

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างใหม่แบบพีระมิตสองระดับภายในร่องรูปตัวยูโดย  
การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเอง

NOVEL DOUBLE-PYRAMID ON U-SHAPED STRUCTURE PHOTODETECTOR  
BY REPETITIVE ANISOTROPIC ETCHING WITH A SELF-ALIGNED TECHNIQUE



กมลวรรณ สุทธิเจริญ  
KAMONWAN SUTTIJALERN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2565

KMITL-2022-EN-M-018-090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

NOVEL DOUBLE-PYRAMID ON U-SHAPED STRUCTURE PHOTODETECTOR  
BY REPETITIVE ANISOTROPIC ETCHING WITH A SELF-ALIGNED TECHNIQUE



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
DOCTOR OF ENGINEERING IN ELECTRICAL ENGINEERING  
SCHOOL OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2022

KMITL-2022-EN-M-018-090

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**COPYRIGHT 2022**

**SCHOOL OF ENGINEERING**

**KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างใหม่แบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู โดยการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเอง
นักศึกษา	นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ
รหัสนักศึกษา	61601177
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไฟฟ้า
พ.ศ.	2565
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Al/n-Si/Al) โดยออกแบบการเพิ่มพื้นที่รับแสงภายในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงเพื่อเพิ่มกระแสแสงที่มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพของตัวอุปกรณ์ ในงานวิจัยนี้ได้สร้างตัวตรวจวัดแสงทั้งหมดสามโครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างแรกแบบ U-MSM และโครงสร้างที่สองแบบ MPU-MSM ถูกสร้างด้วยเทคนิคการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกครั้งเดียว ในส่วนโครงสร้างที่สามเป็นแบบ DPU-MSM ถูกสร้างด้วยเทคนิคการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเอง ในการทดลองมีสองส่วนหลัก คือ ส่วนของกายภาพของตัวตรวจวัดแสงและส่วนของลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง จากผลการทดลองเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง คือ ในระหว่างการกัดอุณหภูมิที่ใช้ 80 องศาเซลเซียส และใช้ความเร็วในการกวาดสารเคมี 200 รอบต่อนาที พบว่าสารละลายที่ใช้กัดของสารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 wt% เติมด้วยสารเติมแต่งของกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l สามารถลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมได้เป็นอย่างดี เมื่อผสมสารเติมแต่งของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ที่ปริมาณ 7 g/l พบว่าพื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะราบเรียบ ตัวตรวจวัดแสงที่ถูกปรับปรุงพื้นที่รับแสงแล้วมาทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบจากเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 635 nm แรงดันไบอัส 10 V พบว่าโครงสร้างแบบ DPU-MSM มีค่ากระแสแสงสูงสุด และมีค่ากระแสแสงมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบประมาณ 6.6 เท่า และมีกระแสแสงสูงกว่าโครงสร้างแบบ MPU-MSM และโครงสร้างแบบ U-MSM เมื่อทำการวัดลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นจะสามารถตอบสนองแสงที่มีความถี่คutoffที่สูงขึ้น แต่ความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงจากพื้นที่ของส่วนที่ถูกกัดออก ผลลัพธ์ที่ได้สามารถนำโครงสร้างแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู (DPU-MSM) สร้างร่วมกับกระบวนการสร้างซีมอส (CMOS) หรือใช้งานร่วมกับวงจรรวมได้ และนำไปพัฒนาเป็นตัวตรวจวัดแสงชนิดพิเศษให้มีลักษณะที่ดียิ่งขึ้นต่อไป

<b>Thesis Title</b>	Novel Double-Pyramid on U-shaped Structure Photodetector by Repetitive Anisotropic Etching with a Self-Aligned Technique
<b>Student</b>	Miss Kamonwan Suttijalern
<b>Student ID</b>	61601177
<b>Degree</b>	Doctor of Engineering
<b>Program</b>	Electrical Engineering
<b>Year</b>	2022
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

## ABSTRACT

This thesis proposes the fabrication of a metal-semiconductor-metal (Al/n-Si/Al) photodetector by increasing the light-detecting area to enhance the direct effective photocurrent. In this research, the first U-MSM structure and the second MPU-MSM structure were fabricated using a single anisotropic etching process. The third DPU-MSM structure uses a repetitive anisotropic etching with a self-aligned technique. The experiment focused on the physical and electrical characteristics of the photodetectors. The optimal etching conditions for photometer fabrication are 80 ° C during the etching process with a chemical stirring speed of 200 rpm. It was observed that the etching rate of aluminum may be drastically lowered by adding 34 g/l of silicic acid into 5 wt.% TMAH. With the addition of 7 g/l of AP, the silicon surface was smooth. Under incident light from a laser at 635 nm and a bias voltage of 10 V, the electrical characteristics of a receiver-modified photodetector are measured and compared to those of a planar structure photodetector (MSM). Found that the DPU-MSM structure has the maximum photocurrent, which is approximately 6.6 times that of a planar structure. Compared to the MPU-MSM and the U-MSM structures, they both have higher photocurrent. Considering the responsivity properties of a photodetector with a larger light-detecting area enables the device to detect light at higher cutoff frequencies. However, the capacity is diminished by the area of the etched portion. Consequently, a double-pyramids structure on U-shaped (DPU-MSM) structure can be constructed using CMOS generation techniques or combined with integrated circuits. To develop a special type of photodetector with improved properties.

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนการอบรมสั่งสอนให้ความรู้ ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียน การทำงานและการดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

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

ขอขอบคุณทุนการศึกษาจากกองทุนวิจัยและกองทุนสนับสนุนการบริหารงานบุคคลของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเภทกองทุนปริญญาเอกพระจอมเกล้าลาดกระบัง (KMITL Doctoral Scholarships) เลขที่ทุน KDS 2019/017 สำหรับการสนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัยนี้ และเจ้าหน้าที่รับผิดชอบในงานทุนดังกล่าวทุกท่าน

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

ขอขอบคุณ คุณจิรวัดน์ จันดีวงศ์ ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการสร้างและการวิเคราะห์ผลการทดลองบางส่วนรวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้ ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรีและปริญญาโทที่ช่วยเหลือทางด้าน การวัดผลการทดลองที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่าน ที่ให้ความอุปการะทุนการศึกษา การอบรมสั่งสอน สนับสนุนด้านการศึกษาต่างๆ ค่อยเป็นกำลังใจโดยตลอดมา รวมทั้งบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อ.....	XII
รายการสัญลักษณ์.....	XIV
รายการศัพท์เทคนิค.....	XVI
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	7
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	8
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	8
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	8
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	10
2.1 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง.....	10
2.1.1 โฟโตคอนดักเตอร์.....	11
2.1.2 โฟโตไดโอด.....	11
2.2 คุณลักษณะสำคัญของตัวตรวจวัดแสง.....	14
2.2.1 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง.....	16
2.2.2 ประสิทธิภาพควอนตัม.....	17
2.2.3 ความเร็วในการตอบสนอง.....	18
2.2.4 สภาพการตอบสนอง.....	18
2.2.5 สัญญาณรบกวนแบบซี้อต.....	18
2.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ.....	19
2.3.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล.....	19
2.3.2 ตัวตรวจวัดแสง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส และได้รับแสงตกกระทบ.....	20

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.4 กระบวนการกัด .....	25
2.4.1 กระบวนการกัดแบบแห้ง .....	25
2.4.2 กระบวนการกัดแบบเปียก .....	26
2.4.2.1 การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก.....	27
2.4.2.2 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก.....	28
2.4.3 ปฏิกริยาการกัดซิลิคอน .....	29
2.4.4 การปรับชิ้นตัวเอง.....	31
2.5 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู .....	32
2.5.1 ลักษณะพื้นผิวแบบเรียบภายในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง.....	33
2.5.2 ลักษณะพื้นผิวแบบขรุขระภายในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง .....	35
2.5.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก.....	36
2.5.3.1 สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ .....	37
2.5.3.2 กรดซิลิซิก .....	38
2.5.3.3 แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต.....	39
2.5.4 ปฏิกริยาการกัดอะลูมิเนียม.....	40
บทที่ 3 การออกแบบกระบวนการสร้างและวิธีการทดลอง .....	42
3.1 การเตรียมชิ้นงานและเลือกเงื่อนไขงานวิจัย.....	42
3.1.1 แผ่นฐานรับรองซิลิคอน.....	42
3.1.2 ขี้โลหะของตัวตรวจวัดแสง .....	42
3.1.3 สารละลายที่ใช้กัดโครงสร้างพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง .....	43
3.2 การออกแบบลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง .....	44
3.3 กระบวนการสร้าง .....	44
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน .....	45
3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม .....	46
3.3.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ .....	46
3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี .....	46
3.3.5 การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด .....	47
3.3.6 กระบวนการกัด .....	48

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.7 กระบวนการขึ้นเตอรัง.....	50
3.3.8 การทดลองตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า .....	51
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	52
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสง .....	52
4.1.1 การศึกษาลักษณะการกัดของสารละลายที่ใช้กัดโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง ....	53
4.1.1.1 การกัดเปียกด้วยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ....	53
4.1.1.2 การกัดเปียกด้วยการเติมสารเติมแต่งการกัด .....	55
4.1.1.3 การเติมสารเติมแต่งการกัดสองชนิดลงในสารละลาย TMAH .....	57
4.1.2 การศึกษาลักษณะพื้นรับแสงภายในโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง .....	59
4.1.2.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง.....	60
4.1.2.2 พื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก	61
4.2 การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง .....	64
4.2.1 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในแบบ.....	
สัญญาณแสงกระแสตรง .....	65
4.2.2 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในแบบ.....	
สัญญาณแสงกระแสสลับ .....	72
4.2.2.1 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับโพลดความ.....	
ต้านทาน .....	72
4.2.2.2 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบอัส..	74
4.2.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง .....	76
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	78
เอกสารอ้างอิง .....	81
ภาคผนวก ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์.....	94
ประวัติผู้เขียน.....	133

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

## สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	ตารางแสดงการเปรียบเทียบลักษณะตัวตรวจวัดแสงแต่ละชนิด.....	14
4.1	การเปรียบเทียบการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในแบบสัญญาณแสงกระแสดตรง	72
4.2	กระแสดแสง ความจุไฟฟ้า และความกว้างบริเวณปลอดภัยที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัส ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM.....	76



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ภาคตัดขวางของโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง (ก) ตัวตรวจวัดแสงแบบราบเรียบภายในร่องรูปตัวยู (ข) ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู และ (ค) ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู.....	2
1.2 ภาคตัดขวางตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างที่ถูกกัดสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า .....	3
1.3 แบบจำลองการเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนบนผิวหน้าซิลิคอนขณะการกัดเปียก..... แบบแอนไอโซทรอปิก .....	3
1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนและอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ .....	5
1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	5
1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดกับปริมาณสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (AP) ในเงื่อนไขต่างๆ ที่ทำการเติมลงในสารตั้งต้น.....	6
2.1 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่าง ๆ (ก) p-n โฟโตไดโอด .....	10
(ข) p-i-n โฟโตไดโอด (ค) อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ..	10
2.2 (ก) โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตคอนดักเตอร์ และการให้แรงดันไบอัส .....	11
(ข) กลไกการเกิดพาหะในโฟโตคอนดักเตอร์ เมื่อได้รับการฉายแสง .....	11
2.3 แลปพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ .....	15
(ก) แรงดันไบอัสตรง และ (ข) แรงดันไบอัสย้อนกลับ .....	15
2.4 สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง.....	19
2.5 ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ (ก) ภาพตัดขวางของ..... ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (ข) แลปพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง .....	20
สองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ใน สภาวะสมดุลความร้อน .....	20
2.6 แลปพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ (ก) เมื่อได้รับแรงดัน และ(ข) เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ .....	22
2.7 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	23
2.8 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัส..... ขั้วต่อตักกี๋ เมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	24
2.9 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ ..	24
2.10 ลักษณะการกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา.....	26

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.11 ลักษณะการกัดด้วยปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายที่ใช้กัด .....	27
2.12 ลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิกและการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (ก) ไอโซทรอปิก .....	
(ข) แอนไอโซทรอปิก และ (ค) แอนไอโซทรอปิกแบบสมบูรณ .....	27
2.13 แบบจำลองปฏิกิริยาเริ่มต้นของการกัดซิลิคอนระนาบ (100) .....	30
2.14 (ก) การเพิ่มส่วนซ้อนทับจะส่งผลให้มอสเฟตแบบเกตโลหะมีขนาดใหญ่ และ (ข) มอสเฟตแบบเกตโพลีซิลิคอนไม่ต้องสร้างส่วนซ้อนทับ แต่ใช้หลักการปรับซ้อนตัวเอง .....	31
2.15 ภาพของภาคตัดขวางโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al .....	33
2.16 ลักษณะการสะท้อนของแสงบนพื้นผิวเรียบ .....	34
2.17 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างลักษณะพื้นผิวซิลิคอนแบบเรียบ .....	34
2.18 ลักษณะของโครงสร้างขรุขระ (surface texturing) (ก) พื้นผิวแบบเชิงราบ (ข) แทนนาโนซิลิคอน (ค) พื้นผิวพีระมิด (ง) พื้นผิวพีระมิดแบบกลับหัว และ (ฉ) พื้นผิวพีระมิดแบบสุ่ม ..	34
2.19 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างลักษณะพื้นผิวซิลิคอนแบบขรุขระ .....	35
2.20 โครงสร้างทางเคมีของเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (ก) โครงสร้างลิวิส และ(ข) โครงสร้างแบบจำลองสามมิติ .....	37
2.21 จำลองการปฏิกิริยาการกัดพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) .....	38
2.22 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก (ก) โครงสร้างลิวิส (ข) โครงสร้างแบบจำลองสามมิติ ..	38
2.23 โครงสร้างทางเคมีของสารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต .....	39
2.24 ภาพจำลองตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม .....	40
3.1 กระบวนการกัดโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงด้วยเงื่อนไขสารละลายที่ใช้กัด .....	43
3.2 ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง .....	44
3.3 แผนภาพขั้นตอนสร้างตัวตรวจวัดแสง .....	45
3.4 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al .....	47
3.5 ขั้นตอนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (ก) การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกครั้งเดียว .....	
และ(ข) การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ้อนตัวเอง .....	49
3.6 (ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด และ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการกัด .....	50
3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการขึ้นเตอริงตัวตรวจวัดแสงหลังการกัด .....	
ที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อใช้เวลาในการการขึ้นเตอริง 15 นาที .....	51
3.8 แผนภาพชุดเครื่องมือทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง .....	51

## สารบัญญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 อัตราการกัดซึลิกอนของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ.....	54
4.2 อัตราการกัดซึลิกอนและอัตราการกัดอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH เติมด้วยสาร..... แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซิลิเฟต (AP) และของสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซึลิก. ที่ปริมาตรต่างๆ.....	55
4.3 อัตราการกัดซึลิกอนและความขรุขระของพื้นผิวซึลิกอนของสารละลาย TMAH ผสมด้วย กรดซึลิกเติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซิลิเฟต (AP) ที่ปริมาตรต่างๆ.....	58
4.4 ความลึกซึลิกอนและความลึกอะลูมิเนียมหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH ผสมด้วย กรดซึลิกเติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซิลิเฟต .....	59
4.5 ภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสง (ก) โครงสร้างแบบเชิงราบ (ข) โครงสร้างแบบราบเรียบ ภายในร่องรูปตัวยู (ค) โครงสร้างแบบพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู และ (ง) โครงสร้างแบบ พีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู.....	61
4.6 พื้นผิวซึลิกอนระนาบ (100) หลังการกัด (ก) สารละลาย dual-doped TMAH (ข) สาร.. ละลาย pure TMAH (ค) สารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH ( $U_{p1}$ )... และ (ง) สารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH ( $U_{p2}$ ).....	62
4.7 ลักษณะความสูงและฐานพีระมิดบนพื้นผิวซึลิกอนระนาบ (100) หลังการกัดด้วยเงื่อนไข สารละลายที่ใช้กัดต่างๆ .....	63
4.8 (ก) แผนภาพชุดเครื่องมือทดลองลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสง..... (ข) ภาพจำลองตัวอย่างตัวตรวจวัดแสงที่ได้รับแสงตกกระทบ .....	64
4.9 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้าง เมื่อไม่ได้รับแสง..... ตกกระทบ.....	65
4.10 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสง เมื่อได้รับแสงตกกระทบ .....	
(ก) โครงสร้าง แบบ MSM (ข) โครงสร้างแบบ U-MSM (ค) โครงสร้างแบบ MPU-MSM . และ (ง) โครงสร้างแบบ DPU-MSM .....	66
4.11 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่โครงสร้าง เมื่อได้รับ แสงตกกระทบที่กำลังงาน 6.0 mW.....	68
4.12 ลักษณะสมบัติความหนาแน่นกระแส – ความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ.... MSM และโครงสร้างแบบ DPU-MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส 10 โวลต์ .....	69
4.13 ลักษณะสมบัติการตอบสนอง – ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่.... โครงสร้าง เมื่อได้รับแสงตกกระทบ .....	70

