถูกกัดที่อุณหภูมิ 80 °C

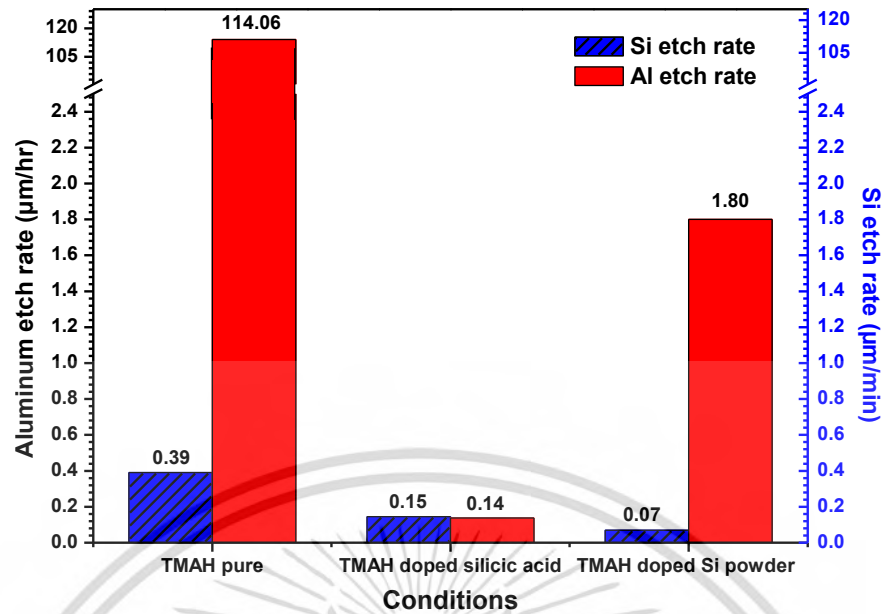
(ก) แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นก่อนการกัด

(ข) สารละลาย TMAH pure เวลาที่ใช้กัด 30 วินาที

(ค) สารละลาย TMAH doped silicic acid เวลาที่ใช้กัด 1 ชั่วโมง

เมื่อเปรียบเทียบการกัดซิลิคอนและอะลูมิเนียมระหว่างสารละลาย TMAH doped silicic acid และสารละลาย TMAH doped Si powder ดังแสดงในรูปที่ 4.21 จะเห็นได้ว่าในสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิกนั้น ทำให้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมน้อยกว่าการเติมด้วยผงซิลิคอนประมาณ 12.86 เท่า เนื่องจากกรดซิลิซิกมีความเป็นกรดมากกว่าผงซิลิคอนเมื่อจับตัวกับไฮดรอกไซด์ของสารละลาย TMAH ทำให้ไอออนไฮดรอกไซด์ลดลง ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ลดลงจึงเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้ลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมได้มากกว่า โดยที่การเติมผงซิลิคอนในสารละลาย TMAH มีอัตราการกัดซิลิคอนน้อยกว่าการเติมด้วยกรดซิลิซิกประมาณ 2.14 เท่า จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าจุดเด่นของการเติมกรดซิลิซิก คือ ใช้ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย TMAH (5 wt%) น้อยกว่าการเติมด้วยผงซิลิคอนที่ใช้ปริมาณความเข้มข้นสารละลาย TMAH (8.3 wt%) [6] ซึ่งลดการกัดอะลูมิเนียม และสามารถกัดซิลิคอนได้เร็วกว่าอีกด้วย ดังนั้นการเติมกรดซิลิซิกจึงมีความเหมาะสมที่นำมาใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงต่อไป

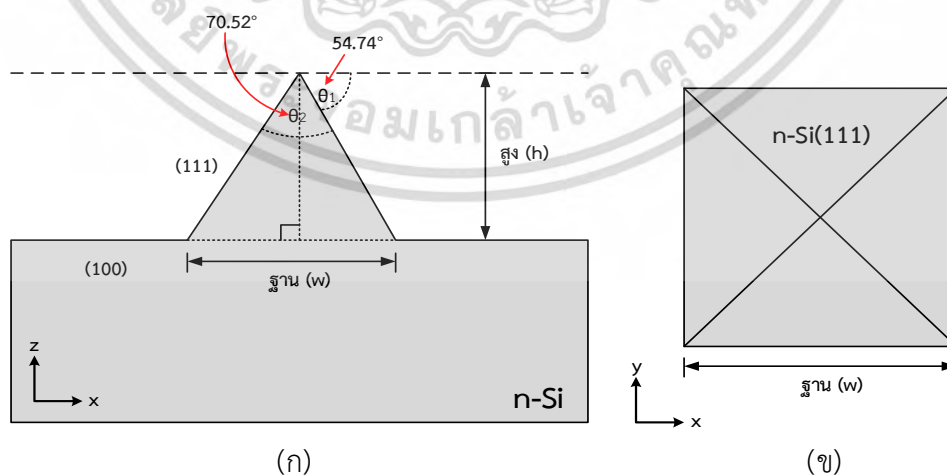
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.21 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอนกับเงื่อนไขสารละลายที่ใช้กัด

4.4.1.2 ลักษณะพีระมิดแบบส้อมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอน

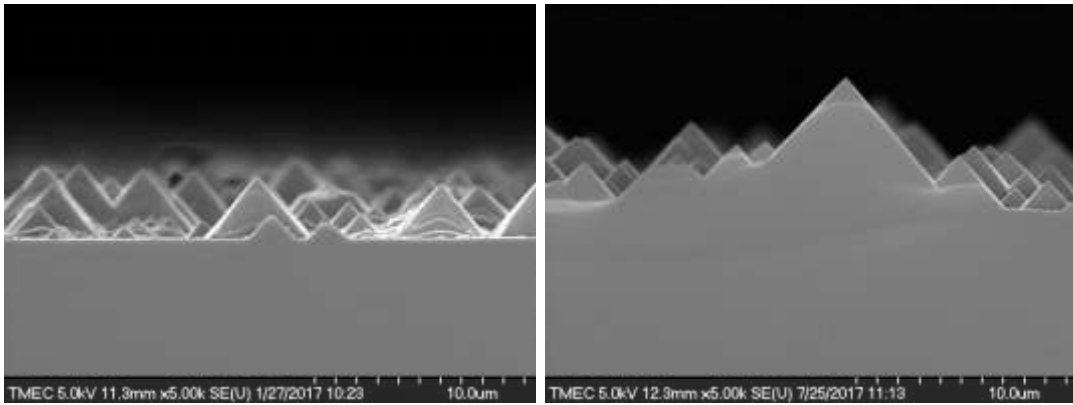
การศึกษาลักษณะพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้เงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดแตกต่างกัน ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในกระบวนการกัดให้เหมือนกัน คือ ใช้เครื่องกวนสารละลายหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด 80 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนจากความสูงของพีระมิดที่เกิดขึ้น ซึ่งจะสัมพันธ์กับความกว้างของฐานพีระมิด ดังแสดงในรูปที่ 4.22 เป็นภาพจำลองลักษณะพีระมิดแบบส้อมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก



รูปที่ 4.22 ภาพจำลองลักษณะพีระมิดแบบส้อมที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัด

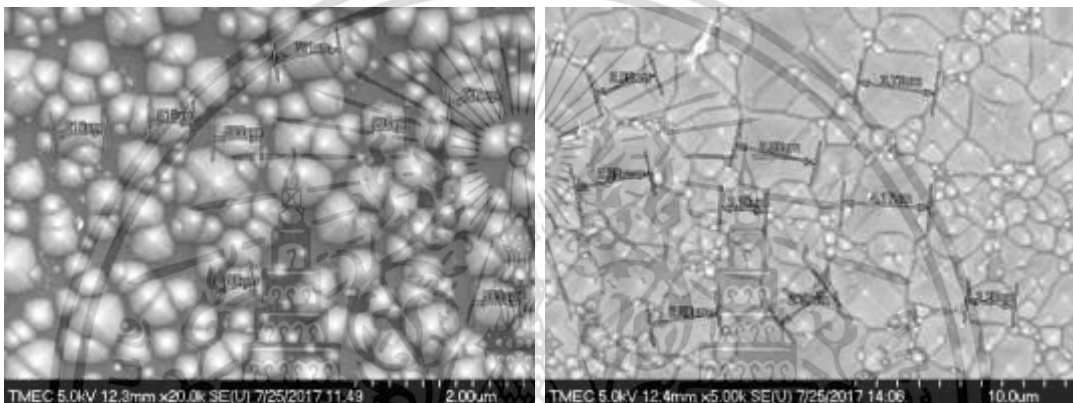
แบบแอนไอโซทรอปิก (ก) ภาคตัดขวางของพีระมิด และ (ข) ภาพด้านบนพีระมิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



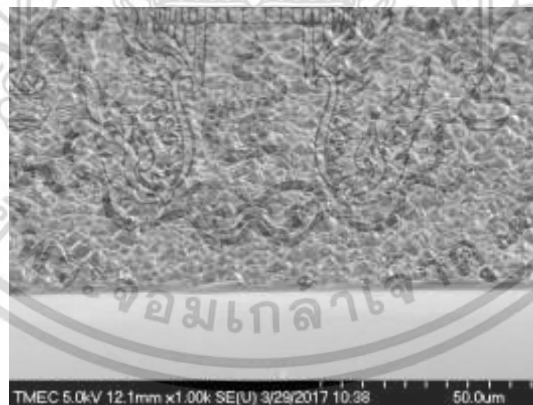
(ก)

(ข)



(ค)

(ง)



(จ)

รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของการเกิดพริมาตรของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัด

(ก) ภาพตัดขวางพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH [8]

(ข) ภาพตัดขวางพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid

(ค) ขนาดฐานพริมาตรของพื้นผิวซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย TMAH pure

(ง) ขนาดฐานพริมาตรของพื้นผิวซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid

(จ) ลักษณะพริมาตรของพื้นผิวซิลิคอนกัดด้วยสารละลาย KOH [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลการทดลองพบว่าลักษณะพื้นผิวหลังการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH doped silicic acid ในรูปที่ 4.23 (ง) พื้นผิวที่มีพีระมิดขนาดใหญ่และความหนาแน่นของพีระมิดแบบสุ่มจำนวนมากและมีความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนสูง เนื่องจากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ทำให้พื้นผิวของซิลิคอนเกิดความขรุขระจากการเติมกรดซิลิซิกเข้าไปในระบบการกัดซึ่งไปรวมกับกรดกรดออร์โธซิลิกที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาการกัดทำให้มีปริมาณการแตกตัวรวมกับโมเลกุลน้ำส่งผลให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมาเกาะอยู่บนพื้นผิวซิลิคอนมากขึ้น [52] เมื่อเปรียบเทียบกับ การกัดด้วยสารละลาย TMAH pure ในรูปที่ 4.23 (ค) พบว่าลักษณะการเกิดพีระมิดแบบสุ่มมีการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอ โดยไม่สามารถควบคุมขนาดและความขรุขระของพีระมิดได้ ขณะที่พื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย KOH จะเห็นได้ว่าความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่เกิดขึ้นมีรูปร่างของฐานพีระมิดที่แน่ชัด ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการกัดและปฏิกิริยาของไอออนโพแทสเซียมในสารละลาย KOH ดังแสดงในรูปที่ 4.23 (จ)