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.14 ภาพจำลองส่วนพื้นที่รับสัญญาณแสงของโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง (ก) โครงสร้าง ..... แบบ MSM (ข) โครงสร้างแบบ U-MSM (ค) โครงสร้างแบบ MPU-MSM และ..... (ง) โครงสร้างแบบ DPU-MSM .....	71
4.15 การตอบสนองสัญญาณแสงที่ถูกลดทอนโดยความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่โหลดต้านทานเปลี่ยนแปลงเป็น 500 $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ และ 100 k $\Omega$ .....	73
4.16 การตอบสนองสัญญาณแสงที่ถูกลดทอนโดยความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่โหลดต้านทานเปลี่ยนแปลงเป็น 500 $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$ และ 100 k $\Omega$ .....	74
4.17 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบอัสของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่โหลดความต้านทาน 500 $\Omega$ ต่ออนุกรมเข้ากับชิ้นงาน .....	75
4.18 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่โครงสร้าง เมื่อได้รับแรงดัน ไบอัสค่าต่างๆ .....	77

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
Al	Aluminum	อะลูมิเนียม
Al <sub>2</sub> (SiO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Aluminum silicates	อะลูมิเนียมซิลิเกต
Al(OH) <sub>3</sub>	Aluminum hydroxide	อะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์
AP	Ammonum peroxodisulfate	แอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต
DI	De-ionization water	น้ำปราศจากประจุ
DPU-MSM	Double-Pyramid on U-shaped Metal-Semiconductor-Metal	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบราบเรียบ ภายในร่องรูปตัวยู
EDP	Ethylenediamine pyrocatechol	เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกคอล
ERC	Electronic Research Center	ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
eV	Electron-volt	อิเล็กตรอนโวลต์
FCC	Face Centred Cubic	เฟสเซ็นเตอร์คิวบิก
GaAs	Gallium Arsenide	แกลเลียมอาร์เซไนด์
Ge	Germanium	เยอรมันเนียม
g/l	gram per liter	กรัมต่อลิตร
HF	Hydrofluoric acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
H <sub>2</sub>	Hydrogen gas	ก๊าซไฮโดรเจน
H <sub>2</sub> O	Water	น้ำ
IC	Integrated Circuit	วงจรรวม
InGaAs	Indium Gallium Arsenide	อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์
InP	Indium Phosphide	อินเดียมฟอสไฟด์
IPA	Isopropyl alcohol	ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
MEMS	Microelectromechanical systems	ระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค
MPU-MSM	Pyramid on U-shaped Metal-Semiconductor-Metal	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพีระมิด ภายในร่องรูปตัวยู
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ
NaOH	Sodium hydroxide	โซเดียมไฮดรอกไซด์
NH <sub>4</sub> OH	Ammonium hydroxide	แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อ (ต่อ)

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
nm	nanometer	นาโนเมตร
n-Si	n type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
OH <sup>-</sup>	Hydroxide ion	อนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์
PR	Photoresist	น้ำยาไวแสง
Si	Silicon	ซิลิคอน
Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Silicon nitride	ซิลิคอนไนไตรด์
(SiO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	Silicates	ซิลิเกต
SiO <sub>2</sub>	Silicon dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
Si(OH) <sub>4</sub>	Silicic acid	กรดซิลิซิก
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
TMAH	Tetramethyl ammonium hydroxide	เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
U-MSM	U-shaped Metal-Semiconductor-Metal	ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบราบเรียบ ภายในร่องรูปตัวยู
Wt.%	Weight percentage	ร้อยละโดยน้ำหนัก
μm	Micrometer	ไมโครเมตร
μA	Microamps	ไมโครแอมป์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ Xiii อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$A$	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส
$A^*$	คือ	ค่าคงตัวรีซาร์ดสัน
$C$	คือ	ค่าความจุไฟฟ้า
$E_0$	คือ	ระดับสูญญากาศ
$E_A$	คือ	ระดับผู้รับแบบลึกลับ
$E_a$	คือ	ระดับพลังงานกระตุ้น
$E_C$	คือ	ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า
$E_D$	คือ	ระดับผู้ให้แบบลึกลับ
$E_F$	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	กระแสโฟโตไดโอด

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$J$	คือ	ความหนาแน่นกระแส
$k$	คือ	ค่าคงที่โบสต์มันน์
$kV$	คือ	พลังงานรังสีเอกซ์
$n$	คือ	แฟคเตอร์อุดมคติ
$N_A$	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
$\mathcal{X}$	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
$\phi_{bn}$	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อตักีย
$\phi_M$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_S$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$h$	คือ	ความลึกในการกัด
$p$	คือ	พื้นที่รับแสงแบบเชิงราบ
$g$	คือ	พื้นที่รับแสงของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู
$D$	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

# 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
การปรับซ็อนตัวเอง	Self-aligned
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่อย่างอื่นถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
กระบวนการซินเตอร์ริง	Sintering process
กระบวนการดูดกลืนแสง	Absorption process
กระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะ	Recombination process
กระบวนการสปัตเตอร์ริง	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
ตัวสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเทียน	Lambertian reflectors
ไตรโคลโรเอทิลีน	Trichloroethylene
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band
แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบตรง	Direct band gap semiconductor
แถบพลังงานสารกึ่งตัวนำแบบไม่ตรง	Indirect band gap semiconductor
แถบวาเลนซ์	Valence band

เนินพระมิตแบบสุ่ม

Hillock

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และทำซ้ำอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
เนื้อสารกึ่งตัวนำ	Bulk
น้ำยาขึ้นลวดลาย	Developer
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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และเผยแพร่ไปยังผู้อื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
รอยสัมผัสขั้วต่อตติ์กี	Schottky contact
รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	Metal-semiconductor contact
รอยสัมผัสโอห์มิก	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
สารเติมแต่งการกัด	Etching additive
สารประกอบเชิงซ้อน	Complexing agent
สารละลายบัฟเฟอร์	Buffer solution
อัลลอย	Alloy
อะซิโตน	Acetone
อิเล็กโตรเนกาติวิตี	Electronegativity
เอธิลีนไดแอมมีน	Ethylenediamine
แอนไอโซทรอปิก	Anisotropic
ไอโซทรอปิก	Isotropic
ไฮดราซีน	Hydrazine
ไฮโดรไลซิส	Hydrolysis

# บทที่ 1

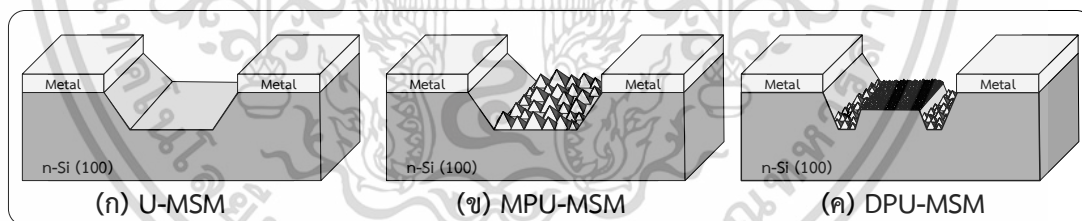
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

เทคโนโลยีระบบไฟฟ้าเครื่องกลจุลภาค หรือ “เมมส์” (Micro Electro Mechanical Systems: MEMS) เป็นชุดอุปกรณ์ขนาดเล็กที่รวมระบบกลไกเข้ากับระบบวงจรรวมทางอิเล็กทรอนิกส์ ระบบทั้งสองวางอยู่บนฐานเดียวกัน โดยทั่วไปนิยมใช้ซิลิคอนเป็นฐานสำหรับวงจรรวม เนื่องจากซิลิคอนมีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ ทนต่อความร้อนได้ดี ค่าสัมประสิทธิ์การดัดตัวของวัสดุซิลิคอนมีค่าการเปลี่ยนแปลงตามความยาวคลื่นแสง โดยความยาวคลื่นที่มีการดัดคลื่นแสงได้ดีเนื่องจากย่านนี้มีความเข้มแสงสูงสุด [1] กระบวนการผลิต MEMS วิวัฒนาการมาจากเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตอุปกรณ์เซมิคอนดักเตอร์ โดยใช้กันอย่างแพร่หลายในอุปกรณ์หลายประเภท เช่น เซนเซอร์วัดอัตราการเต้นของหัวใจ เซนเซอร์อัตราเร่ง ไมโครโฟน และอุปกรณ์อื่น ๆ อีกมากมาย [2] อย่างไรก็ตามจำเป็นต้องมีองค์ประกอบของอุปกรณ์ MEMS ที่ตอบสนองต่อการเร่งความเร็วอย่างรวดเร็วในอุปกรณ์บางอย่างหนึ่งในนั้น คือ ตัวตรวจวัดแสง หรือ photodetector เป็นอุปกรณ์สำคัญในการวัดการเปลี่ยนแปลงของแสงอย่างรวดเร็ว ตัวตรวจวัดแสงทำงานโดยรับสัญญาณทางแสงที่ได้พลังงานจากโฟตอนของแสงที่เข้ามาเพื่อแปลงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าในอุปกรณ์โฟโตอิเล็กทรอนิกส์เชิงพาณิชย์ [3] ตัวตรวจวัดแสงมีหลายประเภทที่มีโครงสร้างต่างกัน เช่น พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) พี-ไอ-เอ็นโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) อะวาลานช์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode) และโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด (M-S photodiode) เป็นต้น [4] ตัวตรวจวัดแสงแต่ละประเภทมีข้อดีและข้อเสียขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ในการใช้งาน ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal: MSM) เป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงและมีศักยภาพที่นำไปใช้เป็นอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งมีข้อได้เปรียบกว่าตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่น ๆ เพราะว่ามีสัญญาณรบกวนน้อย ความจุไฟฟ้าต่ำ (ระดับ fF) [5] กระบวนการสร้างไม่ยุ่งยากซับซ้อนเนื่องจากขั้วไฟฟ้ามีเพียงชั้นเดียวที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำโดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสขั้วต่อกึ่งสองรอยสัมผัสต่อแบบหันหลังชนกัน (back-to-back Schottky diodes) ข้อดีของการสร้างขั้วไฟฟ้าชั้นเดียวเพื่อลดขั้นตอนในการออกแบบลดความซับซ้อนแบบ ประหยัดเวลาและขั้นตอนการสร้าง โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าอยู่ด้วยกันสองแบบ คือ แบบขั้วไฟฟ้าสั้น (short electrode gap) และขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง (wide electrode gap) [6] ซึ่งจะมีลักษณะการทำงานที่ต่างกัน โดยที่ขั้วไฟฟ้าแบบสั้นไม่สามารถใช้แรงดันควบคุมปริมาณกระแสได้ มีข้อจำกัดในขั้นตอนการสร้างลดความ แต่สำหรับขั้วไฟฟ้าแบบกว้างจะสามารถใช้แรงดันควบคุมปริมาณกระแสได้ และง่ายต่อกระบวนการสร้าง อย่างไรก็ตามโครงสร้าง MSM มีกระแสรั่วไหลสูงและประสิทธิภาพควอนตัมต่ำมาก [7]

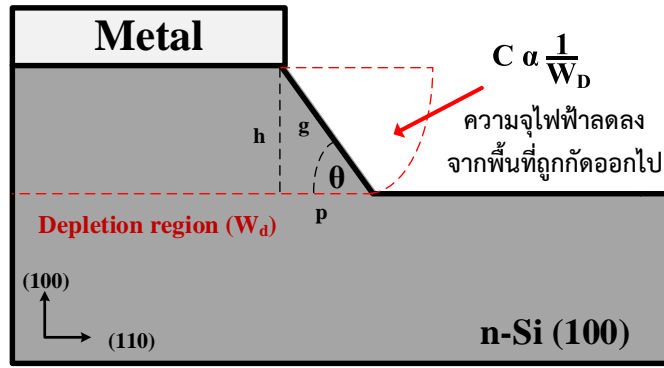
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ผ่านมาได้มีศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) ได้รับการศึกษาอย่างกว้างขวางโดยใช้กระบวนการสร้าง MEMS การพัฒนามุ่งเน้นการเพิ่มพื้นที่ใช้งานในส่วน of พื้นที่รับสัญญาณแสงจากกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก โดยพื้นที่รับแสงของโครงสร้าง MSM ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น เมื่อเร็ว ๆ นี้ มีบทความงานวิจัยได้มีการสรุปเกี่ยวกับอุปกรณ์โฟโตอิเล็กทรอนิกส์โดยสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ โดยมีฐานรองเป็นซิลิคอนชนิดพีระนาบ (100) ซึ่งปรับปรุงจากการสร้างขั้วไฟฟ้าเป็นร่องรูปตัวยู (U-grooved electrodes) สำหรับตัวตรวจวัดแสงของบทความนี้ได้สนามไฟฟ้าด้านที่แข็งแกร่งกว่าในบริเวณการดูดกลืนแสงทำให้ได้ประสิทธิภาพควอนตัมสูงขึ้น [6] อย่างไรก็ตามการสร้างขั้วไฟฟ้าเป็นร่องรูปตัวยูนั้นมีการสร้างที่ซับซ้อน งานวิจัยนี้จึงได้นำแนวคิดดังกล่าวมาประยุกต์กับตัวตรวจวัดแสงในส่วนของการเพิ่มพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองโดยการสร้างร่องรูปตัวยูภายในพื้นที่รับสัญญาณแสงเพื่อดักแสงตกกระทบหรือเพิ่มการดูดกลืนของแสงให้แก่ตัวอุปกรณ์ การสร้างเพิ่มพื้นที่รับแสงในส่วนนี้ทำให้เราสามารถสร้างได้ด้วยกระบวนการผลิตที่ไม่ซับซ้อนและมีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพง โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงจากการกัดเป็นร่องรูปตัวยูนี้ได้มีการออกแบบโดยแบ่งออกเป็นสามโครงสร้าง นั่นคือ โครงสร้างแบบราบเรียบภายในร่องรูปตัวยู (U-shaped Metal-Semiconductor-Metal structure: U-MSM) โครงสร้างแบบพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู (Micro-Pyramids on U-shaped Metal-Semiconductor-Metal structure: MPU-MSM) และโครงสร้างแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู (Double-Pyramid on U-shaped Metal-Semiconductor-Metal structure: DPU-MSM) ดังแสดงในรูปที่ 1.1



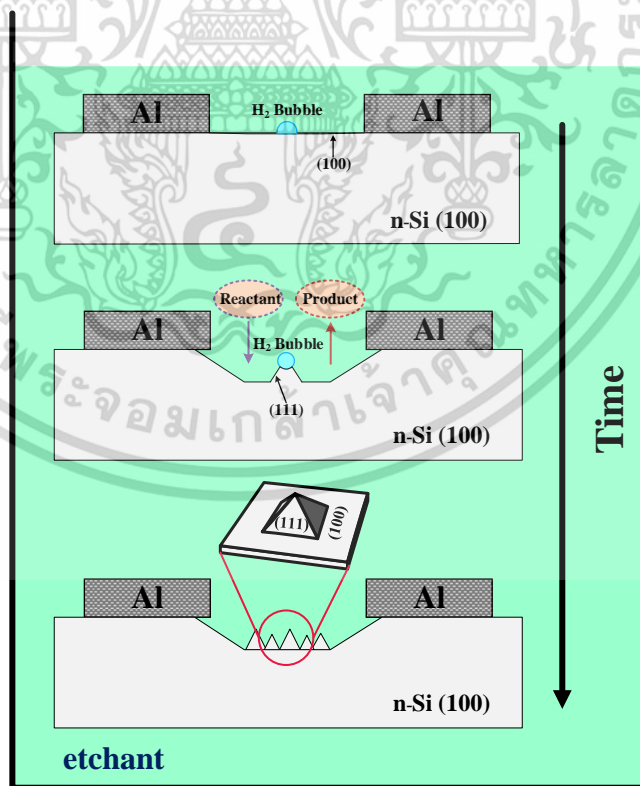
รูปที่ 1.1 ภาคตัดขวางของโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง (ก) ตัวตรวจวัดแสงแบบราบเรียบภายในร่องรูปตัวยู (ข) ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู และ (ค) ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู

นอกจากนี้ผลจากการศึกษาโครงสร้างที่ผ่านการกัดทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลงจากการสูญเสียพื้นที่ที่ถูกกัดออกไป จากความสัมพันธ์ของความจุไฟฟ้าดังในรูปที่ 1.2 จะเห็นได้ว่าค่าความจุไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ ( $W_0$ ) ดังนั้น เมื่อสูญเสียพื้นที่บางส่วน ความจุไฟฟ้าจะลดลงตามความลึกของโครงสร้างร่องรูปตัวยูซึ่งเป็นข้อได้เปรียบของตัวตรวจวัดแสงทั้งสามโครงสร้างนี้



รูปที่ 1.2 ภาคตัดขวางตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างที่ถูกกัดสัมพันธ์กับค่าความจุไฟฟ้า

พริสมิตแบบสุ่มที่เกิดบนพื้นผิวซิลิคอนเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาในระหว่างการกัดของสารละลายที่ใช้กัด (etchant) กัดไปพบจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอน (กักระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111)) เกิดการทำปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลายที่จะทำให้เกิดอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $\text{OH}^-$ ) [8-9] โดยอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนนี้จะไปจับตัวกับอะตอมของซิลิคอน จะทำให้เกิดสารใหม่ที่เรียกว่า กรดออร์โธซิลิก โดยกรดออร์โธซิลิกนี้จะแตกตัวเพื่อรวมกับน้ำทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ( $\text{H}_2$ ) ฟองแก๊สไฮโดรเจนก่อตัวบนพื้นผิวซิลิคอนเปรียบเสมือนเป็นหน้ากากป้องกันกัด [10] ดังแสดงในรูปที่ 1.3 จนทำให้เกิดพริสมิตขึ้นมาได้



รูปที่ 1.3 แบบจำลองการเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนบนผิวหน้าซิลิคอนขณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

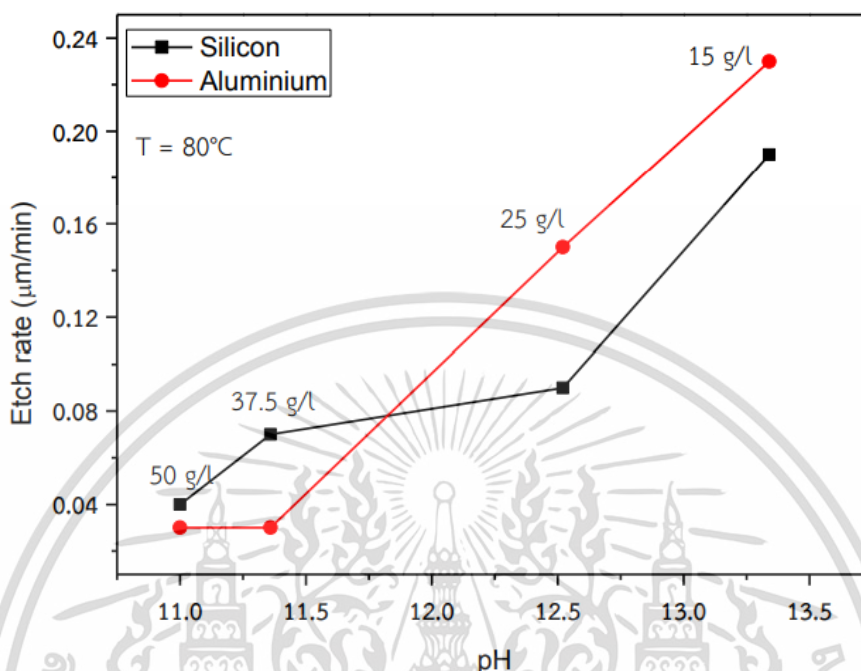
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในส่วนของการละลายที่ใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) มีอยู่หลายชนิดโดยส่วนมาก ได้แก่ สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ซึ่งไม่เป็นพิษและไม่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ต้นทุนต่ำ ใช้ความเป็นต่างไฮดรอกไซด์ของสารละลายในการกัดซิลิคอน และมีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซทรอปิกในระดับสูง แต่สารละลาย KOH มีอัตราการกัดโลหะอะลูมิเนียมอย่างรวดเร็วจึงไม่นิยมใช้ในงาน CMOS รวมถึงสารละลาย KOH ยังทิ้งโพแทสเซียมไอออน ( $K^+$ ) บนพื้นผิวที่มีผลกระทบต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ [11] โดยสารละลายที่นิยมใช้สำหรับกระบวนการผลิตด้าน MEMS คือ สารละลายเอธิลีนไดอะมีนไพโรคาทิกอล (EDP) เป็นสารละลายไดอะมีนที่เป็นพื้นฐานในการกัดซิลิคอน มีอัตราการกัดซิลิคอนระดับปานกลาง การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในระดับต่ำ ดังนั้นจึงใช้ในการผลิตแบบ CMOS [12] อย่างไรก็ตามสารละลาย EDP ละเอียดอย่างรวดเร็วจนขณะทำการกัด สารละลายนี้เป็นก๊าซพิษซึ่งเป็นอันตรายต่อสุขภาพโดยต้องคำนึงถึงความปลอดภัยเป็นพิเศษจึงจำเป็นต้องใช้เครื่องมือที่ราคาแพง เนื่องจากกระบวนการสร้างมีความซับซ้อนและต้องมีผู้เชี่ยวชาญคอยดูแลระหว่างขั้นตอนการผลิต สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอนซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้ว่าจะมีราคาสูง เพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษและสามารถใช้ร่วมกับวงจรรวม (IC) และงาน CMOS ได้ [13] อย่างไรก็ตามสารละลาย TMAH มีความเป็นด่างที่สามารถกัดอะลูมิเนียมได้อย่างรวดเร็ว แต่เมื่อมีการเติมสารเติมแต่งการกัดลงในสารละลาย TMAH ด้วยผงซิลิคอนหรือกรดซิลิซิกในปริมาณที่เหมาะสมจะลดอัตราการกัดของอะลูมิเนียมลงได้ นอกเหนือจากนี้การใช้สารละลาย TMAH ผสมกับสารเติมแต่งการกัดของแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (AP) จะช่วยให้ลดความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนหลังผ่านการกัด [14] ซึ่งมีตัวอย่างของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องดังนี้

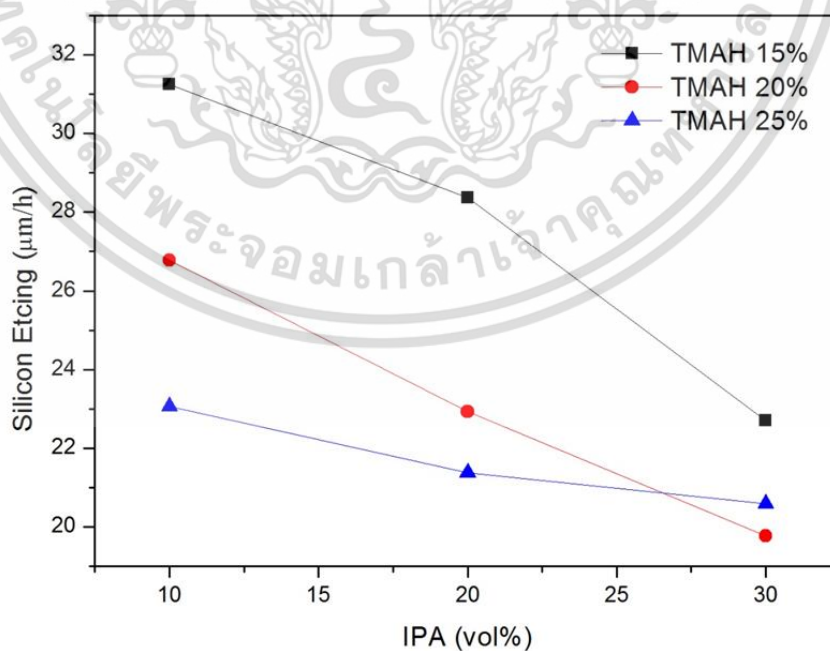
ในปี พ.ศ. 2559 มีการศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปด้วยโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ในบทความนี้ได้นำเสนอการหาอัตราส่วนผสมของสารละลาย TMAH ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในรูปแบบโครงสร้างที่เป็นร่องรูปด้วย โดยมีขั้วไฟฟ้าเป็นอะลูมิเนียม ซึ่งงานวิจัยนี้ทำเงื่อนไขการเติมผงซิลิคอนปริมาณ 37.5 กรัมต่อลิตร ลงไปในสารละลาย TMAH เพื่อลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมลง ดังแสดงในรูปที่ 1.4 นอกเหนือจากนี้ผลจากการเติมผงซิลิคอนส่งผลให้ลดอัตราการกัดซิลิคอนลง อย่างไรก็ตามเงื่อนไขที่ใช้ในการทดลองนี้พบว่าพื้นผิวซิลิคอนขรุขระภายในร่องรูปด้วยและมีพริมาตรแบบสุ่มเกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอน [15]

ในปี พ.ศ. 2560 ได้มีบทความเกี่ยวกับการกัดพื้นผิวเรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย ในงานวิจัยพบว่าการใช้ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol: IPA) หรือสารลดแรงตึงผิวร่วมกับสารละลาย TMAH เพื่อเป็นการช่วยให้ผิวสัมผัสของแผ่นซิลิคอนกับสารละลายดีขึ้นและลดการเกาะของฟองก๊าซไฮโดรเจนบนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนทำให้ได้โครงสร้างร่องรูปด้วยที่มีพื้นผิวภายในร่องราบเรียบ นอกจากนี้ปริมาณของ

สารละลายเพิ่มขึ้นมีผลต่อความเข้มข้นในระบบจะลดลงทำให้การแตกตัวของไอออนไฮดรอกไซด์ลดลงไป จึงส่งผลกระทบต่ออัตราการกัดแผ่นซิลิคอนนั้นลดน้อยลงไปด้วย ดังแสดงในรูปที่ 1.5 [16]



รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเป็นกรด-ด่าง กับอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนและอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH โดยมีผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ [15]

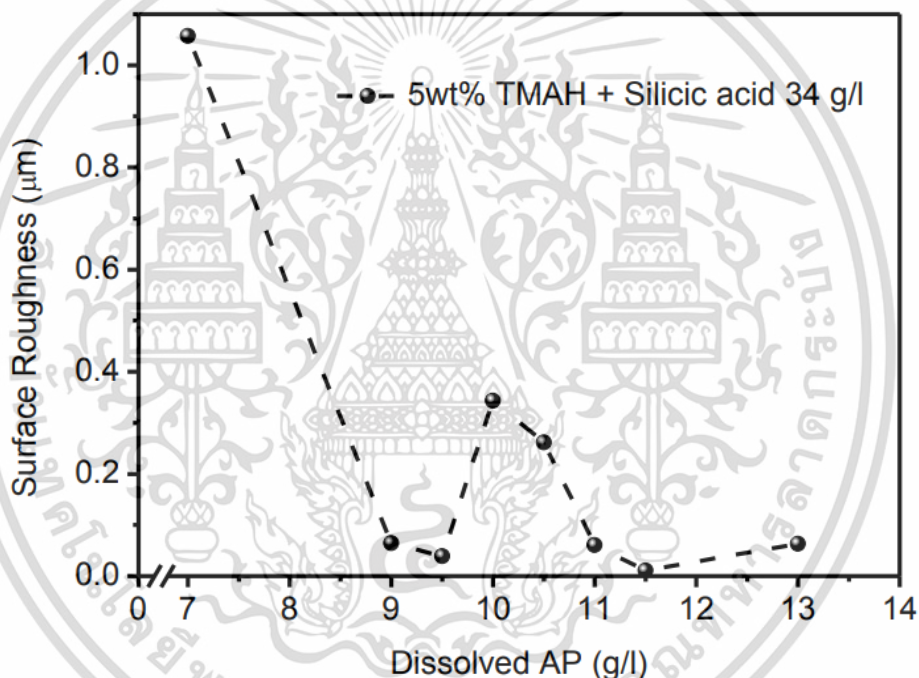


รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดแผ่นซิลิคอนที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ในสารละลาย

TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ [16]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในปี พ.ศ. 2561 มีการศึกษาการลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอน โดยใช้คู่สารเจือของสารละลาย TMAH สำหรับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต ในบทความนี้ได้นำเสนอการหาเงื่อนไขของสารละลายที่เหมาะสมของอัตราส่วนระหว่างแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์และกรดซิลิซิกที่ใช้ร่วมกับสารละลาย TMAH เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างร่องรูปตัวยูแบบอินเทอร์ดิเจิต ในรูปที่ 1.6 เป็นผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่าเงื่อนไขของคู่สารเจือของสารละลาย TMAH นี้สามารถลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมได้ถึง 99.85 % เปรียบเทียบกับสารละลาย TMAH ที่ไม่มีคู่สารเจือ และผลของการใช้สารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ทำให้พื้นผิวซิลิคอนภายในร่องรูปตัวยูมีความขรุขระน้อย เนื่องจากการเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์เป็นการเพิ่มปริมาณไฮดรอกซิลไอออนให้กับระบบจึงเกิดการแทนที่ของไฮโดรเจนไอออนทำให้เกิดการแตกตัวเป็นฟองก๊าซไฮโดรเจนไปเกาะบนพื้นผิวได้น้อยลง [17]



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดกับปริมาณสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ไฮดรอกไซด์ (AP) ในเงื่อนไขต่างๆ ที่ทำการเติมลงในสารตั้งต้น [17]

ดังนั้นวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการพัฒนากระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โดยออกแบบโครงสร้างรูปร่างที่แตกต่างกัน ได้แก่ โครงสร้างแรกเป็นการออกแบบร่องรูปตัวยูที่ภายในมีพื้นที่ราบเรียบ โครงสร้างที่สองเป็นการออกแบบร่องรูปตัวยูที่ภายในมีพีระมิด และโครงสร้างสุดท้ายเป็นการออกแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งได้พัฒนาต่อจากงานวิจัยที่ได้กล่าวข้างต้น จากการออกแบบกระบวนการสร้างในขั้นตอนการกัดได้แบ่งเงื่อนไขการกัดออกเป็นสองวิธี คือ แบบแรกเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ครั้งเดียว (single anisotropic etching) โดยมีสารละลายที่ใช้กัดได้แก่ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (tetramethyl ammonium hydroxide: TMAH) การใช้สารละลาย TMAH เติมด้วยสารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิก (silicic acid) และสารเติมแต่งการกัดของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (ammonium peroxodisulfate: AP) และแบบที่สองเป็นการกัดแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้ง (repetitive anisotropic etching) ร่วมกับเทคนิคการปรับซ็อนตัวเอง (self-aligned) เทคนิคนี้จะช่วยให้เราสามารถลดกระบวนการสร้างบ้างขั้นตอนลงได้จากการกัดโครงสร้างสองครั้งผ่านชั้นอะลูมิเนียมก่อนถึงผิวซิลิคอนทดแทนการสร้างหน้ากากป้องกันการกัดซ็อนทับหลายครั้ง หรือไม่ต้องใช้การปรับซ็อนมาร์กหลายครั้ง และเงื่อนไขสารละลายที่ใช้กัด คือ สารละลาย TMAH (กัดครั้งที่หนึ่ง) และกัดซ้ำต่ออีกครั้งด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยสารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิก (กัดครั้งที่สอง) เป็นต้น

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้มุ่งเน้นลดขั้นตอนการสร้างชั้นหน้ากากป้องกันการซ็อนทับหลายครั้งจากการกัดโครงสร้าง เพื่อลดต้นทุนการผลิตและลดเวลาในการสร้างโครงสร้างบางส่วน รวมถึงลดความเสียหายของตัวอุปกรณ์ที่เกิดจากการสร้างลวดลายซ็อนทับขึ้นงานหลายครั้ง และเป้าหมายที่สำคัญนั่นคือ การเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดเพื่อให้ตัวอุปกรณ์รับสัญญาณแสงได้มากขึ้น ทำให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น รวมถึงการสร้างพื้นผิวที่สามารถลดการสะท้อนกลับหรือลดการสูญเสียของแสงและดูดกลืนแสงได้ดียิ่งขึ้นซึ่งจะส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสง หากสมมติฐานนี้เป็นจริงจะก่อให้เกิดประโยชน์หลายประการและอาจต่อยอดพัฒนาไปสู่กระบวนการกัดเปียกด้วยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเองเพื่อปรับปรุงโครงสร้างในส่วนองพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์อื่นๆ ที่อาจมีการตอบสนองทางแสงไม่สูงให้กลับมามีประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นหรือนำไปใช้ในงานลักษณะอื่นแทนได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับกระบวนการเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH และสารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิกและสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตเพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างต่างๆ โดยเลือกซ์ไฟฟ้าโลหะเป็นอะลูมิเนียม (aluminum: Al) และสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น ะนาบ (100) โดยมีวัตถุประสงค์ในการศึกษาดังต่อไปนี้

1. ศึกษาการหาเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่ได้ออกแบบไว้ในส่วนของพื้นที่รับสัญญาณแสง โดยพิจารณาจากอัตราการกัดซิลิคอน อัตราการกัดอะลูมิเนียม และลักษณะพื้นผิวซิลิคอน
2. ศึกษาขั้นตอนการสร้างโครงสร้างและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติที่สำคัญแต่ละโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่มีผลต่อประสิทธิภาพที่แตกต่างกัน
3. ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่มีผลต่อกระแสและแรงดันในสัญญาณแสงแบบกระแสตรง (dc) และแบบกระแสสลับ (ac)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. ศึกษาความแตกต่างของการทดสอบสมบัติทางแสงโดยทำการเปรียบเทียบแต่ละโครงสร้าง เพื่อให้ได้โครงสร้างที่เหมาะสมสำหรับการนำมาผลิตเป็นตัวตรวจวัดแสง