จากรูปที่ 4.23 แสดงภาพตัดขวางและขนาดความกว้างฐานของพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัด พบว่าที่สารละลาย TMAH pure และสารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่าเฉลี่ยขนาดฐานพีระมิดเท่ากับ $0.60 \mu\text{m}$ และ $3.88 \mu\text{m}$ (54.7 องศา) ตามลำดับ และข้อมูลงานวิจัยที่ผ่านมาของสารละลาย KOH ที่นำมาเปรียบเทียบมีค่าขนาดฐานพีระมิดเท่ากับ $4.60 \mu\text{m}$ (45 องศา) จากค่าขนาดฐานพีระมิดที่ได้นั้น เราสามารถคำนวณหาค่าความสูงของพีระมิดได้จากความสัมพันธ์ ดังสมการที่ 4.10

$$h = \left(\frac{w}{2}\right) \tan \theta_1 \quad (4.10)$$

$$h = \left(\frac{3.88}{2}\right) \tan(54.74^\circ)$$

$$h = 2.73 \mu\text{m}$$

เมื่อ h คือ ความสูงของพีระมิด (μm)

w คือ ฐานพีระมิด (μm)

θ_1 คือ มุมจากการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเท่ากับ 54.74 องศา

จากตารางที่ 4.3 ค่าเฉลี่ยฐานและค่าเฉลี่ยความสูงของพีระมิดแบบสุ่มของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ที่ความลึกของซิลิคอนประมาณ 4-4.6 μm ซึ่งพบว่าที่สารละลาย TMAH pure พื้นผิวซิลิคอนมีค่าเฉลี่ยความสูงของพีระมิดเท่ากับ $0.42 \mu\text{m}$ โดยสารละลาย TMAH doped silicic acid พื้นผิวซิลิคอนมีค่าเฉลี่ยความสูงของพีระมิดเท่ากับ $2.73 \mu\text{m}$ ซึ่งมีค่ามากกว่าสารละลาย KOH ($2.34 \mu\text{m}$) [8] ประมาณ 1 เท่า จะเห็นได้ว่าการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH จะเอกลักษณะนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ช่วยทำให้เพิ่มความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับที่ไม่มีการเติมกรดซิลิซิก เนื่องจาก การแตกตัวของฟองก๊าซไฮโดรเจนขนาดใหญ่ ที่เกิดมาจากปฏิกิริยาในการแตกตัวของน้ำจึงทำให้เกิด พีระมิดแบบสุ่มขนาดใหญ่ขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอน

ตารางที่ 4.3 การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยฐานและค่าเฉลี่ยความสูงของพีระมิดแบบสุ่มของพื้นผิวซิลิคอน หลังการกัดสารละลายแต่ละเงื่อนไข ที่ความลึกประมาณ 4-4.6 μm

เงื่อนไขสารละลาย	ความลึก ซิลิคอน (μm)	ค่าเฉลี่ยขนาด ฐานของพีระมิด (μm)	ค่าเฉลี่ยความสูง ของพีระมิด (μm)	เวลาใน การกัด (นาที)
TMAH pure	4.5	0.60	0.42	7
TMAH doped silicic acid	4.0	3.88	2.73	30
KOH [8]	4.6	4.60	2.34	4

4.4.1.3 ความแตกต่างของสารละลายที่ใช้กัด

จากการงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งมีวัตถุประสงค์ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง คือ การสร้างตัวตรวจวัดแสงให้โครงสร้างมีลักษณะเป็นร่อง รูปตัวยู (U-shaped) ระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม และการกัดเนื้อซิลิคอนให้เพิ่มจำนวนพีระมิดของ ภายในร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงส่งผลโดยตรงต่อค่ากระแสแสง (photocurrent) ให้มากขึ้น และ เพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง โดยใช้สารละลาย KOH ต่อมาได้ทำการศึกษาสารละลาย TMAH ที่มีลักษณะการกัดเช่นเดียวกัน แต่ลดผลกระทบข้างเคียงบางส่วนของอุปกรณ์ลง ดังรายละเอียดของ สารละลายต่อไปนี้

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ในสารละลายที่มี ไฮดรอกไซด์โลหะอัลคาไล (Alkali hydroxide etchants) ละลายน้ำได้สารละลายเบสแก่ เมื่อเป็นไอออน จะมีประจุบวก มีจุดเดือดและจุดหลอมเหลวต่ำ มีความหนาแน่นต่ำเมื่อเทียบกับโลหะอื่นๆ มีเวเลนซ์ อิเล็กตรอนเท่ากับหนึ่ง เป็นสารละลายเป็นพิษน้อย มีราคาที่ถูกและนิยมใช้กันแพร่หลาย การกัดซิลิคอน จะใช้ความเป็นต่างไฮดรอกไซด์ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่สูงและการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกระดับสูง โดย เลือกกัดที่ระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับ [53] ในการผลิตจะกำหนดและ ควบคุมการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ ส่วนพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะเป็นลักษณะขรุขระ แต่สารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ไม่สามารถนำมาใช้ในงานจำพวก MOS หรือ CMOS เนื่องจากพบไอออนของต่าง บางส่วนที่ตกค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุซึ่งเป็นไอออนของโพแทสเซียม (K^+) เมื่อนำอุปกรณ์ไปใช้งานภายใต้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทรานซิสเตอร์ MOS และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของแรงดันขีดเริ่ม กระแสรั่วไหล การกัดกร่อนโลหะ อะลูมิเนียมอย่างรวดเร็ว และเสถียรภาพการทำงานโดยรวมของอุปกรณ์ [6]

สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นสารละลายที่ประกอบด้วย แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide etchants) ในปัจจุบันนิยมนำไปใช้ในกระบวนการสร้าง IC เป็นการพัฒนาของ positive photoresist อัตราการกัดซิลิคอนนั้นอยู่ในระดับปานกลาง สารละลาย TMAH เหมาะสำหรับการใช้งานจำพวก MOS หรือ CMOS [30] เพราะไม่มีพวกไอออนของต่างตกค้างบนพื้นผิวของวัสดุ ถ้าเจือสารละลายอื่นเพื่อทำการลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมจะช่วยให้ อะลูมิเนียมยังคงอยู่หรือสร้างชั้นป้องกันการกัดในส่วนที่ต้องการไว้ สารละลาย TMAH จะมีอัตราการกัด ระบาย (111) ของ SiO_2 และ Si_3N_4 ต่ำมากสามารถใช้ SiO_2 และ Si_3N_4 เพื่อป้องกันการกัดได้ ลักษณะพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะมีความขรุขระอยู่ในระดับปานกลางเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกัดแบบอื่นๆทั่วไป [54]

ตารางที่ 4.4 การเปรียบเทียบลักษณะสมบัติเฉพาะของสารละลาย EDP KOH และ TMAH [19]

Etchant	Si etch rate at 80°C ($\mu\text{m}/\text{min}$):	SiO_2 selectivity:	Al selectivity:	Relative Safety:	CMOS Comp:
EDP	1.2	High	Yes	Low	Yes
KOH	2	Low	Low	High	No
TMAH	0.8	High	Yes	High	Yes

ตารางที่ 4.5 องค์ประกอบของธาตุที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวซิลิคอน หลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid

ธาตุ	ความเข้มของพีค (c/s)
คาร์บอน	7.70
ซิลิคอน	1,974.22

จากการทดลองเมื่อนำตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุนบนพื้นผิวซิลิคอนจากเทคนิค EDX ดังแสดงในตารางที่ 4.5 พบว่า ธาตุที่ปรากฏอยู่บนผิวซิลิคอนนั้นมีเพียง คาร์บอน และซิลิคอนเท่านั้น ผลที่ได้จากการวัดด้วยเทคนิค EDX จะเป็นข้อมูลหนึ่งที่ยืนยันได้ว่าการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมกรดซิลิซิกนั้นไม่มีไอออนของต่างหรือ สารปนเปื้อนตกค้างบนพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย KOH จะมีไอออนของโพแทสเซียม (K^+) [55] ที่เป็นประจุบวกบางส่วนตกค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ สอดคล้องการข้อมูลอ้างอิง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ข้างต้น ถึงแม้ว่าไอออนโพแทสเซียมในสารละลายจะไม่เกี่ยวข้องโดยตรงกับปฏิกิริยาการกัด แต่มีผลกระทบโดยตรงต่อสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในกระบวนการผลิตวงจรรวม โดยสังเกตจากข้อมูลอ้างอิงในตารางที่ 4.4 [19] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเพิ่มจุดเด่นของงานวิจัยคือ ใช้สารละลายที่ใช้ในการกัดสามารถใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตวงจรรวม (IC) และ MEMs ได้ ดังนั้นในการทดลองต่อไปจะนำการใช้สารละลาย TMAH doped silicic acid มาทำเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยู และนำไปทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าโดยคาดว่าจะมีค่ากระแสรั่วที่น้อยกว่า และกระแสแสงที่มากกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับเงื่อนไขสารละลาย KOH

4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

4.4.2.1 ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยูในเงื่อนไขของสารละลายที่ต่างกัน เพื่อทำการสร้างพื้นผิวพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู ในการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง -10 V จากตารางที่ 4.6 เป็นการเปรียบเทียบค่ากระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) และแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) โดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิก และสารละลาย KOH เมื่อใช้แรงดันไบอัส 10 V โดยจะเห็นได้ว่าค่ากระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบมีค่าน้อยที่สุด และตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid พบว่ากระแสรั่วไหลมีค่าน้อยกว่าสารละลาย KOH ประมาณ 1.14 เท่า ซึ่งค่ากระแสรั่วไหลของสารละลาย KOH ที่สูงกว่านั้นอาจเกิดสาเหตุจากสารตกค้างของสารละลาย KOH เนื่องจากเป็นกระบวนการกัดแบบเปียกจึงทำให้เกิดการทิ้งประจุของโพแทสเซียมอยู่บนผิวของซิลิคอน [8] ซึ่งแตกต่างจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ไม่ทิ้งประจุตกค้างไว้บนพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสง โดยสอดคล้องผลการทดลองที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุบนผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคสเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน (EDX)