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้มีขอบเขตอยู่ที่การออกแบบและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบสองรอยสัมผัสชนิดทึบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ที่มีสารกึ่งตัวนำเป็นซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ระบาย (100) มีสภาพต้านทาน 5-10  $\Omega$ .cm และอะลูมิเนียมเป็นขั้วโลหะที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองขนาด 100  $\mu$ m และมีขนาดขั้วไฟฟ้า  $1 \times 1$  mm<sup>2</sup> ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงตามลวดลายต้นแบบที่ได้ออกแบบไว้ และเข้าสู่กระบวนการกัดโครงสร้างจากการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยวิธีการกัดแบบครั้งเดียว และการกัดแบบซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ้อนตัวเอง โดยเลือกใช้สารละลาย TMAH และสารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิกและสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด 80 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องกวสสารละลายหมุนด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที ส่วนสุดท้ายนำอุปกรณ์มาทำการทดสอบลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางไฟฟ้าของคุณสมบัติกระแส-แรงดัน รวมถึงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดัน จากนั้นทดสอบลักษณะทางแสงแบบกระแสตรงและแบบกระแสสลับภายใต้เงื่อนไขการให้แสงตกกระทบด้วยแหล่งกำเนิดเป็นเลเซอร์ไดโอดที่มีกำลังงาน 2.68 mW ความยาวคลื่น 670 nm ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์ที่มีขนาด 400 mV<sub>pp</sub> เข้ากับเลเซอร์ที่มีความถี่อยู่ในช่วง 100 Hz-16 MHz โดยทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้าง

### 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
2. ศึกษากระบวนการสร้างและออกแบบโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแต่ละแบบ
3. ศึกษาสารละลายที่ใช้กัดเพื่อนำไปกำหนดเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการสร้างโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al
4. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและลักษณะทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้าง
5. ศึกษาเกี่ยวกับเทคนิคการวัดและวิธีการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางแสงของตัวตรวจวัดแสงและสรุปผลการทดลอง

### 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีและเรียนรู้กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงในโครงสร้างต่างๆ จากกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกร่วมกับเทคนิคการปรับซ้อนตัวเอง โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทที่ 1** บทนำ กล่าวถึงความเป็นมาและความสำคัญของจุดเริ่มต้นการสร้างตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้าง ในหัวข้อถัดมา คือ วัตถุประสงค์ของการศึกษาตัวตรวจวัดแสง ชนิด Al/n-Si/Al ขอบเขตของงานวิจัย และส่วนสุดท้าย คือ ขั้นตอนของงานวิจัยและวิธีการดำเนินงานในครั้งนี้

**บทที่ 2** ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง เป็นการกล่าวถึงชนิดของตัวตรวจวัดแสงโดยมีการเปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของแต่ละชนิด จากนั้นกล่าวถึงคุณลักษณะสำคัญของตัวตรวจวัดแสง รวมทั้งได้อธิบายตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญสำหรับงานวิจัยนี้ ในตอนท้ายเป็นหัวข้อกระบวนการกัณฑ์ที่กล่าวถึงลักษณะการกัณฑ์แต่ละแบบรวมถึงคุณลักษณะของสารเคมีและปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นในระหว่างการกัณฑ์

**บทที่ 3** การออกแบบและกระบวนการสร้างประกอบด้วย การเตรียมชิ้นงานและเลือกเงื่อนไขงานวิจัย การออกแบบลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง กระบวนการสร้างซึ่งกล่าวถึงขั้นตอนที่สำคัญของกระบวนการผลิตตัวตรวจวัดแสง เช่น ขั้นตอนการสร้างลวดลายด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เทคนิคการกัณฑ์ และการเตรียมสารละลายที่ใช้กัณฑ์ เป็นต้น จากนั้นนำไปการทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงที่สำคัญไว้พอสังเขป

**บทที่ 4** ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งประกอบด้วยสองหัวข้อหลักที่สำคัญได้แก่ การศึกษาลักษณะทางกายของตัวตรวจวัดแสงซึ่งจะกล่าวถึงการเลือกเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้ในการกัณฑ์โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแต่ละแบบที่ได้จากการพิจารณาอัตราการกัณฑ์ ลักษณะพื้นผิวและลักษณะโครงสร้าง และส่วนสุดท้ายของบทกล่าวถึงการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงทั้งแบบสัญญาณแสงกระแสตรงและแบบสัญญาณแสงกระแสสลับโดยทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแต่ละโครงสร้าง

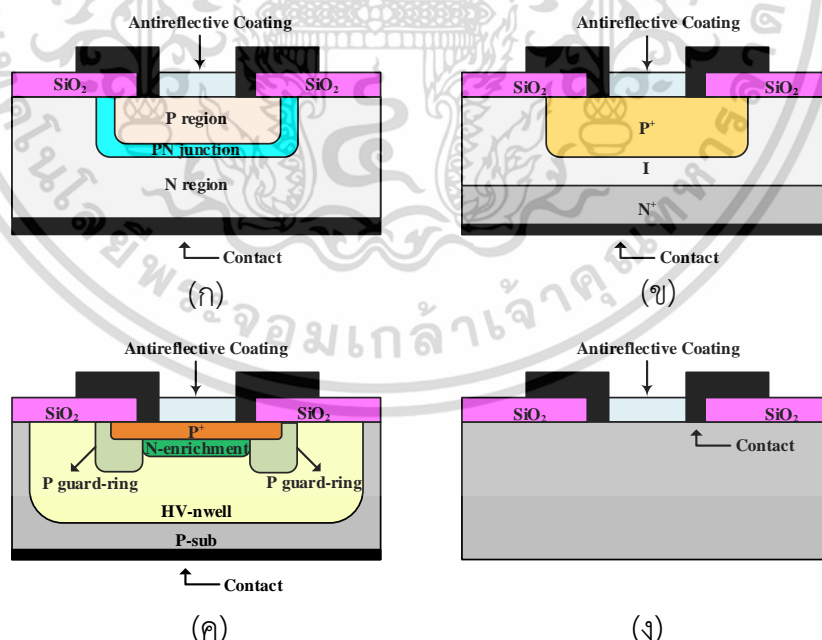
**บทที่ 5** สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองที่ได้ทำ โดยมีข้อเสนอแนะที่เกี่ยวกับงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาและการประยุกต์ใช้สำหรับงานวิจัยในอนาคตต่อไป

## บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ตัวตรวจวัดแสง (Photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญส่วนหนึ่งในระบบการสื่อสาร ทำงานโดยแปลงสัญญาณทางแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า และเอาสัญญาณนั้นเข้าวงจรขยายเพื่อนำไปใช้งานต่อไป จากบทบาทที่สำคัญยิ่งของตัวตรวจวัดแสงในระบบทำให้เราต้องเข้าใจถึงหลักการทำงาน และคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง โดยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยมีดังต่อไปนี้ ส่วนแรกจะกล่าวถึงชนิดของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างและหลักการทำงานที่แตกต่างกัน ต่อมาจะกล่าวถึงคุณลักษณะของตัวตรวจวัดแสง จากนั้นได้กล่าวถึงตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ในหัวข้อถัดมากล่าวถึงกระบวนการกัด และในส่วนสุดท้ายกล่าวถึงโครงสร้างภายในตัวตรวจวัดแสง

### 2.1 ชนิดของตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงที่สร้างจากสารกึ่งตัวนำที่ใช้งานกันมากในปัจจุบันมีอยู่ 2 กลุ่ม คือ โฟโตคอนดักเตอร์ และโฟโตไดโอด ในกรณีของโฟโตไดโอดยังสามารถแบ่งตามลักษณะของโครงสร้างได้หลายชนิด เช่น p-n โฟโตไดโอด p-i-n โฟโตไดโอด อะวาลานซ์โฟโตไดโอด และโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด เป็นต้น [18] ดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่าง ๆ [18]

(ก) p-n โฟโตไดโอด

(ข) p-i-n โฟโตไดโอด

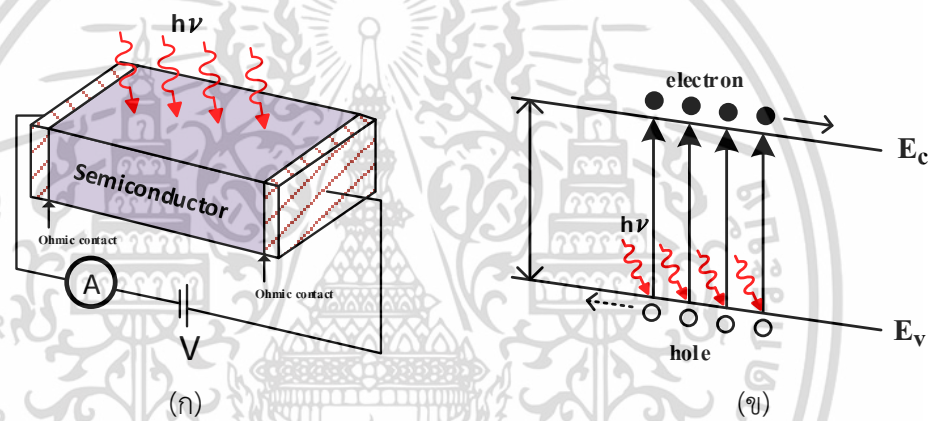
(ค) อะวาลานซ์โฟโตไดโอด

(ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.1.1 โฟโตคอนดักเตอร์

โฟโตคอนดักเตอร์เป็นสิ่งประดิษฐ์ตรวจวัดแสงที่ง่ายที่สุด เพราะเพียงแค่ใช้สารกึ่งตัวนำเพียงชนิดเดียว เมื่อมีแสงตกกระทบที่โฟโตคอนดักเตอร์จะทำให้ค่าความต้านทานมีค่าลดลง ดังนั้นในการใช้งานจะป้อนแรงดันไบอัสให้แก่โฟโตคอนดักเตอร์ แล้วทำการวัดการเปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานขณะที่ได้รับแสง [19] โดยทั่วไปโฟโตคอนดักเตอร์จะประกอบด้วยขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว โดยที่รอยสัมผัสของขั้วไฟฟ้าทั้งสองจะแสดงคุณสมบัติแบบโอห์มิก ในรูปที่ 2.2(ก) แสดงหลักการทำงานของโฟโตคอนดักเตอร์ในขณะที่ป้อนแรงดันไฟฟ้าผ่านขั้วโอห์มิกทั้ง 2 ขั้ว และเมื่อฉายแสงแก่โฟโตคอนดักเตอร์อิเล็กตรอนที่อยู่ในแถบเวเลนซ์จะได้รับพลังงานจากแสงและถูกกระตุ้นให้กระโดดขึ้นไปบนแถบนำไฟฟ้า ดังแสดงในรูปที่ 2.2(ข)



รูปที่ 2.2 (ก) โครงสร้างพื้นฐานของโฟโตคอนดักเตอร์ และการให้แรงดันไบอัส

(ข) กลไกการเกิดพาหะในโฟโตคอนดักเตอร์ เมื่อได้รับการฉายแสง

คุณสมบัติเด่นของตัวตรวจวัดแสงแบบโฟโตคอนดักเตอร์มีโครงสร้างที่สร้างได้ง่ายและทำให้มีราคาถูก [20] แต่ข้อเสียเปรียบของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้ คือ การตอบสนองเวลาที่ล่าช้า ซึ่งโดยทั่วไปใช้เวลานานในระดับมิลลิวินาที (ms) ถึงไมโครวินาที ( $\mu\text{s}$ ) ทั้งนี้เพราะว่าการเปลี่ยนแปลงค่าของสภาพการนำไฟฟ้าถูกกำหนดด้วยผลคูณของสภาพคล่องและเวลาอายุของพาหะนั้นคือ  $\mu\tau$

### 2.1.2 โฟโตไดโอด

โครงสร้าง p-n และ p-i-n โฟโตไดโอดเป็นโฟโตไดโอดอย่างง่ายที่สุด เมื่อ p-n โฟโตไดโอดที่ด้านรับแสงเป็นสารกึ่งตัวนำชนิด p และต่อกับสารกึ่งตัวนำชนิด n และที่รอยต่อ p-n นี้จะทำหน้าที่เป็นส่วนเปลี่ยนแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้าด้วยกระบวนการโฟโตโวลตาอิกที่บริเวณตรงกลางรอยต่อ p-n จะเกิดบริเวณปลอดพาหะขึ้น ในการสร้างโฟโตไดโอดจะต้องมีการเอกสตรานี้เป็นเอกสตรานี้ที่สวอนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมปริมาณของสารเจือ และความหนาของชั้น  $p$  และชั้น  $n$  ให้เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้ไดโอดมีความไวต่อแสงในช่วงที่ต้องการได้ รวมถึงความสามารถในการทำงานที่ความถี่สูงด้วย เมื่อมีแสงตกกระทบ  $p$ - $n$  โฟโตไดโอด โดยที่พลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าช่องว่างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu \geq E_g$ ) แล้วแสงจะถูกสารกึ่งตัวนำดูดกลืน โดยที่พลังงานของแสงจะไปกระตุ้นให้อิเล็กตรอนกระโดดจากแถบเวเลนซ์ไปสู่แถบนำไฟฟ้า และที่แถบเวเลนซ์จะเหลือโฮลอยู่ การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลนั้นสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งในชั้น  $p$  บริเวณปลอดพาหะ และชั้น  $n$  ซึ่งอิเล็กตรอนที่เกิดในแถบนำไฟฟ้าในชั้น  $p$  จะแพร่ไปสู่ชั้น  $n$  และอิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นในแถบนำไฟฟ้าที่บริเวณปลอดพาหะจะถูกศักย์ไฟฟ้าภายใน ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น  $n$  ส่วนโฮลก็จะไหลในทิศทางตรงกันข้ามกับอิเล็กตรอน จำนวนการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลแปรโดยตรงกับจำนวนแสงที่สารกึ่งตัวนำดูดกลืน [21] และถ้าต่อ  $p$ - $n$  โฟโตไดโอดเข้ากับวงจรภายนอกแล้วอิเล็กตรอนก็จะไหลออกจากชั้น  $n$  และโฮลจะไหลออกจากชั้น  $p$  เป็นกระแสไฟฟ้าไปสู่วงจรภายนอก คุณสมบัติเด่นของ  $p$ - $n$  โฟโตไดโอด พบว่า จะทำงานได้เร็วกว่าโฟโตคอนดักเตอร์ และมีสัญญาณรบกวนต่ำ อย่างไรก็ตามในการประยุกต์ใช้งานบางประเภท ซึ่งต้องทำงานด้วยความเร็วสูงมาก ๆ แต่  $p$ - $n$  โฟโตไดโอดไม่สามารถตอบสนองได้ ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงชนิด  $p$ - $i$ - $n$  โฟโตไดโอดจะมีความเหมาะสมกว่า เนื่องจากความแตกต่างของโครงสร้างทั้งสอง ซึ่ง  $p$ - $i$ - $n$  โฟโตไดโอดมีชั้นอินทรีนซิก (ชั้นสารกึ่งตัวนำชนิดบริสุทธิ์:  $i$ ) คั่นระหว่างชั้น  $p$  และชั้น  $n$  จากการที่มีชั้น  $i$  นี้ จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของรอยต่อมีค่าน้อย ส่งผลให้มีการตอบสนองด้านเวลาได้รวดเร็วมาก (ultra-fast response speed) ถึงระดับพิโควินาที (ps) [22] นอกจากการตอบสนองเวลาได้รวดเร็วแล้ว โครงสร้าง  $p$ - $i$ - $n$  โฟโตไดโอดยังมีประสิทธิภาพควอนตัมสูงกว่า  $p$ - $n$  โฟโตไดโอด เนื่องจากมีชั้นดูดกลืนแสง ( $i$ ) กว้าง ดังนั้นปัจจุบันนี้จึงมีการใช้งาน  $p$ - $i$ - $n$  โฟโตไดโอดกันอย่างแพร่หลายทั้งในระบบการสื่อสารความเร็วสูงด้วยแสงเลเซอร์และงานทั่ว ๆ ไป อย่างไรก็ตามข้อด้อยของโครงสร้าง  $p$ - $i$ - $n$  โฟโตไดโอด คือ ถ้าสร้างให้มีพื้นที่ใหญ่จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง และกระบวนการสร้างของ  $p$ - $i$ - $n$  โฟโตไดโอดมีความยุ่งยาก เนื่องจากต้องสร้างชั้น  $i$  ให้มีความบริสุทธิ์ และต้องมีความหนาที่เหมาะสมด้วย