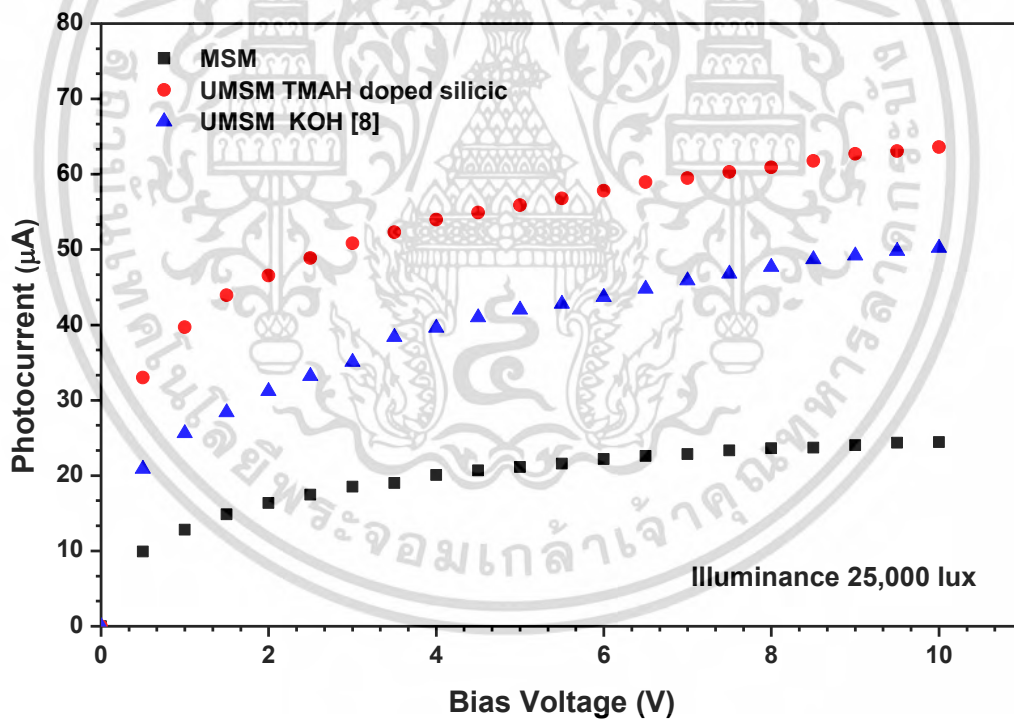
ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ และโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ในเงื่อนไขของสารละลาย KOH และสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิกหลังการซินเตอร์ริง ที่อุณหภูมิ 500 °C

ชนิดของตัวตรวจวัดแสง	กระแสรั่วไหล (I_{Dark}); (μA)
MSM	0.37
UMSM KOH [8]	1.28
UMSM TMAH doped silicic acid	1.12

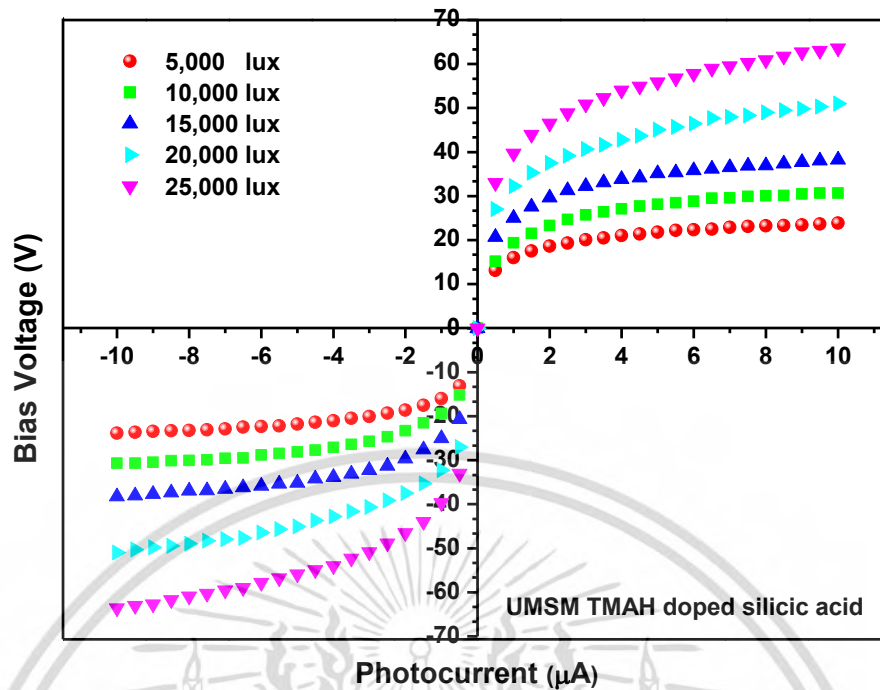
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ในห้องปฏิบัติการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2.2 ขณะได้รับแสงตกกระทบ

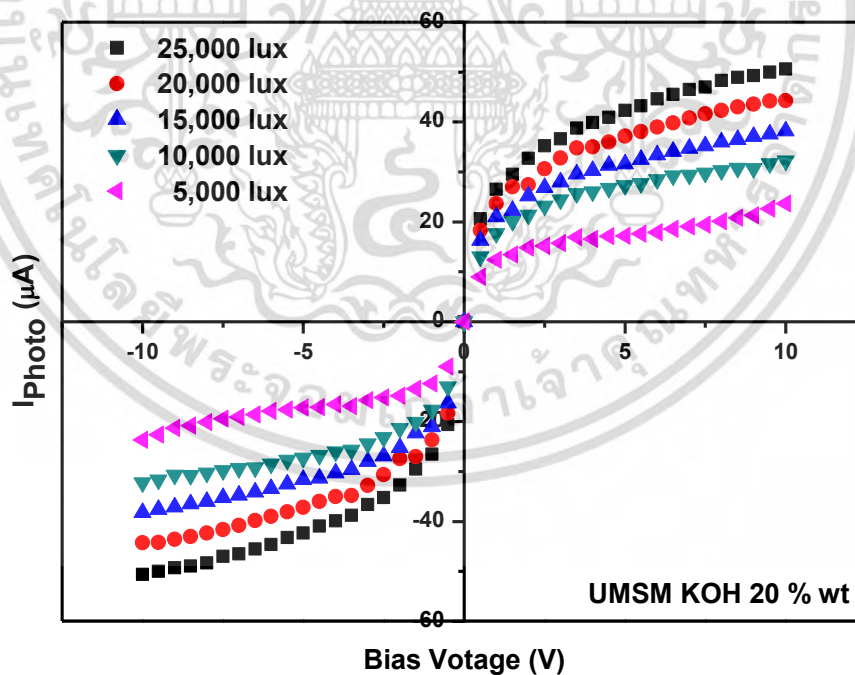
ในหัวข้อการทดลองนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการตอบสนองทางแสงที่มีความเข้มคงที่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีเงื่อนไขการสร้างของสารละลายแตกต่างกัน โดยได้รับความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 lux ป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง -10 V ดังแสดงในรูปที่ 4.24 - 4.26 โดยพบว่าที่แรงดันไบอัส 10 V ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบนั้นกระแสแสงมีค่าเท่ากับ 24.45 μA ซึ่งมีค่ากระแสแสงน้อยกว่าโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูอันเนื่องมาจากมีพื้นที่รับแสงน้อยกว่า และเมื่อทำการเปรียบเทียบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู พบว่าการใช้สารละลาย KOH และสารละลาย TMAH doped silicic acid นั้นมีค่ากระแสแสงมากที่สุดเท่ากับ 51.3 μA และ 63.6 μA ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงที่กักด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยกรดซิลิซิกมีค่ากระแสแสงมากกว่าสารละลาย KOH เนื่องจากมีความหนาแน่นและความขรุขระของพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนผิวซิลิคอนทำให้เพิ่มพื้นที่รับแสงภายในร่องรูปตัวยูจึงส่งผลให้มีค่ากระแสแสงมากขึ้น



รูปที่ 4.24 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) และแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 lux



รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ โดยใช้สารละลาย TMAH doped silicic acid



รูปที่ 4.26 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างทำการสร้าง พีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt

ขณะรับแสงตกกระทบ [8]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้กับโรงเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.7 การเปรียบเทียบค่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูไนเอ็อนไฮของสารละลาย KOH และสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิกหลังการซินเตอร์ริง ที่อุณหภูมิ 500 °C

ชนิดของตัวตรวจวัดแสง	กระแสแสง (I_{photo}) at 10 V; (μA)	เปรียบเทียบกับ ค่ากระแสแสง MSM (เท่า)
MSM (ผิวเรียบ)	24.45	-
UMSM KOH [8] (ผิวพีระมิด)	51.3	2.1
UMSM TMAH doped silicic acid (ผิวพีระมิด)	63.6	2.6