อะวาลานซ์โฟโตไดโอด หรือ APD คือโฟโตไดโอดที่ทำงานด้วยปรากฏการณ์อะวาลานซ์ (Avalanche effect) ซึ่งทำงานภายใต้การไบอัสย้อนกลับด้วยแรงดันไฟฟ้าที่สูงมากจนสามารถเร่งพาหะที่เกิดจากแสงให้วิ่งไปชนอะตอมในผลึกจนเกิดการแตกตัวเป็นไอออน และเกิดอิเล็กตรอนชุดที่สอง (secondary electron) เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก [23] ดังนั้น APD จึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่สามารถขยายสัญญาณกระแสแสงได้ ทำให้สามารถตอบสนองต่อสัญญาณแสงที่มีกำลังต่ำมาก ๆ ได้ดี อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างที่มีความจุไฟฟ้าต่ำด้วย ดังนั้นจึงสามารถตอบสนองต่อสัญญาณแสงได้รวดเร็วมาก โครงสร้างพื้นฐานและหลักการทำงานของ APD จะคล้ายกับกรณีของ  $p$ - $i$ - $n$  โฟโตไดโอด ซึ่งมี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ส่วนที่แตกต่างกันตรงที่ APD จะมีการขยายสัญญาณอยู่ด้วย ถ้าให้แสงตกกระทบเข้ามาในชั้น  $p^+$  แสงจะถูกดูดกลืนในชั้นบริเวณปลอดพาหะ และเมื่อให้แรงดันไบอัสแบบย้อนกลับแก่อุปกรณ์ อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปยังชั้น  $n^+$  และโฮลจะเคลื่อนที่ไปสู่ชั้น  $p^+$  ในการสร้างอุปกรณ์ชั้น (สารกึ่งตัวนำชนิด  $p$  ที่ถูกโด๊ปอย่างเจือจาง: lightly doped semiconductor) จะมีความต้านทานสูงกว่าชั้น  $p$  และชั้น  $p^+$  ดังนั้นสนามไฟฟ้าที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่จะไปตกคร่อมที่ชั้น  $p$  มากที่สุดเป็นผลให้อิเล็กตรอนและโฮลที่ถูกฉีดให้เข้ามาสู่ชั้น  $p$  จะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าที่สูงมากนี้ และวิ่งไปชนกับโครงร่างผลึก และทำให้เกิดตัวเกิดเป็นไอออน ซึ่งจะกระตุ้นอิเล็กตรอนกระโดดขึ้นสู่แถบนำไฟฟ้าและเกิดโฮลขึ้นใหม่ในแถบเวเลนซ์และจะเกิดปรากฏการณ์นี้ซ้ำ ๆ ตลอดเวลาที่ป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับ จึงทำให้เกิดพาหะอิสระเป็นจำนวนมากมาย ส่งผลให้กระแสแสงมีค่าสูงขึ้น APD มีข้อเสียเปรียบตรงที่ต้องใช้แรงดันไบอัสที่สูงมาก และสัญญาณเอาพุทมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุท และสนามไฟฟ้าที่ได้จากแรงดันไบอัส นอกจากนี้สัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้นมีค่าสูง [24] เนื่องจากความสามารถในการขยายสัญญาณภายในตัวเอง

โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด หรือชื่อตัดก็ย่อบริเออร์โฟโตไดโอด สร้างมาจากส่วนประกอบของรอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ ในส่วนของสนามไฟฟ้าที่มีค่าสูงภายใต้แรงดันไบอัสย้อนกลับจะอยู่ที่ส่วนชั้น  $n$  ถ้าเปรียบเทียบกับ  $p-i-n$  โฟโตไดโอดแล้ว โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดจะมีชั้นดูดกลืนแสงแคบกว่า เพื่อให้ค่าเวลาส่งผ่านมีค่าน้อย นอกจากนี้โครงสร้างของโลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอดยังมีค่าของความต้านทานและความจุไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าต่ำ จึงทำให้สามารถใช้งานที่ความถี่มากกว่า 100 GHz อย่างไรก็ตามเนื่องจากชั้นดูดกลืนแสงที่แคบจะส่งผลให้ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าต่ำ ในส่วนของฟิล์มโลหะด้านหน้าต้องมีความบางมาก ( $\approx 100 \text{ \AA}$ ) [25] เพื่อให้แสงสามารถผ่านชั้นโลหะลงไปได้หรืออาจใช้ฟิล์มโลหะโปร่งแสงก็ได้ ซึ่งจะทำให้มีกระบวนการสร้างที่มีความซับซ้อนมากขึ้น นอกจากนี้ผลของระดับพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างพลังงานบริเวณผิวสัมผัสที่เรียกว่า สถานะผิว (surface state) ซึ่งทำหน้าที่เป็นระดับจับอิเล็กตรอน และระดับจับโฮลหรือเป็นศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ จะทำให้คุณสมบัติของรอยสัมผัสเปลี่ยนแปลงไป [4]

ตัวตรวจวัดแสงประเภทโฟโตไดโอดที่กล่าวมาข้างต้นมีโครงสร้างเป็นแบบแนวตั้ง (vertical structure) ทำให้นำไปสร้างเป็นวงจรรวมได้ยากกว่าโครงสร้างแบบพลาแนร์ ซึ่งถ้าสร้างเป็นวงจรรวมแล้วจะทำให้อุปกรณ์มีเสถียรภาพในการทำงานดีขึ้น ราคาลดต่ำลง และอาจมีส่วนประกอบอื่น ๆ ที่สำคัญรวมอยู่ด้วย เช่น วงจรขยายสัญญาณ วงจรเปลี่ยนสัญญาณจากแบบอุปมานเป็นแบบเชิงเลข (analog to digital circuit) วงจรฟิลเตอร์ และวงจรประมวลผลสัญญาณ เป็นต้น [26-27] ดังนั้นการพิจารณาโฟโตไดโอดที่มีความเหมาะสมกับกระบวนการสร้างแบบพลาแนร์ จึงได้ความสนใจเป็นพิเศษ

และพบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะเป็นโฟโตไดโอดชนิดหนึ่งที่มีความเหมาะสมในการศึกษา

ตารางที่ 2.1 ตารางแสดงการเปรียบเทียบลักษณะตัวตรวจวัดแสงแต่ละชนิด

ชนิดของตัวตรวจวัดแสง	ข้อดี	ข้อเสีย
โฟโตคอนดักเตอร์	- กระบวนการสร้างง่าย - ราคาถูก	- การตอบสนองเวลาที่ล่าช้า
p-n โฟโตไดโอด	- สัญญาณรบกวนต่ำ - ทำงานด้วยความเร็วสูง - ทำงานที่ความถี่สูง	- ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าต่ำ
p-i-n โฟโตไดโอด	- ค่าความจุไฟฟ้ามีน้อย - การตอบสนองเวลารวดเร็ว - ประสิทธิภาพควอนตัมสูง	- ถ้าสร้างให้มีพื้นที่ใหญ่จะทำให้มีประสิทธิภาพการทำงานลดต่ำลง - กระบวนการสร้างมีความยุ่งยาก
อะวาลานซ์โฟโตไดโอด	- ความจุไฟฟ้าต่ำ - ตอบสนองต่อสัญญาณแสงได้รวดเร็วมาก - การขยายสัญญาณสูง	- ใช้แรงดันไบอัสสูงมาก - สัญญาณเอาพุทมีลักษณะความเป็นเชิงเส้นที่ไม่ดีเมื่อเทียบกับกำลังของแสงอินพุท - สัญญาณรบกวนมีค่าสูง - กระบวนการสร้างมีความยุ่งยาก
โลหะ-สารกึ่งตัวนำโฟโตไดโอด	- กระบวนการสร้างง่าย - ราคาถูก - ทำงานด้วยความเร็วสูง - ค่าของความต้านทานและความจุไฟฟ้าในโครงสร้างมีค่าต่ำ - สามารถใช้งานที่ความถี่มากกว่า 100 GHz	- ประสิทธิภาพควอนตัมมีค่าต่ำ

## 2.2 คุณลักษณะสำคัญของตัวตรวจวัดแสง

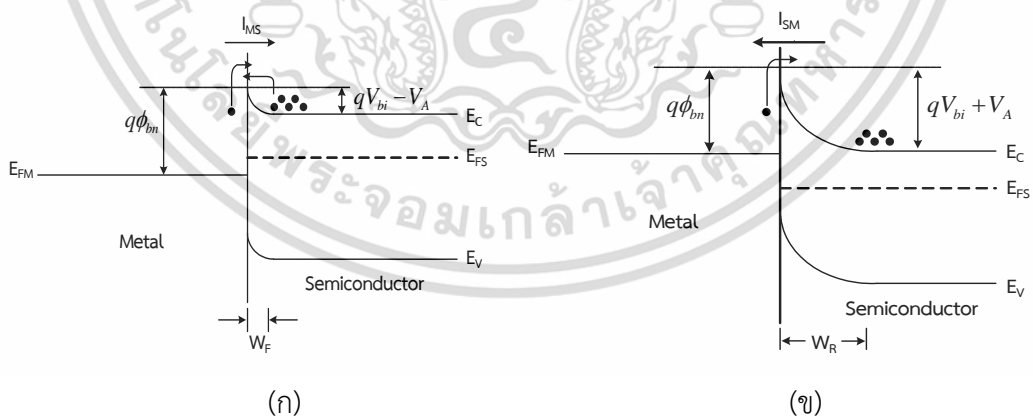
การทำงานของรอยสัมผัสแบบซีออตต์กีแย่งออกได้เป็นสองแบบ คือ การให้แรงดันไบอัสตรง และการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ มีรายละเอียดดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การให้แรงดันไบอัสตรง ( $V_A$ ) แก่รอยสัมผัสโดยให้แรงดันบวกเข้าที่ขั้วอานอด (ด้านโลหะ) และแรงดันลบเข้าที่ขั้วคาโทด (ด้านสารกึ่งตัวนำ) ดังรูปที่ 2.3(ก) ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น  $(V_{bi}-V_A)$  และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านโลหะไปทางด้านสารกึ่งตัวนำ ในขณะที่เดียวกันก็มีอิเล็กตรอนจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงข้อต่อเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากกำแพงข้อต่อมีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลงกับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรง ( $I_F$ ) [28] มีค่าดังสมการที่ 2.1

$$I_F = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \left[ \exp\left(\frac{qV_A}{kT}\right) - 1 \right] \tag{2.1}$$

- เมื่อ
- A คือ พื้นที่รอยสัมผัส ( $\text{cm}^2$ )
  - R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (n-Si) มีค่า  $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$  [16]
  - $\phi_{bn}$  คือ ความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อ (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 2.3 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสข้อต่อ (ก) แรงดันไบอัสตรง และ (ข) แรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ ( $-V_A$ ) แก่รอยสัมผัสโดยให้แรงดันลบเข้าที่ขั้วอานอด (ด้านโลหะ) และแรงดันบวกเข้าที่ขั้วคาโทด (ด้านสารกึ่งตัวนำ) แสดงดังรูปที่ 2.3(ข) กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยามให้นำไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น  $(V_{bi}+V_A)$  และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีอิเล็กตรอนในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อกกีเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล [29] โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ ( $I_R$ ) มีค่าดังสมการที่ 2.2

$$I_R = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bn}}{kT}\right) \quad (2.2)$$

เนื่องจากการนำเอาตัวตรวจวัดแสงหลายชนิดมาประยุกต์ใช้งาน ซึ่งตัวตรวจวัดแสงแต่ละแบบจะมีขีดความสามารถที่แตกต่างกันไปขึ้นกับโครงสร้างและวัสดุที่นำมาใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง อย่างไรก็ตาม ถ้าพิจารณาถึงคุณสมบัติหลัก ๆ ทั่วไปของตัวตรวจวัดแสงเพื่อใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงเปรียบเทียบหรือตัดสินใจนำไปประยุกต์ใช้งานอย่างเหมาะสมคุณสมบัติหลักเหล่านี้ คือ

### 2.2.1 กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง

กระแสแสง (photocurrent) คือ กระแสที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงขณะที่ได้รับแสง กระแสชนิดนี้เกิดจากการดูดกลืนโฟตอน ในตัวตรวจวัดแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ สนามไฟฟ้าในตัวตรวจวัดแสงทำให้พาหะเหล่านี้ เคลื่อนที่ไปยังขั้วโลหะและกลายเป็นกระแสแสงไหลในวงจร

กระแสแสงเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญและบ่งบอกถึงขีดความสามารถในการตรวจวัดแสงปกติค่าของกระแสแสงที่ได้ควรมีค่ามากพอที่จะแสดงนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกระแสมืด โดยทั่วไปขนาดของกระแสแสงขึ้นกับความเข้มแสง พื้นที่รับแสงและประสิทธิภาพในการดูดกลืนแสงของตัวตรวจวัดแสง และค่าของกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงสามารถคำนวณหาค่าได้จากสมการอย่างง่าย ๆ ดังสมการที่ 2.3

$$I_{photo} = -qA(L_n + W + L_p) \times G_L \quad (2.3)$$

โดยที่  $I_{photo}$  คือ กระแสแสง (A)

$A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของไดโอด ( $\text{cm}^2$ )

$W$  คือ ความกว้างของเขตปลอดพาหะ (cm)

$G_L$  คือ อัตราการเกิดพาหะเนื่องจากแสง ( $\text{cm}^{-2}\cdot\text{sec}^{-1}$ )

$L_n$  และ  $L_p$  คือ ระยะการแพร่ของอิเล็กตรอนและโฮล ตามลำดับ (cm)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงที่ดีจะต้องสามารถให้กระแสแสงได้สูง กระแสรวมที่ไหลในวงจรขณะที่ตัวตรวจวัดแสงได้รับแสง เป็นผลรวมของกระแสมืดและกระแสแสง [30] ดังนั้นค่าของกระแสแสง อาจหาได้จากผลต่างของกระแสรวมและกระแสมืด ดังสมการที่ 2.4

$$I_{photo} = I_{total} - I_{dark} \quad (2.4)$$

โดยที่  $I_{photo}$  คือ กระแสแสง (A)

$I_{total}$  คือ กระแสรวม (A)

$I_{dark}$  คือ กระแสมืด (A)

### 2.2.2 ประสิทธิภาพควอนตัม

ประสิทธิภาพควอนตัม (quantum efficiency:  $\eta$ ) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างจำนวนของพาหะอิสระที่เกิดขึ้น (คู่อิเล็กตรอน-โฮล) และทำให้เกิดเป็นกระแสแสง ( $I_p$ ) กับจำนวนโฟตอนที่ตกกระทบ

$$\eta = \frac{I_p / q}{P_{inc} / h\nu} = \frac{I_p \cdot h\nu}{q \cdot P_{inc}} \quad (2.5)$$

โดยที่  $P_{inc}$  คือ กำลังงานของแสงที่ตกกระทบ (W)

$q$  คือ ประจุอิเล็กตรอน (C)

ค่าของ  $\eta$  มีค่าระหว่าง  $0 \leq \eta \leq 1$  สำหรับสมการที่ 2.5 ได้ถูกนิยามว่าเป็นประสิทธิภาพควอนตัมภายนอก (external quantum efficiency:  $\eta_{ext}$ ) [31] ซึ่งประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกจะขึ้นอยู่กับค่าสัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ และความหนาของส่วนดูดกลืนแสง ดังแสดงในสมการที่ 2.6

$$\eta_{ext} = (1 - R)(1 - e^{-\alpha x}) \quad (2.6)$$

จากสมการที่ 2.6 แสดงให้เห็นว่า ถ้าประสิทธิภาพควอนตัมภายนอกมีค่าสูง การเกิดพาหะแสงจะมาก ซึ่งทำให้ตัวตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติที่ดีขึ้น โดยปกติแล้วจะมีค่าประมาณ 0.7-0.8 เพราะแสงส่วนหนึ่งจะถูกสะท้อนออกไป ส่วนประสิทธิภาพควอนตัมภายใน (internal quantum efficiency:  $\eta_{int}$ ) คือ อัตราส่วนระหว่างจำนวนพาหะที่เกิดขึ้นกับจำนวนโฟตอนที่ถูกดูดกลืนภายในสารกึ่งตัวนำโดยปกติจะมีค่าสูงมากจนอาจใกล้เคียงหนึ่ง

### 2.2.3 ความเร็วในการตอบสนอง

ความเร็วในการตอบสนอง หมายถึง ความเร็วในการทำงานของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นเวลาที่นับตั้งแต่การเกิดพาหะด้วยแสงจนกระทั่งมีกระแสไฟฟ้าเอาท์พุทไหลออกสู่วงจรภายนอก ตามปกตินิยมแสดงด้วยค่าช่วงเวลาขาขึ้น ( $t_r$ ) และช่วงเวลาขาลง ( $t_f$ )

ช่วงเวลาขาขึ้นและช่วงเวลาขาลงจะมีค่ามากหรือน้อยขึ้นกับแพ็คเกจอร์ดังนี้

- (1) เวลาส่งผ่าน (transit time) ที่พาหะใช้ในการวิ่งผ่านชั้นบริเวณปลอดพาหะ
- (2) เวลาการแพร่ (diffusion time) ของพาหะที่เกิดขึ้นภายนอกบริเวณปลอดพาหะ
- (3) ค่าคงที่ของเวลา (time constant) เป็นผลคูณของค่าความจุไฟฟ้าของโพโตไดโอดกับค่าโหลดความต้านทานภายนอก