จากตารางที่ 4.7 เป็นการเปรียบเทียบกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง พบว่าค่ากระแสแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีค่าเพิ่มขึ้นจากโครงสร้างแบบเชิงราบประมาณ 2.1 - 2.6 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่ากระแสแสงมากที่สุดและมีค่ากระแสแสงมากกว่าการใช้สารละลาย KOH ประมาณ 1.24 เท่า จะเห็นได้ว่าขนาดของพีระมิดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้การสะท้อนแสงมีค่าต่ำกว่าพีระมิดที่มีขนาดเล็ก และความขรุขระพีระมิดภายในร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสงทำให้การสะท้อนแสงกลับที่ผิวมีค่าต่ำและการดูดกลืนแสงของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกระแสแสงสูง ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากพื้นที่รับแสงของบริเวณหลอดพาหะมีมากขึ้นส่งผลให้เกิดการกระตุ้นของแสงที่ตกบริเวณกระทบได้มากขึ้น จึงเกิดคู่พาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณหลอดพาหะมีความหนาแน่นของพาหะอิสระเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสแสงมีค่าสูง มีการตอบสนองทางแสงที่ดี นอกจากนั้นยังสามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสที่ให้แกตัวตรวจวัดแสง [4] ซึ่งถือได้ว่าการกัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิก เหมาะสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ต้องการให้ค่ากระแสแสงเพิ่มสูง (high current) ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดดเด่นอีกประการหนึ่งของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูชนิด Al/n-Si/Al ด้วยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไฮโซทรอปิก โดยทำการปรับปรุงสารละลายที่นำมาใช้ในการกัดซิลิคอนด้วยการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH โดยเงื่อนไขของการเติมปริมาณกรดซิลิซิกที่ 30, 32, 34, 36 และ 38 g/l ลงในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt% กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู จากการใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) สภาพต้านทาน 5-10 Ω ·cm ความหนา 625 μm มีชั้นอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1.5 μm บนซิลิคอน และเคลือบด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 2 μm โดยออกแบบลวดลายของอุปกรณ์เป็นแบบช่องเดี่ยว (single slit) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีขนาดกว้าง (wide electron gap) เท่ากับ 80 μm และมีขนาดของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมเท่ากับ 1 mm^2 สำหรับวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายในการลดอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์และอะลูมิเนียม เพื่อลดต้นทุนการผลิตโดยการลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ใช้เป็นชั้นป้องกันการกัดและสามารถสร้างขั้วไฟฟ้าที่สมบูรณ์แก่ตัวอุปกรณ์ได้ และเพิ่มพื้นที่รับแสงจากการกัดผิวหน้าซิลิคอนบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าให้เกิดเป็นร่องรูปตัวยูรวมถึงการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและการตอบสนองให้แก่ตัวตรวจวัดแสง ซึ่งผลจากการทดลองเป็นที่น่าพอใจตามจุดมุ่งหมายที่ตั้งไว้ ในการทดลองจะแบ่งออกเป็นสามส่วน โดยมีรายละเอียดของผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ส่วนแรกเป็นการศึกษาเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดจากการเติมซิลิซิกปริมาณต่างๆลงในสารละลาย TMAH เพื่อหาเงื่อนไขที่สามารถลดการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์น้อยที่สุดผลที่ได้พบว่าที่ปริมาณกรดซิลิซิก 34 g/l มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์น้อยที่สุดเท่ากับ 0.14 $\mu\text{m/hr}$ และ 0.41 $\mu\text{m/hr}$ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าน้อยกว่ากรดซิลิซิกปริมาณอื่นๆ และน้อยกว่าสารละลาย TMAH ที่ไม่ได้เติมกรดซิลิซิกประมาณ 1,000 เท่า จากผลการทดลองนี้ทำให้ได้เงื่อนไขที่มีความเหมาะสมที่นำไปศึกษาหาอัตราการกัดซิลิคอน จากการตรวจสอบความลึกของผิวซิลิคอนที่หายไปหลังการกัดพบว่าอัตราการกัดซิลิคอนลดลงอย่างเห็นได้ชัดจากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH สาเหตุนี้เกิดจากการเติมลงไปนั้นเป็นการลดความเป็นกรด-ด่างของสารละลายลดลงหรือมีค่า pH ต่ำกว่า 13 ทำให้ลดจำนวนการแตกตัวระหว่างไอออนไฮดรอกไซด์กับโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้ปฏิกิริยาการกัดและสลายพันธะซัลฟิวเรตจึงทำให้กัดซิลิคอนช้าไปด้วย จากนั้นได้ทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวซิลิคอนบริเวณร่องรูปตัวยูระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ผลการทดลองเมื่อวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยายเท่ากัน (10,000 เท่า) พบว่าสารละลาย TMAH doped silicic acid เกิดพีระมิดแบบสุ่มขนาดใหญ่มีขนาดของฐานพีระมิดประมาณ 3-4 μm และมีความหนาแน่นของพีระมิดเกิดขึ้นจำนวนมาก เมื่อนำขนาดฐานของพีระมิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไปทำการคำนวณหาค่าความสูงของพีระมิด พบว่าพีระมิดแบบสุ่มมีความสูงเท่ากับ $2.73 \mu\text{m}$ เมื่อนำชิ้นงานไปวิเคราะห์ด้วย AFM ผลปรากฏว่ารูปทรงของพีระมิดที่เกิดขึ้นมีลักษณะเดียวกันและมีความขรุขระมากซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์จาก SEM

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูหลังผ่านการชินเตอริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ผลจากการวัดลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้น เมื่อพิจารณาแรงดันไบอัสที่ 10 V พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่สารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่ากระแสรั่วไหลเท่ากับ $1.12 \mu\text{A}$ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบพบว่ากระแสรั่วไหลสูงกว่า อาจมีสาเหตุจากพื้นผิวที่มีลักษณะแบบขรุขระจำนวนมากที่เกิดขึ้นภายในร่องรูปตัวยูและรวมไปถึงลักษณะโครงสร้างที่เป็นแบบร่องรูปตัวยู จากนั้นทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับความเข้มแสง 5,000-25,000 lux เพื่อหากระแสแสงที่เพิ่มขึ้นจากการสร้างพีระมิดแบบสุ่มที่มีขนาดใหญ่ภายในร่องรูปตัวยู เมื่อพิจารณาที่ความเข้มแสง 25,000 lux ที่แรงดันไบอัส 10 V พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่สารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่ากระแสแสงเท่ากับ $63.6 \mu\text{A}$ ซึ่งเป็นค่ากระแสแสงที่มากกว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบประมาณ 2.4 เท่า ซึ่งตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนี้สามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้เป็นอย่างดี

ส่วนสุดท้ายการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู เจือไนเซตแต่ละสารละลายที่ใช้ในการกัด จากศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงในวิทยานิพนธ์มาก่อนหน้านี้ที่มีการประยุกต์และพัฒนาสำหรับการเพิ่มจุดเด่นแก่ตัวตรวจวัดแสงอย่างต่อเนื่อง ผู้ทำการวิจัยจึงทำการพัฒนาต่อยอดจากวิทยานิพนธ์ที่ผ่านมาเพื่อเพิ่มจุดเด่นและลดข้อด้อยบางประการของตัวตรวจวัดแสง ผลจากการศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู จากการวิเคราะห์การกัดซิลิคอนและอะลูมิเนียม เมื่อนำเงื่อนไขของสารละลาย TMAH 8.3 wt% เติมด้วยผงซิลิคอน 37.5 g/l [6] เปรียบเทียบกับการเติมกรดซิลิซิก 34 g/l ลงในสารละลาย TMAH 5 wt% พบว่าทั้งสองเงื่อนไขช่วยให้ช่วยลดการกัดอะลูมิเนียมลงได้ โดยที่เติมกรดซิลิซิกจะสามารถลดการกัดอะลูมิเนียมได้มากกว่าการเติมด้วยผงซิลิคอนถึง 12.86 เท่า เนื่องจากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH เป็นการเพิ่มปริมาณผลิตภัณฑ์ $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$ ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการกัดอะลูมิเนียมได้มากกว่าการเติมผงซิลิคอนและการเติมกรดซิลิซิกนั้นมีอัตราการกัดซิลิคอนเร็วกว่าการเติมผงซิลิคอนประมาณ 2.14 เท่า จากนั้นทำการพิจารณาลักษณะพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนโดยเปรียบเทียบสารละลายที่ใช้กัดระหว่างสารละลาย TMAH doped silicic acid กับสารละลาย KOH 20 wt% [8] ปรากฏว่าพื้นผิวซิลิคอนหลังกัดด้วยการเติมกรดซิลิซิกนั้นเกิดพีระมิดฐานขนาดใหญ่และความหนาแน่นของพีระมิดแบบสุ่มจำนวนมาก ในขณะที่พื้นผิวของซิลิคอนหลังการ

กัดด้วยสารละลาย KOH เกิดพีระมิดแบบสุ่มที่มีรูปทรงไม่แน่ชัด ซึ่งอาจเกิดจากกระบวนการกัดและเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาของไอออนของโพแทสเซียมในสารละลาย KOH มีค่าความสูงของพีระมิดเท่ากับ $2.34 \mu\text{m}$ [12] ซึ่งมีความขรุขระน้อยกว่าการเติมกรดซิลิซิก ($2.73 \mu\text{m}$) ประมาณ 1 เท่า ผลการตรวจหาองค์ประกอบของธาตุผลบนพื้นผิวซิลิคอนหลังกัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid จากการวิเคราะห์ด้วย EDX พบว่าธาตุที่ปรากฏเพียงพีคของคาร์บอนและซิลิคอนเป็นหลักเท่านั้น ซึ่งเป็นข้อมูลที่สามารถยืนยันได้ว่าการกัดด้วยสารละลายนี้ไม่มีไอออนของต่างหรือสารปนเปื้อนตกค้างบนพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสง เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้สารละลาย KOH ที่มีไอออนของโพแทสเซียมที่เป็นประจุบวกบางส่วนตกค้างอยู่บนพื้นผิวของวัสดุ และมีผลกระทบต่อสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่ต้องการในกระบวนการผลิตวงจรรวม ผลจากการศึกษาสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงเงื่อนไขที่นำมาเปรียบเทียบบนนั้นมุ่งเน้นในการสร้างพีระมิดแบบสุ่มให้เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนบริเวณภายในร่องรูปตัวยู คือ สารละลาย KOH และสารละลาย TMAH doped silicic acid พบว่าขณะนี้ไม่ได้รับแสงตกกระทบ ที่แรงดันไบอัส 10 V ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่ากระแสรั่วไหลน้อยกว่าสารละลาย KOH ประมาณ 1.14 เท่า เนื่องจากเป็นกระบวนการกัดแบบเปียกจึงทำให้เกิดการทิ้งประจุของโพแทสเซียมอยู่บนผิวของซิลิคอน [8] และเมื่อพิจารณาลักษณะสมบัติกระแสและแรงดัน ขณะได้รับความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 lux ที่แรงดันไบอัส 10 V ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู พบว่าการใช้สารละลาย KOH และสารละลาย TMAH doped silicic acid นั้นมีค่ากระแสแสงมากที่สุดเท่ากับ $51.3 \mu\text{A}$ และ $63.6 \mu\text{A}$ ตามลำดับ สารละลาย TMAH doped silicic acid มีค่ากระแสแสงมากกว่าการใช้สารละลาย KOH ประมาณ 1.24 เท่า จะเห็นได้ว่าความขรุขระพีระมิดแบบสุ่มจำนวนมากภายในร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงทำให้กระแสแสงมีค่าสูง มีการตอบสนองทางแสงที่ดี เหมาะสมสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ต้องการให้ค่ากระแสแสงเพิ่มสูง (high current) ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดดเด่นอีกประการหนึ่งที่มีความน่าสนใจและสามารถสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูชนิดพิเศษให้ประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2558.
- [2] นายอภิรักษ์ มังกรแก้ว “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟมิตเตอร์ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 16, (2559)
- [3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ลักษณะเฉพาะทางแสงและไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, (2547)
- [4] นายวรเทพ น้อยปรีชา, “การออกแบบการสร้างโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2553)
- [5] สุรชาติ เมืองงอ้า, “การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2552)
- [6] งามจิต มงคลธนานนท์, “การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปด้วยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2559)
- [7] ธนกฤต แสงโฮง, “การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, (2559)
- [8] ยุทธนา แจ็งอรุณ, “การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] วุฒิไกร คำอ่อน, “การกัดพื้นผิวเรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2560)
- [10] Philip C.H. Chan. Et. al. “An improved TMAH Si-etching solution without attacking exposed aluminum”, *Proc. IEEE MEMS*, Jan.2000. pp. 135-141.
- [11] C.G. Wu. Et. al. “Optimization of (100)-Si TMAH etching for Uncooled Infrared Detector”, *Proc. SPIE*, Vol. 7383, Aug. 2009.
- [12] สุรดา เอื้อมานะพงษ์, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Cr/n-Si (Pt-Doped)/Cr”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, (2559)
- [13] สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม”, พิมพ์ครั้งที่ 4 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, (2549).
- [14] วรทัย พัฒนอาจกุล, “การศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีแอโนไดซ์เซชัน ในอุปกรณ์ตรวจจับของแอลกอฮอล์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2549)
- [15] รัตนาวรรณ สันบุญตัน, “การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิเจิตพร้อมกับกระบวนการผลิตซีมอส” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2552)
- [16] ไอลดา สุวรรณชาติ, “ผลกระทบของการฉายรังสีเอกซ์บนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดที่แพร่สารเจือแพลทินัม” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] บุศรา นรารักษ์, “การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2556)
- [18] ศุภกร จันทร์ประภา. “การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดตัททียไดโอดที่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยการฉายรังสีเอกซ์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557
- [19] G. Kovacs, N. Maluf and K. Petersen. “Bulk Micromachining of Silicon” *Proc. Of the IEEE*, Vol. 86, Aug. 1998. pp. 1536-1551.
- [20] รังสรรค์ เมืองเหลือ “การสร้างตัวตรวจจู้้อตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทาน (RTD) โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค” โครงการวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ หน้า 23-24, (2556)
- [21] S. Dutta. Et. al. “Comparison of etch characteristics of KOH, TMAH and EDP for bulk micromachining of silicon (110)”, *Microsyst Technol*, September 2011, pp. 1622-1628.
- [22] ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ และคณะ “การสร้างผิวซิลิคอนขรุขระรูปทรงพีระมิดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย การใช้หน้ากากกริดในสารละลายเคมีที่ไม่ใช่ไฮโดรฟลูออริกแอซิด”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. กันยายน 2558.
- [23] Erno Hilbrand Klaassen. “MICROMACHINED INSTRUMENTATION SYSTEMS”, STANFORD UNIVERSITY, May 1996.
- [24] นายกิตติศักดิ์ อมรสุรินทร์วงศ์ “การศึกษาโครงสร้างและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของชั้นพาสซีเวชันด้านหลัง ต้นทุนต่ำในเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอน”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2555.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [25] Erik S. Skibinski and Melissa A. Hines. “Molecular Mechanism of Etching-Induced Faceting on Si(100): Micromasking Is Not a Prerequisite for Pyramidal Texturing”, **Journal of Physical Chemistry C**, April 2014.
- [26] การวัดความเรียบผิว (Surface Roughness Testing). **PB All Techno [Online]**. Available: <https://www.pballtechno.com/article/29/การวัดความหยาบผิว-surface-roughness-testing>
- [27] P. Allongue, V. Costa-Kieling and H. Gerischer . “Etching of Silicon in NaOH Solutions II. Electrochemical Studies of n-Si(111) and (100) and Mechanism of the Dissolution”, **Journal of The Electrochemical Society**, Vol. 140, 1993. pp. 1018-1026.
- [28] Gwiy- Sang Chung. “ Anisotropic Etching Characteristics of Si in Tetramethylammonium Hydroxide : Isopropyl Alcohol : Pyrazine Solutions ”, **Journal of the Korean Physical Society**, Vol. 46, May 2005. pp. 1152-1156.
- [29] “**Wet-Chemical Etching and Cleaning of Silicon**”, Virginia Semiconductor, Inc., January 2003
- [30] K. Biswas. Et. al. “ Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for aluminum passivation and smooth surface ” **Microelectronics Journal**, Vol. 37. June 2005. pp. 321-327.
- [31] Tetramethylammonium_hydroxide. **Wikipedia [Online]**. Available: https://www.en.wikipedia.org/wiki/Tetramethylammonium_hydroxide
- [32] Nestor Gabriel Gonzalez-Pereyra. “ **Anisotropic Etching of Monocrystalline Silicon Under Subcritical Conditions**”, Clemson University, April 2015.
- [33] Silicic_acid. **Wikipedia [Online]**. Available: https://www.en.wikipedia.org/wiki/Silicic_acid

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [34] Jaybalan Tamahrajah “**Experimental and theory-based studies of silicic acid formation under hydrothermal conditions – evaluation of various methods**”, University of Oldenburg, Sep. 2015.
- [35] Dong Chen. Et. al. “Research on increasing silicon etch rate in deep wet etching with tetramethyl ammonium hydroxide etchant”, **Journal of nanoengineering and nanosystems**, Vol.229, 2015. pp. 136-140.
- [36] J. T. L. Thong, P. Luo, W.K. Choi and S. C. Tan. “Evolution of hillocks during silicon etching in TMAH”, **Journal of Micromechanics and Microengineering**. Vol. 11, Jan. 2001. pp. 61-69.
- [37] M. A. Gosalvez. Et. al. “Orientation- and concentration-dependent surfactant adsorption on silicon in aqueous alkaline solutions: explaining the changes in the etch rate, roughness and undercutting for MEMS applications”, **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Vol. 19, Oct. 2009.
- [38] Prabhjeet Dhillon and Subhendu Sarkar. “Erosion dynamics of faceted pyramidal surfaces”, **Current Applied Physics**, Vol. 16, May 2016. pp.956-962.
- [39] Tiago S. Monteiro. Et. al. “Dynamic Wet Etching of Silicon through Isopropanol Alcohol Evaporation”, **Micromachines**, Vol. 6, Oct. 2015. pp. 1534-1545
- [40] Kathryn A. Perrine and Andrew V. Teplyakov. “Reactivity of selectively terminated single crystal silicon surfaces”, **Chemical Society Reviews**, Vol. 39, July 2010. pp. 3256-3274.
- [41] Cubic_crystal_system. Wikipedia[Online]. Available: https://www.en.wikipedia.org/wiki/Cubic_crystal_system
- [42] Gwi-y Sang Chung. “Study of electrochemical etch-stop for high-precision thickness control of single-crystal Si in aqueous TMAH : IPA : pyrazine solutions”, **Microelectronic Engineering**, Vol. 85, June 2007. pp. 271-277.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [43] Miguel A. Gosalvez. “ATOMISTIC MODELLING OF ANISOTROPIC ETCHING OF CRYSTALLINE SILICON”, Helsinki University of Technology, Finland, Sep. 2003.
- [44] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger and H. Baumgartel. “Anisotropic Etching of Crystalline Silicon in Alkaline Solutions”, **Journal of Electrochemical**, Vol. 137, Nov. 1991. pp. 3612-3626.
- [45] J. Laconte, D. Flandre and J. P. Raskin. “Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration”, Springer, 2006.
- [46] K. Biswas, S. Kal. “Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon”, **Microelectronic Journal**. Vol. 37, November 2005. pp. 519-525.
- [47] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, เทคโนโลยีวงจรรวม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2560.
- [48] J. Laconte, D. Flandre and J.-P. Raskin. “Silicon bulk micromachining with TMAH”, Springer, 2006.
- [49] Theo Baum and David J. Schiffrin. “AFM study of surface finish improvement by ultrasound in the anisotropic etching of Si (100) in KOH for micromachining applications”, **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Vol. 7, Oct. 1997. pp. 338-342.
- [50] D. Resnik, D. Vrtacnik, U Aljancic and S. Amon. “Effective roughness reduction of {100} and {311} planes in anisotropic etching of {100} silicon in 5% TMAH”, **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Vol. 13, Oct. 2002, pp. 26-34.
- [51] Yujie Fan. Et. al. “Differences in etching characteristics of TMAH and KOH on preparing inverted pyramids for silicon solar cells” **Applied Surface Science**. Vol. 264, Oct. 2012. pp. 761-766.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [52] C.-R. Yang, C.-H. Yang and P.-Y. Chen. “Study on anisotropic silicon etching characteristics in various surfactant-added tetramethyl ammonium hydroxide water solutions”, **Journal of Micromechanics and microengineering**. Vol. 15, Sep. 2005. pp. 2028-2037.
- [53] C. M. A. Ashruf. Et. al. “Electrochemical etch stop engineering for bulk micromachining”, **Mechatronics**, Vol. 8, Feb. 1998. pp. 595-612.
- [54] Prem Pal. Et. al. “Study of rounded concave and sharp edge convex corners undercutting in CMOS compatible anisotropic etchants” , **Journal of Micromechanics and Microengineering**, Vol. 17, Oct. 2007. pp. 2299-2307.
- [55] Wolfgang Haiss. Et. al. “Surface termination and hydrogen bubble adhesion on Si(100) surfaces during anisotropic dissolution in aqueous KOH”, **Journal of Electroanalytical Chemistry**, Vol. 597, Sep. 2006. pp. 1-12.
- [56] Kamonwan Suttijalern, Et. al. “Study of UMSM Photodetectors Fabrication Technique by Silicic Acid Added in TMAH Solution”, **The 2018 IAENG International Conference on Engineering Physics**, 14-16 March, 2018, Hong Kong. pp. 761-764.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket and Surasak Niemcharoen “Study of UMSM Photodetectors Fabrication Technique by Silicic Acid Added in TMAH Solution” The 2018 IAENG International Conference on Engineering Physics, 14-16 March, 2018, Hong Kong. pp. 761-764.
- [2] **กมลวรรณ สุทธิเจริญ**, จิรวัดน์ ปราบเขต, รังสรรค์ เมืองเหลือ, ยุทธนา แจ็งอรุณ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยการเติม แอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต ลงในสารละลาย TMAH” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 532-535, 2-4 พฤษภาคม 2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Lecture Notes in Engineering and Computer Science

IMECS 2018

International MultiConference of
**Engineers and Computer
 Scientists 2018**

Volume II

**Hong Kong
 14-16 March, 2018**

S. I. Ao
 Oscar Castillo
 Craig Douglas
 David Dagan Feng
 A. M. Korsunsky (Eds.)

IA ENG

International Association of Engineers

ISBN: 978-988-14048-8-6
 ISSN: 2078-0958

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Study of UMSM Photodetectors Fabrication Technique by Silicic Acid Added in TMAH Solution

Kamonwan Suttijaleri, Jirawat Prabket and Surasak Niemcharoen, *Member, IAENG*

Abstract—This paper presents about the U-shape metal-semiconductor-metal (UMSM) photodetectors fabrication on Al/n-Si/Al. This technique performs by using anisotropic wet etching with the depth of U-shape about 4 – 5 μm . In the experiment, 5 wt % of Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) were mixed with 30 – 38 μl silicic acid (H_2SiO_4) at 80°C. The result found that the UMSM photodetectors fabrication can increase the light detecting area about 1.73 times when compared with planar structure. Moreover, the added of silicic acid in TMAH solution were decrease Al and silicon dioxide etch rates. The effective condition is 5 wt % TMAH mixed with 34 μl silicic acid that provided lowest Al and SiO_2 etch rates. For the light responsibility analysis at 25,000 Lux, the UMSM structure showed the photocurrent higher than planar structure about 2.4 times. This study found that, the optimal volume of silicic acid that added in TMAH solution can reduce the Al and SiO_2 etch rates. This condition should be suitable for photodetectors fabrication.