ดังนั้นถ้าต้องการให้โพโตไดโอดตอบสนองความถี่เร็วสูง ๆ จะต้องพิจารณาถึงแพ็คเกจอร์ทั้งสามประการนี้ด้วย ดังเช่น ควรออกแบบให้มีพื้นที่ขนาดเล็ก เพื่อลดผลของค่าความจุไฟฟ้า เป็นต้น

### 2.2.4 สภาพการตอบสนอง

สภาพการตอบสนอง (responsivity: R) หมายถึง อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงที่เกิดขึ้นกับกำลังของแสงที่ตกกระทบ [32]

$$R = \frac{I_p}{P_{inc}} = \frac{\eta q}{h\nu} = \frac{\eta \lambda}{hc} \quad (2.7)$$

จากสมการที่ 2.7 พบว่าสภาพการตอบสนองจะแปรแบบเชิงเส้นกับความยาวคลื่นในช่วงการใช้งาน ซึ่งจะเป็นคุณสมบัติที่ดีของตัวตรวจวัดแสง

### 2.2.5 สัญญาณรบกวนแบบช็อต

ตัวตรวจวัดแสงจะมีความสามารถในการวัดแสงที่มีความเข้มต่ำมาก ๆ หรือมีความไว (sensitivity) สูงเพียงไรจะขึ้นกับขนาดของสัญญาณรบกวนที่เกิดขึ้น และสัญญาณรบกวนแบบช็อต (shot noise) ก็เป็นสัญญาณรบกวนชนิดหนึ่งที่มีผลอย่างมากกับตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเกิดขึ้นจากกระแสมืดและกระแสแสง [27] ในกรณีของโพโตไดโอดที่ไม่มีอัตราขยายภายใน ค่าเฉลี่ยกำลังสองของกระแสของสัญญาณรบกวนแบบช็อตนี้ จะเป็นไปตามสมการที่ 2.8 คือ

$$\langle i_n^2 \rangle = 2q\bar{I}B = 2q(I_p + I_{dark})B \quad (2.8)$$

โดยที่  $\bar{I}$  คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสเอาท์พุท (A)

$I_p$  คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสแสง (A)

$I_{dark}$  คือ ค่าเฉลี่ยของกระแสมืด (A)

$B$  คือ แบนด์วิดท์ทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง (Hz)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

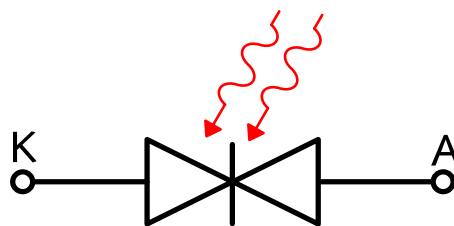
ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงที่ดีควรมีสัญญาณรบกวนแบบช็อคให้ต่ำที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้ นั่นคือ ควรจะสร้างตัวตรวจวัดแสงให้มีกระแสมืดต่ำ ๆ

### 2.3 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ

ตัวตรวจวัดแสง (photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในด้านภาพและแสงอย่างกว้างขวาง มักเป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันต่าง ๆ โดยลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงมีอยู่หลายลักษณะด้วยกัน ซึ่งลักษณะหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือ โครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) หรือโครงสร้างแบบเชิงราบ (Planar) [4, 33-34] เป็นอุปกรณ์ที่มีกระบวนการสร้างไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการผลิต การศึกษาหลักการทํางาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่สามารถอธิบายเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคตติย ชนิด  $Al/n-Si/Al$  เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคตติยมีจุดเด่นคือ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดีกระแสรั่วไหลต่ำ มีเสถียรภาพที่ดี และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย [28]

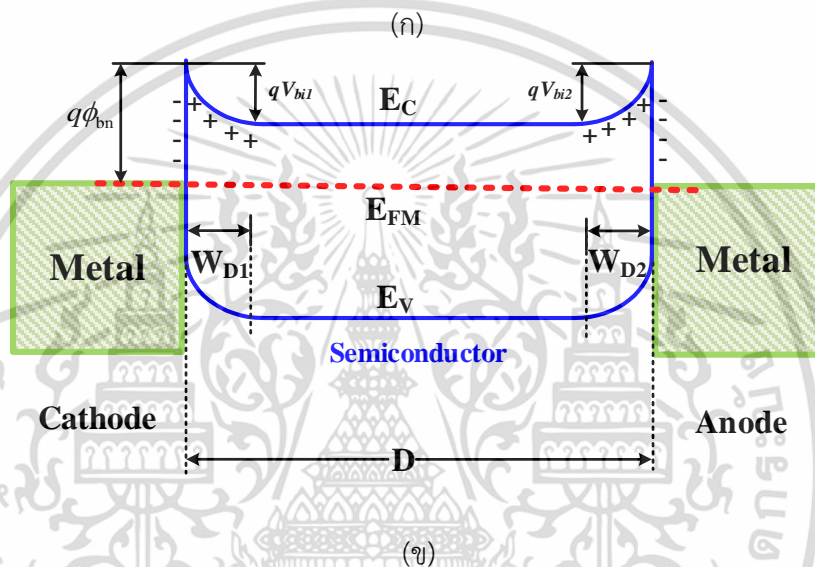
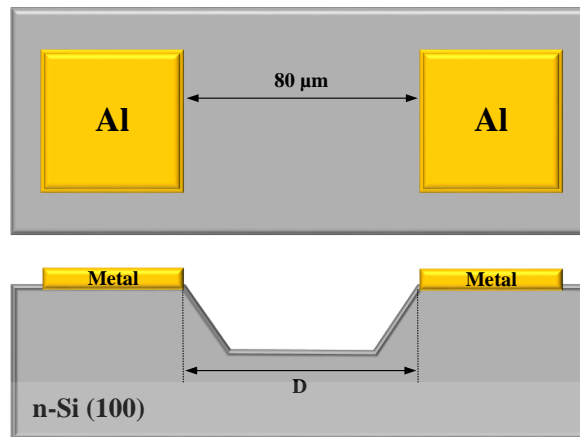
#### 2.3.1 ตัวตรวจวัดแสง MSM ในสถานะสมดุล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคตติยชนิด  $Al/n-Si/Al$  ประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะ (อะลูมิเนียม) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจำนวนสองรอยสัมผัสเชื่อมต่อกันแบบหันชนกัน (back to back) ดังรูปที่ 2.4 [7] โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (D) ในรูปที่ 2.5(ก) จะแสดงแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคตติยในสถานะสมดุลความร้อน จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสช็อคตติยดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode: K) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode: A) [35-37] โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดจะเป็นโลหะ (อะลูมิเนียม) ชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ช็อคตติยของขั้วแคโทด ( $\phi_{bn1}$ ) และขั้วแอโนด ( $\phi_{bn2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_m$  กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด ( $V_{bi1}$ ) และขั้วแอโนด ( $V_{bi2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$  ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_{d1}$ ) และด้านแอโนด ( $W_{d2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $W_{d1} = W_{d2} = W_d$  เมื่อให้  $V_A = 0$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5(ข)



รูปที่ 2.4 สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักย  
 (ก) ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ  
 (ข) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักยใน  
 สภาวะสมดุลความร้อน

### 2.3.2 ตัวตรวจวัดแสง MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส และได้รับแสงตกกระทบ

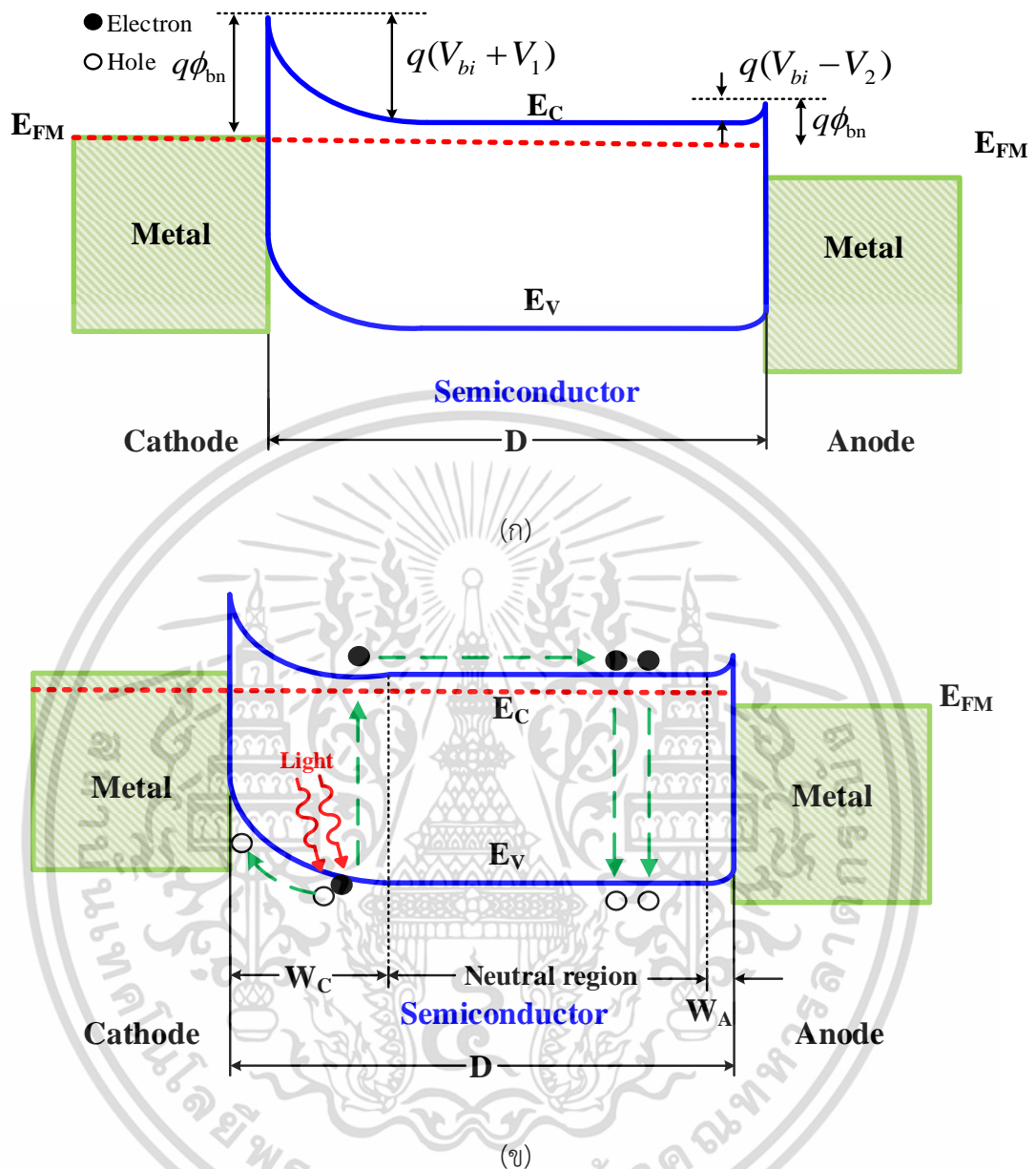
ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักยเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.6(ก) โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง เมื่อมีการไบอัสย้อนกลับจะทำให้บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้น และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น  $V_{bi} + V_1$  อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ขั้วต่อตักยไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ( $I_{SM}$ ) ซึ่งมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสขั้วต่อตติย ส่วนด้านแอนโอดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) แคบมากขึ้น และมีค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ  $V_{bi}-V_2$  ดังนั้น อิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{MS}$ ) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสมีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current :  $I_{dark}$ ) [38] ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอนโอดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก ซึ่งความกว้างบริเวณปลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้ความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณปลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลักโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย เมื่อได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (D) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.6(ข) เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงของอุปกรณ์จะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ( $h\nu \geq E_g$ ) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่า กระแสแสง (photocurrent :  $I_{photo}$ ) สามารถหาได้จากความสัมพันธ์  $I_{photo} = I - I_{dark}$  เมื่อ  $I$  คือ กระแสไฟฟ้าที่วัดได้ทั้งหมด (A) และ  $I_{dark}$  คือ กระแสมืด (A) [39] ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโอด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล ในบริเวณนิวทรัล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบ และมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุไฟฟ้าส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติยที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล

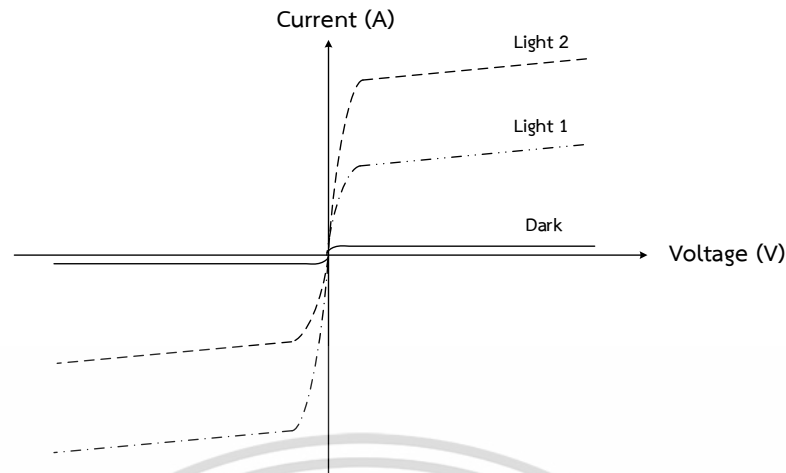
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ (ก) เมื่อได้รับแรงดัน และ(ข) เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ

ลักษณะสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มักถูกพิจารณาคือ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน โดยในรูปที่ 2.7 เป็นลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งตัวนำ เมื่อได้รับความเข้มแสงตกกระทบมีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อได้รับค่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.7 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

โดยที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม ( $W_T$ ) ของตัวตรวจวัดแสงจะเป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด ( $W_C$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านอโนด ( $W_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง [40] ดังสมการที่ 2.9

$$W_T = W_C + W_A \quad (2.9)$$

โดยที่

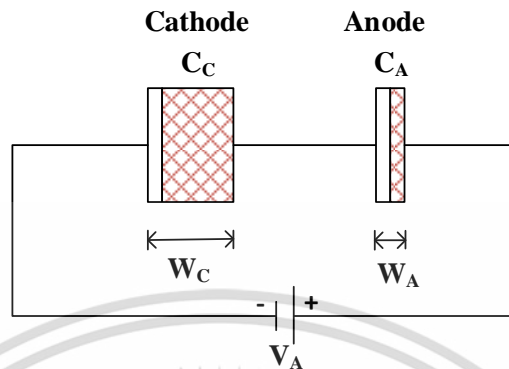
$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.10)$$

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

ลักษณะสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มักถูกพิจารณาคือ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน และ ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น เมื่อได้รับความเข้มแสงตกกระทบมีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อได้รับค่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นด้วย

ส่วนลักษณะสำคัญของค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง คือความจุไฟฟ้าที่มีความสมมาตรกัน โดยค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบอัส โดยเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง โดยค่าความจุไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.8 ซึ่งความจุไฟฟ้ารวม ( $C_T$ ) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านคาโทด ( $C_C$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านอโนด ( $C_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัส

ตรง ดังสมการที่ 2.12 [41] นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงดันภายในและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 2.8 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็นเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

และความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ

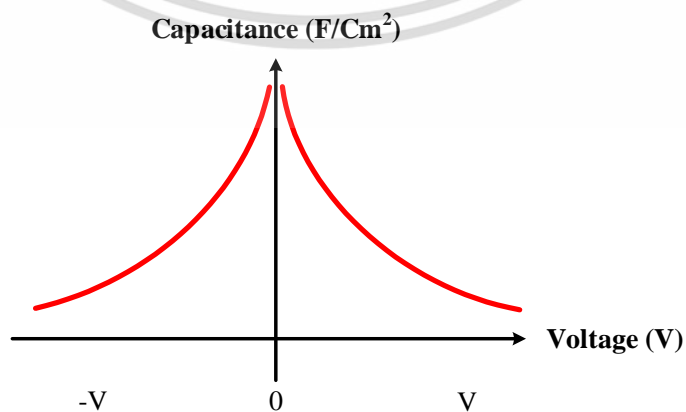
$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \tag{2.12}$$

โดยที่

$$C_C = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \tag{2.13}$$

$$C_A = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \tag{2.14}$$

และในรูปที่ 2.9 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็นที่มีลักษณะสมมาตรกันและเมื่อได้รับแรงดันไบอัสความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.9 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเอ็น เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