Keywords—Tetramethyl ammonium hydroxide, Photodetectors, Silicic acid, Anisotropic, Random pyramid surface

I. INTRODUCTION

IN this present, semiconductor technology is widely popular. This technology can apply to various engineering fields i.e. photodetectors. The photodetectors structure that still interesting is metal-semiconductor-metal (MSM) structure as known as a planar structure. This planar structure has the simple process that easy to fabricate. Nevertheless, it has some limitation on the size of the electrode that affects to a light detecting area. This research presents a silicon surface etching method for photodetectors to extend the light detecting area. This technique performs by etching the planar structure to uniform U-shape metal-semiconductor-metal (UMSM) structure as shown in Fig. 1 [3].

Manuscript received January 05, 2018; revised February 10, 2018.
Kamonwan Suttijaleri is with the Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand (corresponding author to provide e-mail: ksuttijaleri@gmail.com).

Jirawat Prabket is with Thai Microelectronics Center (TMCE), Wangsakarn District, Amphur Mueang, Chachoengsao, Thailand (e-mail: jirawat.prabket@tmce.co.th).

Surasak Niemcharoen is with the Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Bangkok, Thailand (e-mail: surasakniem@kmitl.ac.th).

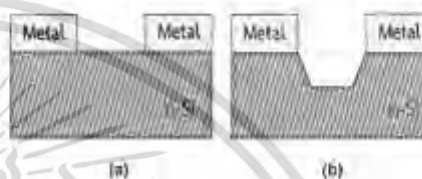


Fig. 1 The metal-semiconductor-metal (MSM) photodetectors: (a) the planar photodetectors, (b) The U-shape metal-semiconductor-metal (UMSM) photodetectors.

Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) is silicon anisotropic etching solutions. This solution is most popular etchant by comparing with Potassium hydroxide (KOH) and Ethylenediamine pyrocatechol (EDP). This TMAH solution cannot produce mobile metal ion, nontoxic and no effect on the environment. It was easy to remove and compatible with CMOS fabrication process [3]. The TMAH etching obtains random pyramid on the surface of the structure and has higher silicon and silicon dioxide etch rates. This research presents about the adding of silicic acid (H_2SiO_4) into TMAH solution to reduce aluminum (Al) and silicon dioxide (SiO_2) etch rates, improves passivation quality of aluminum electrode [2] and optimizes a performance of photodetectors.

II. EXPERIMENTAL

In this research used a single crystalline n-type silicon wafer (100) for the wet etching process. Each wafer has 5-10 $\Omega\text{-cm}$ resistivity and 6 inches diameter with 625 micrometers thickness. The experiment started with 2 nm aluminum layer was deposited by radio frequency sputtering (RF Sputtering) and 2.4 μm silicon dioxide layer was grown by plasma enhanced chemical vapor deposit (PECVD) process. After that, the photodetectors structure pattern was exposed with a photolithography process and removed the native oxide with 5 wt % HF solution and then, silicon chip was washed with de-ionized water to remove out the particles. In the etching process, we designed the experiment with two conditions consist of the pure 5 wt % TMAH and the mixture of 5 wt % TMAH and silicic acid. For the mixed condition, 5 wt % TMAH with different volume of silicic acid consists of 30, 32, 34, 36, 38 μl (liter of TMAH) were mixed and pure 5 wt % TMAH at 80°C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

with the 200 rpm magnetic stirrer. The depth of aluminum and silicon dioxide layers had measured by using a profilometer. The surface of silicon chip had observed by a scanning electron (SEM) and analyzed electrical and light characteristics by 4 points probe.

III. RESULT AND DISCUSSION

4. Physical Characteristics of U-shape groove photodetectors Al/n-Si/p-Al structure.

The etch rates of aluminum and SiO₂ in pure 5 wt % TMAH and 5 wt % TMAH with different concentration of silicic acid. The Fig. 2 shown etch rates of pure 5 wt % TMAH, the etch rates that affected to Al and SiO₂ at 116.50 μm/h and 221.66 μm/h respectively. The mixture of 5 wt % TMAH with 34 g/l silicic acid, the etch rates of Al and SiO₂ at 0.136 μm/h and 0.407 μm/h respectively. The result found that a mixture of TMAH with the appropriate amount of silicic acid could dramatically decrease etch rates because am hydroxide in the solution reacts with silicic acid [1].

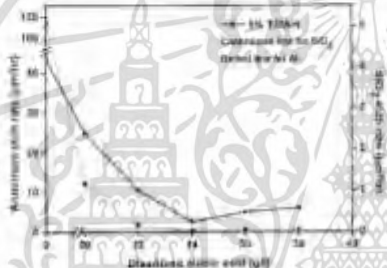


Fig. 2. Variation of the aluminum and silicon dioxide etch rates with silicic acid at a concentration of 5 wt % TMAH at 80 °C.

In the etching process, the reaction bank plane on aluminum shown as follows:



From the chemical equation about the adding of silicic acid into TMAH solution, the silicic acid molecular structure is H₄SiO₄ and a combination of TMAH solution will be produced SiO₂ to decrease the aluminum etch rates and obtained Al₂(SiO₃)₂. This product cannot react soon to TMAH. Therefore, Al₂(SiO₃)₂ become a thick coat on the aluminum surface. Moreover, the silicon dioxide etches rate has reduced [3].

The depth of aluminum and silicon dioxide with various etching times as shown in Fig. 3. The depth trend of Al and shown slightly increased whereas the etch rates of Al shown lower than SiO₂. The photodetectors structure was fabricated by the wet etching method using the mixture of 5 wt % TMAH and 34 g/l silicic acid at 80 °C.

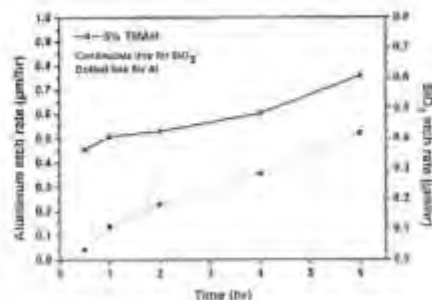


Fig. 3. Variation of the aluminum and silicon dioxide depth with time etching of 5 wt % TMAH and 34 g/l silicic acid added at 80 °C.

This solution reacted with (100) silicon orientation to etch the silicon surface from planar to U-shape that contain random pyramid. This result was analyzed with scanning electron microscope (5.0 KV power and 10,000x magnification).



Fig. 4. SEM micrographs of silicon (100) after etched with: (a) 5 wt % TMAH mixture; (b) 5 wt % TMAH and 34 g/l silicic acid added; and for cross-sectional images of SEM 5 wt % TMAH and 34 g/l silicic acid added at 80 °C.

The analyzed result found pure 5 wt % TMAH and mixtures conditions, the surface of silicon in light detecting area shown the random pyramid structure because the non-directional etching reaction of TMAH was produced hydrogen ion on the silicon surface [9].

The Fig. 4 shows the pure 5 wt % TMAH could obtain random pyramid structure on the surface higher than mixture because the decreasing of the silicon etch rates also decrease the amount of random pyramid. In Fig. 3(c) shown a cross-section of photodetectors from SEM in case of the mixture, this solution could etch on (100) better than (111) [5].

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

B. Characteristics of current and voltage of photodetectors during non-illuminated

The electrical characteristics of photodetectors were measure with Cascade Microtech M150 Probe station by using -10 to 10 DC voltage. For the leakage testing, in case of non-illuminated with forward bias, the depletion region of photodetectors was increased and made the electron that moved from metal across the Schottky barrier to semiconductor and given a leakage current [4].

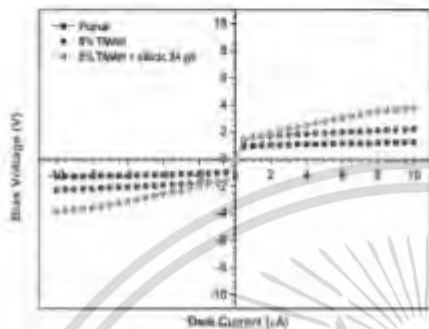


Fig. 5 Current and voltage characteristics of UMSM photodetectors and planar photodetectors during non-illuminated.

In Fig. 5 after biased at 0V volts, the leakage current of planar photodetectors equal to 4.28 μ A whereas UMSM photodetectors with pure 5 wt % TMAH and mixtures were obtained the leakage current 2.27 μ A and 3.84 μ A respectively. From the result found the leakage current of planar structure lower than UMSM structure, pure 5 wt % about 1.77 times and mixture about 3 times.

C. Characteristics of current and voltage of photodetectors during illuminated

In case of illuminated, halogen lamp had used for measuring a current of photodetectors with 5,000, 15,000 and 25,000 Lux by bias 0 to 10 DC voltage on the planar structure and UMSM structure. In Fig. 6 the U-shape photodetectors provided the current that directly increased with bias voltage and light intensity. The structure that etched by mixture gave current more than pure 5 wt % TMAH structure because the silicic acid could decrease aluminum etch rates and got an effective aluminum electrode.

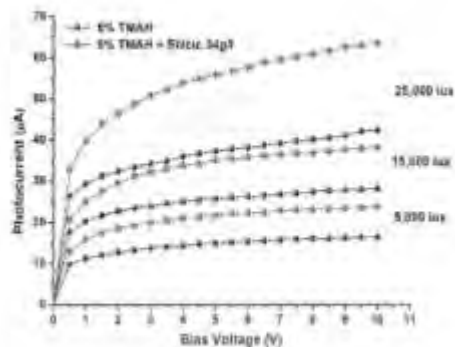


Fig. 6 Current and voltage characteristics of UMSM photodetectors during illuminated at 5000, 15000 and 25000 lux.



Fig. 7 Relationship between current and illuminance of planar and UMSM photodetectors at 5 wt % TMAH solution and 5 wt % TMAH and 34 μ silicic acid etching (silicic acid).

In Fig. 7 shows that photocurrent was increase by the light intensity that caused the electron-hole pair to obtain the photocurrent. From the result of the photocurrent of planar structure and UMSM structure had directly increasing trend (linear). On 10 V biasing with 25,000 Lux, the UMSM structure was etched with mixture gave the highest photocurrent about 63.6 μ A that higher than planar structure (about 26.45 μ A) at 2.4 times due to extended of the light detecting area on U-shape and random pyramid surface can be afforded an effective light responsibility of photodetectors.

IV. CONCLUSION

This research studies about the photodetectors with Al/n-Si/Al planar and U-Shape structure fabrication with Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) and silicic acid. The result found that 34 g/l of silicic acid had obtained aluminum and silicon dioxide etch rates equal to 0.137 $\mu\text{m/h}$ and 0.407 $\mu\text{m/h}$ respectively. For electrical characteristics of U-Shape photodetectors in case of 5 wt % TMAH with silicic acid, the leakage current and photocurrent equal to 3.84 μA and 63.6 μA respectively which more than planar structure about three times. The study of photodetectors fabrication found the effective light responsibility. This finding is the beginning of photodetectors development in the future.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge Thai Microelectronics Center (TMEC) and King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for fabrication and testing facilities. Our grateful to Mr. Sirinak Niamcharoen for suggestions during the planning and development of this research work.