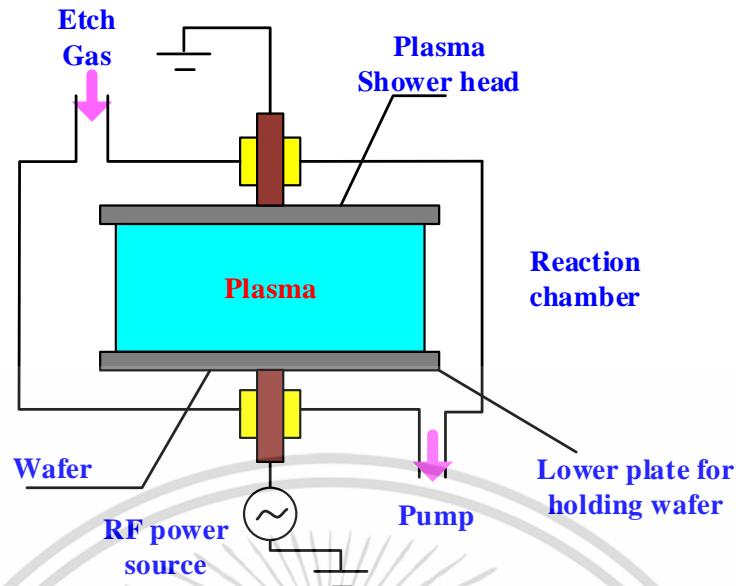
## 2.4 กระบวนการกัด

ในปัจจุบันกระบวนการสร้างอุปกรณ์ที่มีขนาดเล็กนั้นมียุทธศาสตร์หลายวิธีและมีความยากง่ายแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับต้นทุนในการผลิตและความต้องการของผู้ที่นำไปใช้งานหรือปัจจัยอื่น ๆ วิธีการสร้างอุปกรณ์ขนาดเล็ก (microfabrication) ที่มีความน่าสนใจวิธีหนึ่งคือ กระบวนการกัด (etching process) เป็นการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอุปกรณ์ให้มีลวดลายวงจรที่ได้ทำการออกแบบ เพื่อให้รูปแบบปรากฏอยู่บนผิวของแผ่นเวเฟอร์หรือการกัดวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากตัวอุปกรณ์ ในการพิจารณากระบวนการกัดต่าง ๆ เราจะมีตัวเลขแสดงคุณค่า (figure of merit) ของกระบวนการเหล่านี้ เพื่อแสดงประสิทธิภาพของกระบวนการได้ง่าย ซึ่งตัวเลขแสดงคุณค่าที่เราจะต้องคำนึงเสมอ คือ อัตราการกัด (etching rate) มีหน่วยเป็นความหนาต่อหน่วยเวลา [42] เพื่อให้เราสามารถผลิตวงจรรวมได้อย่างรวดเร็ว เรามักจะต้องการใช้อัตราการกัดค่าสูง แต่ถ้าอัตราดังกล่าวมีค่าสูงเกินไป เราจะควบคุมความแน่นอนของกระบวนการได้ยากขึ้น โดยทั่วไปเราต้องการให้อัตราการกัดมีค่าหลายร้อยหรือเป็นพันอังสตรอมต่อนาที

ตัวเลขแสดงคุณค่าของกระบวนการกัดอีกแบบหนึ่ง คือ ความสม่ำเสมอของอัตราการกัด (etching rate uniformity) มีหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ของการแปรผันของอัตราการกัดบนพื้นที่ของแผ่นเวเฟอร์ทั้งหมด หรือระหว่างเวเฟอร์แผ่นต่างกัน ตัวเลขแสดงคุณค่าที่สำคัญอีกแบบหนึ่ง คือ อัตราต่างของการกัด (etching rate selectivity) ของสารชนิดต่าง ๆ กัน เช่น กระบวนการกัดมีอัตราต่างของการกัดเท่ากับ 20 ต่อ 1 สำหรับโพลีซิลิคอนต่อออกไซด์ ซึ่งหมายถึง กระบวนการดังกล่าวจะกัดสารโพลีซิลิคอนในอัตราที่เร็วกว่าออกไซด์ 20 เท่าตัว ในส่วนของคำว่า (undercut) หมายถึง ความลึกของการกัดด้านข้างในบริเวณใต้ขอบของสารไวแสง [8, 43] แต่เนื่องจากผนังด้านข้างของร่องกัดมักจะไม่อยู่ในลักษณะตั้งฉาก ดังนั้น เรามักจะกล่าวถึงอันเดอร์คัทในลักษณะของความลึกด้านข้างเฉลี่ย

### 2.4.1 กระบวนการกัดแบบแห้ง

ในกระบวนการกัดแบบแห้งนี้ใช้พลาสมาหรือก๊าซในการกัดบนพื้นผิวของวัสดุ การเกิดปฏิกิริยาขึ้นโดยใช้พลังงานของอนุภาคที่เกิดการเคลื่อน และการเกิดปฏิกิริยาทางเคมี เช่น การกัดแบบพลาสมา (plasma etching) เป็นกระบวนการนี้จะมีการกำเนิดพลาสมาที่ความดันต่ำโดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะมีไอออนบวกและลบ ไอออนบวกจะกระจายตัวไปทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุที่ต้องการกำจัดออก เมื่ออนุภาคที่มีพลังงานสูงนั้นหลุดออกมาจากอะตอมบนพื้นผิวของวัสดุจะระเหิดไปซึ่งจะไม่มีปฏิกิริยาทางเคมี [44] การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (Reactive Ion Etching : RIE) ดังรูปที่ 2.10 เป็นการกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาจะใช้ปฏิกิริยาทางกายภาพและทางเคมี กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่มีความหลากหลายและนิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในทางด้านอุตสาหกรรม กระบวนการนี้จะปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วมาก การชนกันของอนุภาคที่มีพลังงานสูงจากไอออนไนซ์จะช่วยให้สารละลายแตกตัวและทำปฏิกิริยากับพื้นผิวของวัสดุ

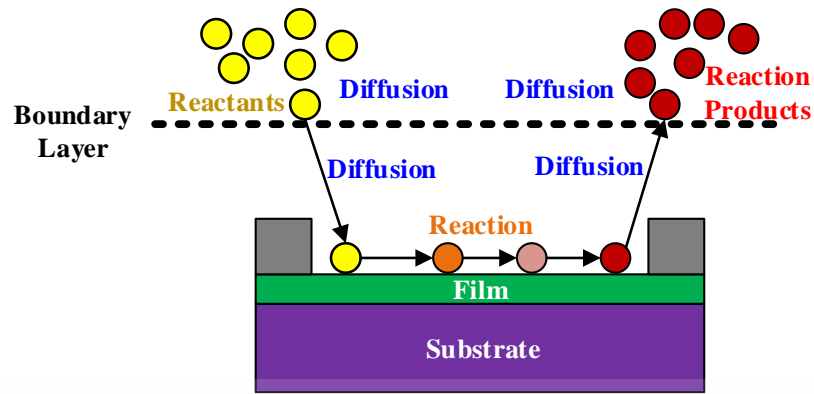


รูปที่ 2.10 ลักษณะการกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา [44]

#### 2.4.2 กระบวนการกัดแบบเปียก

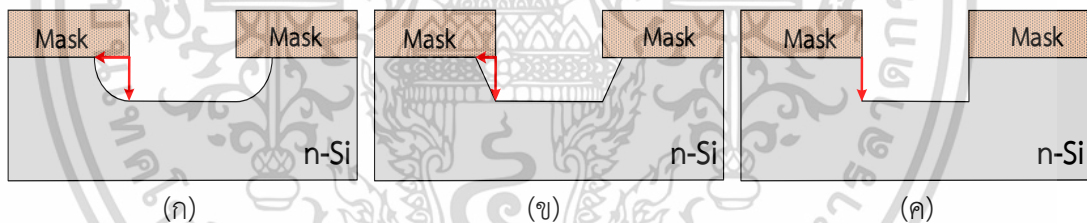
กระบวนการกัดแบบเปียกเป็นกระบวนการกัดเนื้อสารโดยการใช้ปฏิกิริยาเคมีระหว่างสารละลายที่ใช้กัด (Etchant) กับผิวของแผ่นเวเฟอร์ ซึ่งมีข้อเสียหลัก คือ ค่าแอมโพลีโพรพไทล์ การควบคุมกระบวนการกัดลำบาก การปนเปื้อนจากอนุภาคในสารละลายจะมีค่ามาก และไม่สามารถกัดลายเส้นละเอียด (ที่มีขนาดเล็กกว่า  $2\ \mu\text{m}$ ) ได้ดี แต่มีข้อดี คือ จะมีอัตราต่างของการกัดสูงและมักจะ ไม่ทำให้ผิวของแผ่นเวเฟอร์เสียหายมากนัก ดังนั้น ในปัจจุบันนี้ เราจึงนิยมใช้กระบวนการกัดแบบเปียกนี้เฉพาะในงานที่เราไม่ต้องการความละเอียดแน่นอนมากนัก ในการทำงานของกระบวนการกัดแบบเปียกให้สมบูรณ์จะประกอบด้วยขั้นตอนการทำงานสามขั้นตอน ดังรูปที่ 2.11 นั่นคือ อนุภาคของสารกัดในสารละลายจะเคลื่อนตัวเข้าสู่สัมผัสกับผิวของแผ่นเวเฟอร์ และอนุภาคเหล่านี้จะทำปฏิกิริยาเคมีกับชั้นของเวเฟอร์ที่เราต้องการกัดออก กลายเป็นสารประเภทที่ละลายในสารละลายได้ และท้ายสุดสารที่เกิดขึ้นจะต้องถูกเคลื่อนตัวออกจากผิวของแผ่นเวเฟอร์ เพื่อเปิดโอกาสให้อนุภาคของสารกัดเคลื่อนที่เข้าทำปฏิกิริยาต่อเนื่องได้ ดังนั้น อัตราการกัดจะขึ้นกับอัตราเข้าสู่สุดของขั้นตอนทั้งสาม ซึ่งเราจะเรียกขั้นตอนเข้าสู่สุดดังกล่าวว่าเป็น ขั้นตอนการจำกัดอัตราการกัด (Etch rate-limiting step) [45] เพื่อให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นได้อย่างต่อเนื่อง เรามักจะต้องมีวิธีการเขย่าหรือการกวนสารละลาย เพื่อให้อนุภาคของสารกัดสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวแผ่นเวเฟอร์ได้สม่ำเสมอ ในบางปฏิกิริยาของการกัดจะเกิดก๊าซด้วย ซึ่งอาจเกิดเป็นฟอง และฟองก๊าซซึ่งอาจก่อดังอยู่ที่ผิวของแผ่นเวเฟอร์จะไม่ให้อนุภาคของสารกัดเข้าถึงผิวของแผ่นเวเฟอร์ได้ ซึ่งปรากฏการณ์การเกิดฟองก๊าซนี้ มักจะมีมาก ณ บริเวณของลายเส้นต่าง ๆ และอาจจะทำให้การกัดขอบลายเส้นมีความสม่ำเสมอ ทั้งนี้ การเขย่าหรือการกวนสารละลายจะช่วยสลายฟองก๊าซได้พอสมควร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.11 ลักษณะการกัดด้วยปฏิกิริยาทางเคมีของสารละลายที่ใช้กัด [11]

เมื่อกัดผิวหน้าของวัสดุโดยสารเคมีมีส่วนผสมของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) และกรดอะซิติก (Acetic acid) หรือก๊าซจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุนั้นมีความสม่ำเสมอในทุกทิศทาง เรียกลักษณะการกัดนี้ว่า ไอโซทรอปิก (Isotropic) [46] และเมื่อกัดผิวหน้าของวัสดุแต่ละระนาบไม่เท่ากันนั้นคือจะเลือกกัดระนาบ 111 มากกว่าระนาบ 100 หรือจะเลือกกัดระนาบ 100 มากกว่าระนาบ 111 โดยจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเคมีที่นำมาใช้ เรียกลักษณะการกัดนี้ว่า แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) [47] ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิกและการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก [47]

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

#### 2.4.2.1 การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก

การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะมีส่วนผสมของสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) ต่อกกรดไนตริก (nitric acid) ต่อกกรดอะซิติก (acetic acid) เป็นสารละลายที่ใช้สำหรับการกัดซิลิคอน โดยการกัดนั้นจะมีความเข้มข้นของสารละลายที่เป็นการกำหนดอัตราการกัด และการกัดส่วนใหญ่มักใช้ซิลิคอนไดออกไซด์หรือซิลิคอนไนไตรด์เพื่อเป็นการลดอัตราการกัดลง การกัดด้วยสารเคมีโดยทั่วไปมักจะเป็นลักษณะไอโซทรอปิก ทิศทางของการกัดนั้นมีความสำคัญมากสำหรับรูปแบบการถ่ายโอนความละเอียดสูง ดังรูปที่ 2.12(ก) แต่การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะไม่นิยมนำมาใช้ทำการกัดซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.4.2.2 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) คือ กระบวนการกัดที่สารละลายที่ใช้กัด (etchants) เลือกกัดเนื้อซิลิคอนในแต่ละระนาบไม่เท่ากัน ซึ่งอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของซิลิคอน ดังนั้นร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นภาพทรงเรขาคณิตแน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 2.12(ข) และ 2.12(ค) ตัวอย่างความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ (HKL) และ (hkl) เช่น ระนาบ (100), (110), (111) มีมุมระหว่างระนาบ (HKL) และ (hkl) คือ 0.00, 45.00 และ 54.74 องศา ตามลำดับ ซึ่งเป็นระนาบที่เลือกกัดควรเป็นระนาบใดบ้างสารละลายที่ทำกรกัดบนผิวหน้าของฐานรองหรือวัสดุ [48] ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่ต่างแตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลายหรือโครงสร้างผลึกของหรือระนาบของผลึกในวัสดุ ซึ่งคุณสมบัติการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกอัตราการกัดของสารละลายในผลึกซิลิคอนในระนาบต่าง ๆ เรียงเป็นลำดับดังนี้  $(110) > (100) > (111)$  สำหรับการหาค่าแอนไอโซทรอปิกของอัตราการกัด (etch rate anisotropy) ดังแสดงในสมการ

$$A = 1 - \frac{R_L}{R_V} \quad (2.15)$$

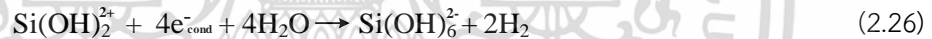
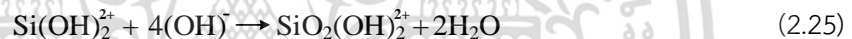
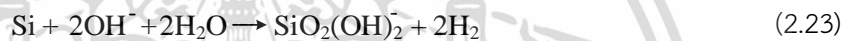
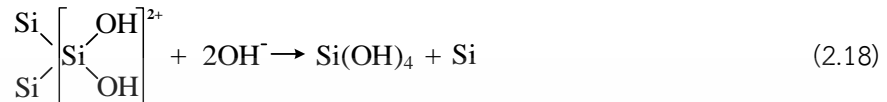
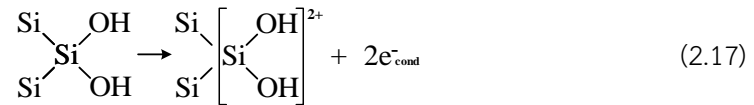
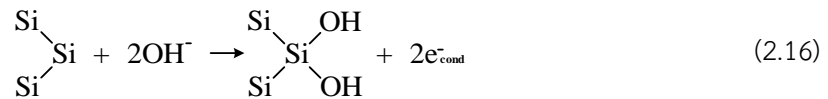
โดยที่  $R_L$  และ  $R_V$  คือ อัตราการกัดตามแนวนอนและแนวตั้ง ตามลำดับ

ซึ่งถ้า  $R_L = R_V$  เราจะกล่าวว่า กระบวนการกัดมีลักษณะไอโซทรอปิก และ  $A = 0$  และในกรณีที่  $R_L = 0$  เราจะได้  $A = 1$  คือ จะไม่มีการกัดทางด้านข้างตามแกนนอน

กระบวนการกัดแบบเปียกมักจะมีค่าแอนไอโซทรอปิกของอัตราการกัดต่ำ ทั้งนี้เพราะอัตราการกัดทางแนวนอนจะต่ำกว่าอัตราการกัดทางแนวตั้งเล็กน้อย ( $R_L \leq R_V$ ;  $A \rightarrow low$ ) แต่อัตราต่างของการกัดอาจจะมีค่าสูง ส่วนในทางกระบวนการกัดขึ้นรอยอื่น ๆ เช่น การกัดด้วยการกัดบดด้วยไอออน (ion milling) จะมีค่าแอนไอโซทรอปิกของการกัดใกล้เคียงกับหนึ่ง นั่นคือ อัตราการกัดจะไม่ขึ้นกับชนิดของสารที่ถูกกัดมากนัก