REFERENCES

- [1] K. Hirata, S. Ima, et al. "Bulk microfabrication of Al/Si on TMAH based Etchant for Aluminum Fabrication and Smooth Surface", *Microelectronics Journal*, Vol. 37, 320-327(2006).
- [2] K. Hirata and S. Ima. "Etch characteristics of SiO₂, TMAH and dual doped TMAH for bulk microfabrication of silicon", *Microelectronics Journal*, Vol. 37, 516-523(2006).
- [3] Dong Guo, Jialin Liu, et al. "Research on Improving Silicon Etch Rate in Deep Wet Etching with Temperature Adjustment", *High-tech Etchant*, Nanotechnology and Nanomaterials, Vol. 27(3), 160-164 (2015).
- [4] Sirinak Niamcharoen "Model and Synthesis of CMOS" in Eastern Faculty of Engineering KMITL, 19-20 (2017).
- [5] Sirinak Niamcharoen, "Study on application of wet etching U-shaped TMAH etchant for fabrication CMOS Photocenter (Master thesis)", Dept. Phys. Eng., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, 2016.
- [6] Sirinak Niamcharoen, et al. "Fabrication of CMOS Photocenter by using Ammonium Peroxydisulfate in TMAH solution", in *Conference of Electrical Engineering Faculty of Rajabhat Mahasarakham University of Technology*, 2017, pp. 1-4.



Kamonwan Sattaporn received the Bachelor's degree in Physics from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok in 2010. Currently, she studies the master's degree in microelectronics engineering at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Thailand. Her current interests include semiconductor materials design, synthesis, and fabrication of microstructure fabrication process.



Sirinak Niamcharoen received the Ph.D. degree in electrical engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, Canada, he is working as a lecturer and graduate student advisor at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research interests include CMOS Technology, MSM photodetector fabrication process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



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

งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

EENET 2017

"การพัฒนานวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างยั่งยืน"
Sustainable Development of Innovation for Industry and Agriculture

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

Conference Topics

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

Logos at the top: EENET, Rajamangala University of Technology, EENET 2017, and a ribbon symbol.

Logos at the bottom: B, AI SOLUTION, NEO DIDACTIC CO., LTD., phelps dodge, PTS Combination, ThaiEasyElec, PRIMUS COMPANY LIMITED, and SAT.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ครั้งที่ 9

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

การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว Y โดยการเติมแอมโมเนียมเปอร์ริออกไซด์ซัลเฟต

ลงในสารละลาย TMAH

Fabrication of UMSM Photodetectors by adding Ammonium Peroxodisulphate in TMAH solution

กมลวรรณ สุขจิตเจริญ¹, จิรวัฒน์ ปราณเขต¹, รัชสารดี เมืองเหนือ¹, ยุทธนา กังงอรูน¹ และ สุรศักดิ์ เกียมเจริญ²

¹ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร

เลขที่ 1 ถนนคลองกรุง แขวงสี่พระยา เขตบางกอกน้อย กรุงเทพมหานคร E-mail: ksutijaleem@gmail.com

²ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) E-mail: jirawat.praek@nectec.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัว Y (UMSM) คือกระบวนการทางเคมีแบบเปียก เพื่อไม่ให้เกิดการกัดแบบอเนกประสงค์บนแผ่นไอโซทอปซิลิคอน โดยใช้สารละลายแอมโมเนียมเปอร์ริออกไซด์ซัลเฟต (TMAH) และแอมโมเนียมเปอร์ริออกไซด์ซัลเฟต (AP) ที่ความเข้มข้นของสารละลายที่จัดคั้งไว้ ด้วยอุณหภูมิการกัดคงที่ 80 องศาเซลเซียส ความเร็วของการกัดมีความถี่คงที่ 5 นก ที่สารละลาย TMAH 5 %wt เติมน้ำด้วยสาร AP 7 gm/l ซึ่งมีความขรุขระน้อยกว่าสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 %wt เติมน้ำด้วยสาร AP 5 gm/l ประมาณ 20 เท่า ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 %wt เติมน้ำด้วยสาร AP 7 gm/l กระแสเปิดเท่ากับ 7 nA ที่แรงดัน 10 V และจะ ได้รับแสงตกกระทบที่ความเข้มแสง 25,000 lux OTDR จะแสดงค่าเท่ากับ 57.7 nA จากการศึกษานี้พบว่าสารละลาย TMAH เมื่อทำการเติมด้วยสาร AP จะช่วยให้มีลักษณะผิวหน้าเรียบ ซึ่งเหมาะต่อการใช้งานไว้สร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงต่อไป

คำสำคัญ: สารละลายแอมโมเนียมเปอร์ริออกไซด์ซัลเฟต, ตัวตรวจวัดแสง, กัดตัวเรียบ, แผ่นไอโซทอปซิลิคอน

Abstract

This article presents the UMSM photodetector fabrication by wet chemical method to obtain anisotropic silicon etching. The experiment demonstrates with tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) and ammonium peroxodisulfate (AP) with multiple concentrations at 80°C temperature. The result provides 5 nm smooth surface of silicon by 5 %wt TMAH solution with 7 gm/l AP added and gives the surface roughness lower than 3 %wt TMAH solution with 7 gm/l AP added approximately 20 times. The electrical characteristics of photodetector while not receive photocurrent reflection from 5 %wt

TMAH solution with 7 gm/l AP added is giving the dark current equal to 7 nA at 10 volts. Additionally, it obtains the photocurrent at 57.7 nA 10 volts while giving the light illuminated to the photodetector with 25,000 lux. According to this study found that TMAH solution with AP added will make smooth surface on silicon that suitable for design photodetector in further research.

Keywords: TMAH, Photodetector, Smooth surface, Anisotropic

1. บทนำ

ในปัจจุบัน อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ถูกนำมาใช้ร่วมกับวงจรจำนวนมาก เช่น ตัวตรวจวัดแสง ตัวตรวจวัดอุณหภูมิ เป็นต้น กระบวนการกัดที่นำไปใช้สูงประเภทคือ การกัดเปียก (Wet etching) และการกัดแบบแห้ง (Dry etching) ซึ่งเทคนิคการกัดแบบแห้ง ถูกนำมาใช้กันศึกษารวมของซิลิคอนที่ค่อนข้างสูงในโครงสร้างขนาดเล็ก ผลการกัดแบบเปียกยังคงได้รับความนิยมมากกว่าการกัดแบบแห้ง เนื่องจากมีกระบวนการผลิตที่ง่ายกว่าทุกสิ่ง ซึ่งการกัดสูงเพิ่มมีความเร็วที่ดี และผลสารกัดสีจะแตกต่างกันไป การกัดแบบเปียกการกัดของซิลิคอนเป็นกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) หรือกัดแบบเลือก โครงสร้างการกัดส่วนใหญ่ของซิลิคอนซึ่งมีความสำคัญสำหรับการผลิตอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กลงการพัฒนากระบวนการการกัดเชิงพาณิชย์ สารละลายแอมโมเนียมเปอร์ริออกไซด์ซัลเฟต (TMAH) เป็นหนึ่งในกลุ่มของไฮดรอกไซด์ที่ไม่มีโลหะอัลคาไล และเป็นที่นิยมนำมาใช้กัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันทั้งในวงรีเทลและในวงวิจัย เพราะมีราคาถูกและเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อเทียบกับน้ำได้ งานที่ทำการกัดที่ละเอียดและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับงาน CMOS ได้จึงมีการนำซิลิคอนในระนาบที่กัดกลางๆ สารละลาย TMAH เมื่อทำการกัดซิลิคอนนั้นพื้นผิวจะมีความขรุขระ แต่เมื่อเติมสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นของสาร AP (Ammonium Peroxodisulphate; (NH₄)₂S₂O₈) ทำให้ซิลิคอนมีผิวหน้าเรียบ [2]

EL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครื่องแม่เหล็กวาระใหม่เพื่ออนาคตในไทยรวมของ ครั้งที่ 9

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

ในบทความนี้ได้มีเสนอผลของควมนำของสารละลาย TMAH เติมน้ำยสาร AP เพื่อช่วยให้อัตราการกัดซิลิคอนสูงขึ้น อัตราเพิ่มของซิลิคอนให้เร็วขึ้น และเป็นแนวทางใหม่ ในการปรับปรุงประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตัวตรวจจับแบบทรานซิสเตอร์ที่ทำการศึกษาค้นคว้า ดังนี้ 1) อัตราการกัดซิลิคอน 2) การกัดพื้นผิวแนวร่องของทรานซิสเตอร์ขนาด (100) และ 3) พื้นผิวซิลิคอน ที่มีผลต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

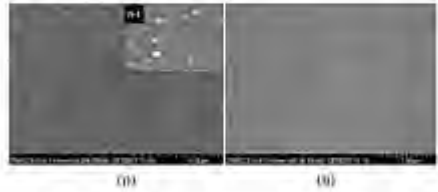
2. ขั้นตอนการทดลอง

แผ่นสุบทรองซิลิคอนชนิด n ผลการกัดผล 5-10 เมกกะฮิซิกเป็นระยะเวลา (100) นาทีแล้วนำแผ่นสุบที่กัดแล้วไปล้างทำความสะอาดที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 2 นาที นำแผ่นสุบไปล้างในสารละลายกรดซิลิคอนแบบเบสอินทรีย์ที่อุณหภูมิประมาณ 2-3 องศาเซลเซียสเพื่อขจัดคราบของซิลิคอนออก (HF solution) หลังจากนั้นนำแผ่นสุบที่กัดแล้วไปล้างในน้ำที่อุณหภูมิประมาณ 1-5 องศาเซลเซียสเพื่อขจัดคราบของซิลิคอนออก (PE-CVD) และล้างแผ่นสุบด้วยน้ำกลั่นแล้วล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียสเพื่อขจัดคราบของซิลิคอนออกและขจัดสารละลายโพสิทีฟ (Photoresist) และล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water) และล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water) หลังจากนั้นนำแผ่นสุบที่กัดแล้วไปล้างในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 3% (และ 5%wt) เติมน้ำยสาร AP ที่ปริมาณสาร 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 g/ml (TMAH) ใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในระหว่างทำการกัดใช้ความยาวการกัดอย่างต่อเนื่องเป็น 10 นาที ใช้เครื่องควบคุมการกัดอัตโนมัติที่ความเร็ว 200 รอบต่อวินาที ในขั้นตอนการกัดแบบอัตโนมัติใช้เครื่องมือวัดความหนาของฟิล์มที่เรียกว่า Profilometer และดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วนำแผ่นสุบที่กัดแล้วไปล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water) และล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water)

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 การศึกษาผลกระทบของสภาพของตัวตรวจจับสารรังสีของ UNSM

ผลการทดลองการกัดซิลิคอนในระยะเวลา (100) นาทีแล้วความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 3%wt และ 5%wt เติมน้ำยสาร AP ที่ปริมาณสาร AP ดังนี้ ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 1 พบว่าอัตราการกัดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 3%wt เติมน้ำยสาร AP ดังนี้



รูปที่ 1 ภาพถ่าย SEM พื้นผิวของซิลิคอนระยะเวลา (100) ที่อุณหภูมิ 80°C (a) สารละลาย TMAH 3%wt เติมน้ำยสาร AP 5 g/ml กำลังขยาย 5,000 เท่า (ภาพ a- ความละเอียดของเครื่องมือวัดซิลิคอน กำลังขยาย 50,000 เท่า) (b) สารละลาย TMAH 3%wt เติมน้ำยสาร AP 7 g/ml กำลังขยาย 10,000 เท่า

ในรูปที่ 1 พบว่าที่ความเข้มข้นสารละลาย TMAH 3%wt เติมน้ำยสาร AP 5 g/ml พื้นผิวซิลิคอนมีความขรุขระมากขึ้น (ภาพของ TMAH 3%wt เติมน้ำยสาร AP 7 g/ml ปริมาณ 20 นาที ที่ใช้โดยการกัดด้วยเครื่อง Polishing ในระหว่างทำการกัดเป็นรอยที่เกิดขึ้นจากความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่กัดซึ่งมีความขรุขระมากขึ้นที่ไม่เท่ากับ 10 นาที และอัตราการกัดที่ลดลงของแผ่นสุบที่กัดโดยอัตโนมัติที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water) และล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water) หลังจากนั้นนำแผ่นสุบที่กัดแล้วไปล้างในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 3% (และ 5%wt) เติมน้ำยสาร AP ที่ปริมาณสาร 0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 g/ml (TMAH) ใช้อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ในระหว่างทำการกัดใช้ความยาวการกัดอย่างต่อเนื่องเป็น 10 นาที ใช้เครื่องควบคุมการกัดอัตโนมัติที่ความเร็ว 200 รอบต่อวินาที ในขั้นตอนการกัดแบบอัตโนมัติใช้เครื่องมือวัดความหนาของฟิล์มที่เรียกว่า Profilometer และดูลักษณะพื้นผิวของฟิล์มที่ตรวจวัดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แล้วนำแผ่นสุบที่กัดแล้วไปล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water) และล้างด้วยน้ำกลั่นที่อุณหภูมิประมาณ 10 องศาเซลเซียส (Nanive water)



รูปที่ 2 การวัดความเข้มข้นสารรังสีของตัวตรวจจับซิลิคอนในระยะเวลา (100) นาที สาร AP ที่ความเข้มข้นสารละลาย TMAH 3%wt และ 5%wt ที่อุณหภูมิ 80°C

รูปที่ 2 แสดงผลจากการกัดซิลิคอนในระยะเวลา (100) นาทีที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เติมน้ำยสาร AP ที่ความเข้มข้นของสาร AP ดังนี้

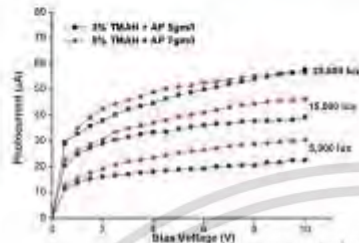
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประจุนิวตรอนเครื่องกำเนิดนิวตรอนโพสิตรอน นิวเคลียสเทคโนโลยีสารสนเทศ ครั้งที่ 9

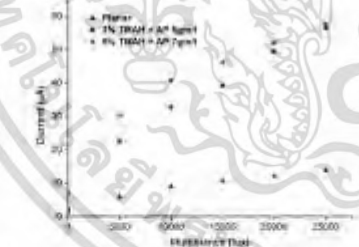
Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajabhat University of Technology 2017 (ENET 2017)

จุดสนใจ และกระบวนการเชิงวิศวกรรมเพื่อพัฒนาเครื่องวัด ผลที่ได้พบว่า ความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้นเป็นอัตราส่วนที่ 1 ต่อ 10 กระแสแสง เมื่อเราเพิ่มพื้นที่รับจำนวนพัลส์ด้วยเช่นกัน



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติกระแสแสงและแรงดันของตัวตรวจจับแสงโครงสร้างแบบ UMSM ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบบนความเข้มแสง 5,000, 15,000 และ 25,000 lux

ลักษณะสมบัติกระแสแสงและแรงดันของตัวตรวจจับแสงโครงสร้างแบบ UMSM ขณะที่ได้รับกระแสแสงของโครงสร้างแบบพอลิเมอร์ที่มีค่าสูงถึงเท่ากับ 13.8 µA และกระแสแสงของโครงสร้างแบบ UMSM ที่สารละลาย TMAH 3 %wt มีค่าสูงถึงประมาณ 56.5 µA และที่สารละลาย TMAH 5 %wt มีค่ากระแสแสงสูงถึงประมาณ 87.7 µA ซึ่งจากนี้ 10 วัสดุ ความเข้มแสง 25,000 lux จากค่าที่ได้พบว่าเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้นกระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น โดยที่ความเข้มแสงค่าที่กระแสแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งกระแสแสง (I_{ph}) ที่วัดได้นั้นมีค่าสูงเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงของตัวตรวจจับแสงตัวตรวจจับเป็นองค์รูปตัว U ที่มีตัวตรวจจับที่เชื่อมทำให้ตัวตรวจจับมีความยาวกระแสแสงที่สั้นกว่ากระแสแสงของโครงสร้างแบบพอลิเมอร์ประมาณ 5 เท่า [5] ตามสรุปที่ A



รูปที่ 6 ลักษณะสมบัติกระแสเชิงความเข้มแสงของตัวตรวจจับแสงโครงสร้างแบบ UMSM ขณะได้รับแสงตกกระทบบนพื้นที่รับจำนวนของสารละลาย TMAH 3 %wt, 5 %wt และแบบพอลิเมอร์

4. สรุปผลการทดลอง

บทความนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับตัวตรวจจับชนิดใหม่ที่มีลักษณะแบบ UMSM โครงสร้าง AlN-SiO₂ โดยใช้สารละลายของสารละลายพอลิเมอร์ในซิลิคอนไดออกไซด์ (TMAH) โดยที่ตัวตรวจจับชนิดนี้เมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจจับ (AP) พบว่าตัวตรวจจับชนิดนี้ตอบสนองสูงเท่ากับ 38.91 µA ในสารละลาย TMAH 3 %wt เมื่อเทียบกับ AP 3 µm โดยที่สารละลาย TMAH 5 %wt เมื่อเทียบกับ AP 7 µm มีความยาวของพื้นที่ตรวจจับที่น้อยที่สุดเท่ากับ 5 µm ในส่วนของลักษณะสมบัติของโพสิตรอนตัวตรวจจับจะไม่มีแสงตกกระทบบนที่กระแสสูงที่ค่าสูง ในขณะที่ตัวตรวจจับแบบอื่นที่ได้รับแสงตกกระทบบนที่ค่าสูงซึ่งมีความเข้มแสงที่มากขึ้น จึงพบว่าตัวตรวจจับที่สร้างขึ้นสามารถตอบสนองที่แสงได้ และบทความนี้ก็เป็นจุดเริ่มต้นในการพัฒนาตัวตรวจจับแสงที่มีลักษณะที่ตัวตรวจจับแบบอื่นให้ดีขึ้นในอนาคตต่อไป

5. ภัยคุกคามประเทศ

บทความนี้ขอขอบคุณ นักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEIC) ที่ให้อุปกรณ์และเครื่องมือในการศึกษาที่เป็นประโยชน์แก่บทความนี้ และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ซึ่งมอบทุนอุดหนุนการวิจัยระดับปริญญาโท และปริญญาตรี แก่ผู้เขียนบทความนี้ และขอขอบคุณอาจารย์ ดร. นงนุช นงนุช และ อาจารย์ ดร. นงนุช นงนุช ที่ช่วยในการศึกษาครั้งนี้ ขอขอบคุณอาจารย์ ดร. นงนุช นงนุช ที่ช่วยในการศึกษาครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Biswas*, S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon," *Microelectronics Journal* 37, 519-525, 2006.
- [2] K. Biswas*, S. Das, D.K. Maurya, S. Kal, S.K. Lathi, "Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for ultrathin membranes and smooth surface," *Microelectronics Journal* 37, 111-127 2006.
- [3] ดิศักดิ์ นงนุช, นงนุช นงนุช, ดร. นงนุช นงนุช, ดร. นงนุช นงนุช, การประจุนิวตรอนของตัวตรวจจับชนิดซิลิคอนที่มีขนาดนาโนเมตร (2553) การประชุมวิชาการระดับชาติของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ครั้งที่ 27 ประจำปีการศึกษา 2553.
- [4] นงนุช นงนุช, ดร. นงนุช นงนุช, ดร. นงนุช นงนุช, การออกแบบตัวตรวจจับตัวตรวจจับโครงสร้าง AlN-SiO₂ แบบ U-Shape, (2559), การประชุมวิชาการระดับชาติของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ครั้งที่ 27.
- [5] ดิศักดิ์ นงนุช, นงนุช นงนุช, ดร. นงนุช นงนุช, การประจุนิวตรอนของตัวตรวจจับชนิดซิลิคอนที่มีขนาดนาโนเมตร (2559), การประชุมวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	30 มีนาคม 2536
ที่อยู่	28 หมู่ 9 ตำบลหนองกรด อำเภอเมืองนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ 60240
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1. เทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2. ตัวตรวจจับแสง (Photodetector)

ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket and Surasak Niemcharoen “Study of UMSM Photodetectors Fabrication Technique by Silicic Acid Added in TMAH Solution” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018, 14-16 March, 2018, Hong Kong. Volume 2. pp. 761-764.
- [2] **กมลวรรณ สุทธิเจริญ**, จิรวัดน์ ปราบเขต, รั้งสรรค์ เมืองเหลือ, ยุทธนา แจ้งอรุณ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “การสร้างตัวตรวจจับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยการเติม แอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต ลงในสารละลาย TMAH” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 532-535. 2-4 พฤษภาคม 2560.
- [3] Thikhamporn Jarpen, **Kamonwan Sutticharoen** and Surasak Niemcharoen “Enhancement Efficiency of UMSM Photodetectors by Doping AP and IPA in TMAH Solutions for Fabrication Process” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018, 14-16 March, 2018, Hong Kong. Volume 2. pp. 727-730.
- [4] ยุทธนา แจ้งอรุณ, **กมลวรรณ สุทธิเจริญ**, โยธิน วงศ์ประเสริฐ, จิรวัดน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง UMSM ด้วยการสร้าง พีระมิดแบบสุ่ม” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 512-515, 2-4 พฤษภาคม 2560.
- [5] ยุทธนา แจ้งอรุณ, **กมลวรรณ สุทธิเจริญ**, จิรวัดน์ ปราบเขตอภิขญา ทองรักษ์, รั้งสรรค์ เมืองเหลือ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “เทคนิคการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้เพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 540-543, 2-4 พฤษภาคม 2560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้