### 2.4.3 ปฏิกริยาการกัดซิลิคอน

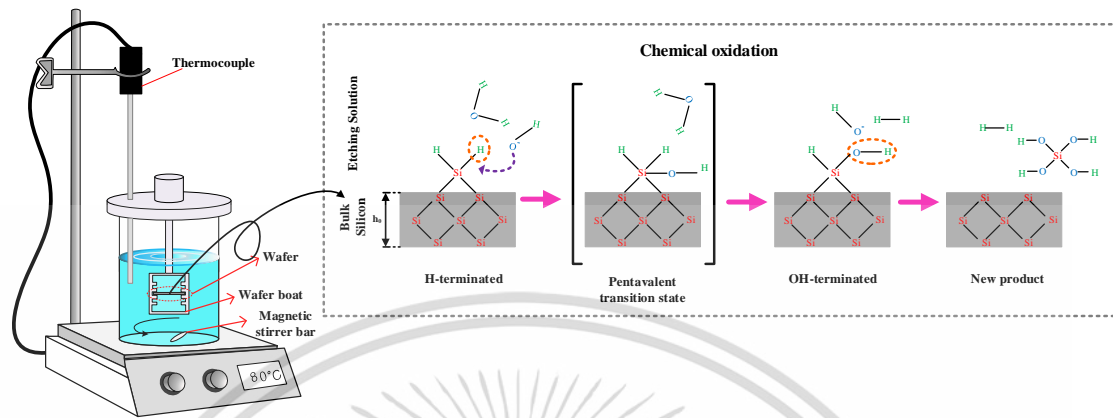
เทคโนโลยีหนึ่งที่สำคัญในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ คือ การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกเป็นกระบวนการที่ใช้สารละลาย (etchant) ในการกัดเนื้อซิลิคอนแต่ละระนาบไม่เท่ากันหรือกล่าวได้ว่าอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของซิลิคอน สารเคมีที่นิยมใช้กัดซิลิคอนนั้นมีหลากหลายชนิด ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยต่างผสมกับน้ำ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) [49-50] เอทิลีนไดแอมมีน (ethylenediamine) ไฮดราซีน (hydrazine) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เป็นต้น อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลาย ดังนั้นการเลือกใช้สารละลายให้เหมาะสมที่นำมาใช้ในการกัดนั้นขึ้นอยู่กับวัสดุที่กัดและการนำไปใช้งานอีกด้วย



ในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งสารละลายนี้จะลดรูปเป็นอนุมูลอิสระของไฮดรอกซิล (hydroxyl radical) คือ รูปที่เป็นกลางของไฮดรอกไซด์ไอออน (hydroxide ion) และมีความว่องไวต่อการเกิดปฏิกิริยามาก เมื่อทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะทำให้อะตอมหรืออนุมูลไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^\cdot$ ) เกิดการแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation state) ทำให้ยกระดับสถานะออกซิเดชันของซิลิคอนได้เป็นซิลิคอนประจุบวก ( $\text{Si}^+$ ) โดยอะตอมไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิคอน และพันธะซิลิคอนหลัก (back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น  $\text{Si(OH)}_2^{2+}$  เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์” [51] และซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิกิริยาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำ คือ ปฏิกิริยาแตกตัว (decomposition reaction) เกิดเป็นอะตอมของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^\cdot$ ) ซึ่งไปทำปฏิกิริยาการรวมตัว (combination reaction) กับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งก่อตัวขึ้นให้เกิดผลิตภัณฑ์ เรียกว่า กรดออร์โธซิลิก (orthosilic acid) ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย โดยกรดออร์โธซิลิกนี้จะแตกตัวเพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รวมกับน้ำ ทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการที่ 4.2-4.12 [52] แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของของสารละลายเตรอะเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ตามลำดับ



รูปที่ 2.13 แบบจำลองปฏิกิริยาเริ่มต้นของการกัดซิลิคอนระนาบ (100)

จากรูปที่ 2.13 เป็นการเกิดปฏิกิริยาสารละลายนี้จะลดรูปเป็นไอออนของไฮดรอกเจน (hydroxide ion) และทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนร่วมกับโมเลกุลของน้ำ ค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตี (electronegativity) ของอะตอมไฮดรอกเจน (2.2) มีค่าใกล้เคียงกับของซิลิคอน (1.9) ทำให้อะตอมของธาตุต่างชนิดรวมตัวเป็นโมเลกุลโดยใช้อิเล็กตรอนคู่ร่วมกัน นิวเคลียสของอะตอมทั้งสองจะดึงดูดอิเล็กตรอนคู่ที่ใช้ร่วมกันด้วยแรงที่ต่างกัน เกิดการสร้างพันธะเคมี (chemical bond) ต่อกัน เนื่องจากพันธะของซิลิคอน-ไฮดรอกเจน (Si-H) มีค่าโพลาไรซ์ที่ต่ำ การยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะต่ำทำให้ง่ายต่อการแตกตัวของนิวคลีโอไฟล์ (nucleophiles) ส่งผลให้เกิดการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) [53] เป็นปฏิกิริยาที่มีน้ำเข้าไปสลายพันธะระหว่างอะตอมของไฮดรอกเจนไอออนและอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ทำให้สารโมเลกุลใหญ่แตกตัวเป็นสารโมเลกุลเล็กลง

ในกรณีของซิลิคอนไดไฮดรอกไซด์ระนาบ (100) ที่แรงดึงดูดของพันธะ Si-H รอบข้างช่วยให้เกิดการแทนที่ระหว่างอะตอมของไฮดรอกเจนไอออนและอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ในขั้นตอนนี้ออนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์เป็นที่ตัวการเร่งปฏิกิริยาซึ่งเป็น species ชนิดหนึ่งสำหรับ activate etching อีกด้วย ขณะที่โมเลกุลของน้ำมีขั้วทำให้สามารถยึดจับกับสารที่มีขั้วได้ ทำให้น้ำสามารถเป็นตัวทำละลายที่ดีมีความว่องไวในการเกิดปฏิกิริยา (active species) โดยการเกิดก๊าซไฮโดรเจน ( $H_2$ ) เป็นผลิตภัณฑ์จากขั้นตอนนี้

ในปฏิกิริยาการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารเคมี โดยโมเลกุลของน้ำและโมเลกุลของไฮดรอกซิลสำหรับปฏิกิริยาออกซิเดชัน การแทนที่ของไฮดรอกเจนมีความรวดเร็วยิ่งขึ้น และปริมาณของไฮดรอกเจนซึ่งเป็นปัจจัยในการควบคุมการเกิดปฏิกิริยาที่พื้นผิว ในการที่มีจำนวนของพันธะ Si-H มากขึ้น ทำให้สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ดี โดยการออกซิเดชันเป็นขั้นตอนในการชะลอการกัด ซึ่งสามารถอธิบายได้โดยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

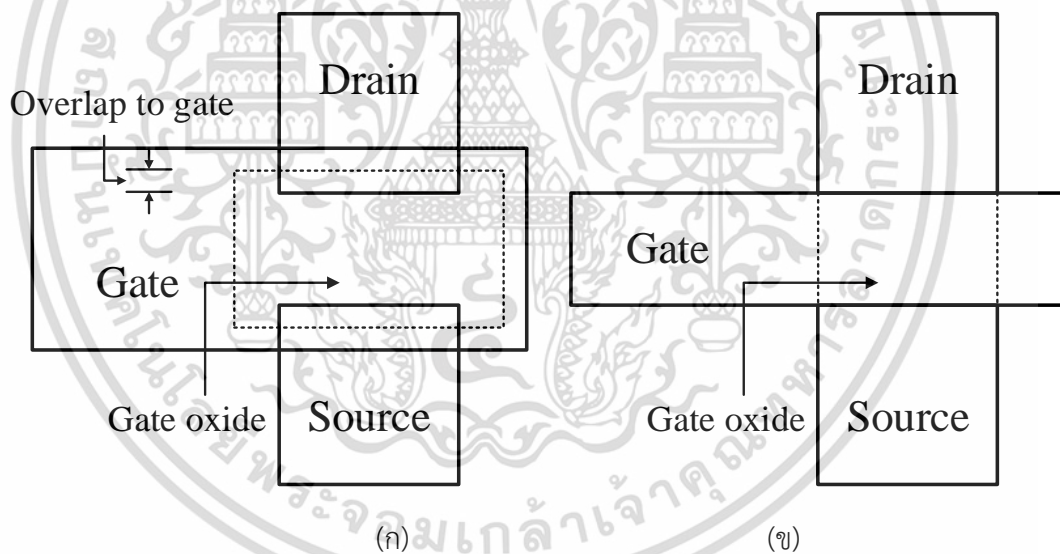
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อเกิดปฏิกิริยาการแทนที่อะตอมของไฮโดรเจนไอออนด้วยอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ อย่างรวดเร็ว จากความแตกต่างของค่าอิเล็กโตรเนกาติวิตีระหว่างซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) เป็นตัวทำให้อัตราการกัดของน้ำเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดแยกพันธะของ Si-Si และเกิดการผลึกอะตอมของซิลิคอนจากพื้นผิวในรูปของ  $\text{HSi(OH)}_3$  [54]

#### 2.4.4 การปรับซ็อนตัวเอง

เทคนิคการปรับซ็อนตัวเอง (self-aligned) ถูกนำประยุกต์ใช้กับเทคโนโลยีการผลิตอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เซมิคอนดักเตอร์อย่างหลากหลาย โดยนิยมใช้ในขั้นตอนการสร้างส่วนเกตของมอสทรานซิสเตอร์แบบเกตโพลีซิลิคอน โดยโพลีซิลิคอนที่อยู่บนเกตออกไซด์จะต้องสร้างส่วนเกตก่อน แล้วจึงสร้างส่วนซอร์สและส่วนเดรนในภายหลัง ซึ่งจะแตกต่างจากมอสทรานซิสเตอร์แบบเกตโลหะดังรูปที่ 2.14 โดยไม่ต้องสร้างส่วนซ้อนทับ (overlap) เหมือนกับมอสทรานซิสเตอร์แบบเกตโลหะจึงทำให้มอสทรานซิสเตอร์แบบโพลีซิลิคอนมีขนาดเล็กกว่ามอสทรานซิสเตอร์แบบเกตโลหะถึง 33% [40] การใช้เทคนิคการปรับซ็อนตัวเองในมอสทรานซิสเตอร์เป็นหนึ่งในนวัตกรรมหลักที่นำไปสู่การเพิ่มกำลังประมวลผลอย่างมากในปี 1970 [40, 102-105]



รูปที่ 2.14 (ก) การเพิ่มส่วนซ้อนทับจะส่งผลให้มอสเฟตแบบเกตโลหะมีขนาดใหญ่ และ (ข) มอสเฟตแบบเกตโพลีซิลิคอนไม่ต้องสร้างส่วนซ้อนทับ แต่ใช้หลักการปรับซ็อนตัวเอง [40]

การปรับซ็อนตัวเองยังคงใช้ในกระบวนการวงจรรวมที่ทันสมัย เทคนิคนี้ช่วยให้มั่นใจได้ว่าเกตจะอยู่ในระนาบเดียวกัน มีความคมชัดและแม่นยำของขอบส่วนซอร์สและส่วนเดรน และสามารถทำให้ทรานซิสเตอร์มีขนาดเล็กลงมาก ทำให้ความหนาแน่นของทรานซิสเตอร์สูงขึ้น สามารถสร้างวงจรมีฟังก์ชันการทำงานซับซ้อนมาก ๆ ได้ โดยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเองสามารถนำมาใช้ร่วมการกระบวนการกัดด้วยสารเคมีได้เป็นอย่างดี เริ่มจากการสร้างลวดลายบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ของตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์ด้วยกระจกตันแบบ ทำการฉายแสงผ่านกระจกตันแบบแล้วนำไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ ส่วนลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นอะลูมิเนียมจะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ส่วนของขั้วไฟฟ้าถูกสารละลายกัดออกไป ในส่วนบริเวณที่ไม่มีชั้นป้องกันการกัดจะใช้สารละลายที่ใช้กัดในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกกัดโครงสร้างผ่านชั้นอะลูมิเนียมที่เปิดผิวหน้าไว้ เมื่อขึ้นงานผ่านการกัดครั้งแรกแล้ว ชิ้นงานสามารถเข้าสู่กระบวนการกัดในครั้งที่สองได้ด้วยสารละลายอื่นต่อได้อีก โดยไม่จำเป็นต้องสร้างลวดลายขึ้นใหม่ นั่นหมายความว่า การใช้เทคนิคการปรับซ็อนตัวเองสามารถใช้ทดแทนการสร้างชั้นป้องกันการกัดซ็อนทับหลายครั้งได้ (การกัดโครงสร้างของเทคนิคนี้การเลือกใช้เงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดจะขึ้นอยู่กับโครงสร้างที่ออกแบบไว้ เนื่องจากสารเคมีแต่ละชนิดมีคุณสมบัติของการกัดที่แตกต่างกัน) ซึ่งขั้นตอนนี้ถือได้ว่าเป็นเทคนิคที่สำคัญของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพีระมิดสองระดับ เพราะว่าการลดจำนวนชั้นที่ต้องสร้างลวดลายซ็อนทับหลายครั้งจะสามารถลดการกัดเซาะที่ขั้วไฟฟ้าหรือโครงสร้างอื่นที่สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้าและประสิทธิภาพการทำงานของตัวอุปกรณ์

## 2.5 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่สามารถวัดปริมาณความเข้มแสงโดยเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าจากการกระตุ้นพาหะที่ดูดกลืนพลังงานโฟตอนเมื่อมีแสงตกกระทบและเกิดการปลดปล่อยพาหะอิสระส่งผลให้เกิดการนำไฟฟ้า สำหรับการออกแบบลวดลายต้นแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นจะต้องคำนึงพารามิเตอร์แรกที่สำคัญ คือ ค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (depletion region) เนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมที่บริเวณปลอดพาหะ [55] ซึ่งส่งผลให้กระแสแสงเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น ในสมการที่ 2.27 เป็นสมการคำนวณหาความกว้างบริเวณปลอดพาหะ

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.27)$$

โดยที่  $\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  คูลอมบ์

$N_D$  คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้

$V_{bi}$  คือ แรงดันภายใน

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากการคำนวณจะได้ว่าค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V มีค่าเท่ากับ 4.0  $\mu\text{m}$  และ 5.5  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความลึกการกัดร่องรูปตัวยูในช่วง 4-5  $\mu\text{m}$  จากนั้นคำนวณการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สูตรทางตรีโกณมิติดังแสดงในสมการที่ 2.28 และ 2.29 โดยใช้ความลึก (ด้าน h) ที่ได้จากการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ 4  $\mu\text{m}$  มุมของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเท่ากับ 54.74 องศา [56] พบว่าพื้นที่รับแสงแนวระนาบ (111) ของร่องรูปตัวยู (ด้าน g) มีค่าพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นเป็น 1.73 เท่าของพื้นที่รับแสงแนวราบของร่องรูปตัวยู (ด้าน p) ดังแสดงในรูปที่ 2.15

เราสามารถคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงของการกัดโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูได้จากสมการ

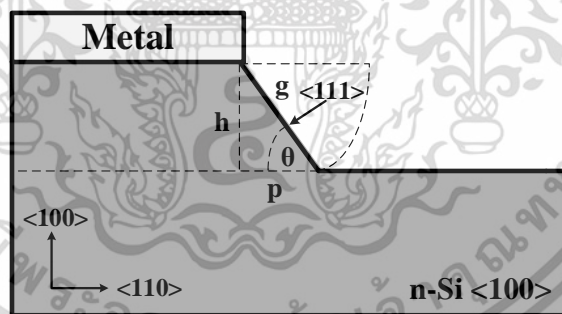
$$\frac{h}{g} = \sin \theta \quad (2.28)$$

$$\frac{p}{g} = \cos \theta \quad (2.29)$$

โดยที่ p คือ พื้นที่รับแสงแนวราบของร่องรูปตัวยู

g คือ พื้นที่รับแสงแนวระนาบ (111) ของร่องรูปตัวยู

h คือ ความลึกการกัด



รูปที่ 2.15 ภาพของภาคตัดขวางโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al

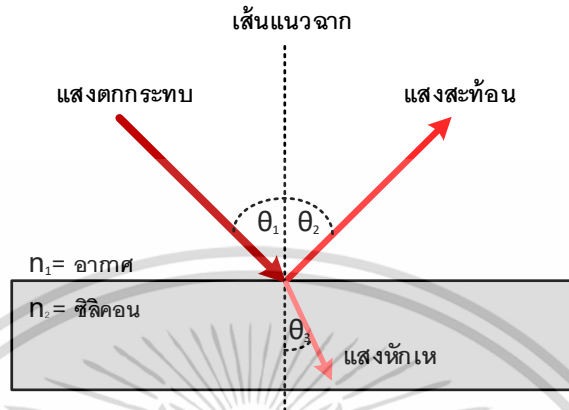
### 2.5.1 ลักษณะพื้นผิวแบบเรียบภายในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง

ลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนแบบเรียบ จากคุณสมบัติของแสงเมื่อแสงเกิดการสะท้อนบนพื้นผิวแบบเรียบ จะเห็นแนวการเคลื่อนที่ของแสงจากอากาศไปตกกระทบที่ผิวหน้าซิลิคอน เรียกว่า รังสีตกกระทบ หรือ ลำแสงตกกระทบ และแนวการเคลื่อนที่ของแสงที่ผิวของซิลิคอนสะท้อนกลับสู่อากาศเรียกว่า รังสีสะท้อน หรือ ลำแสงสะท้อน และมีเส้นตรงเส้นหนึ่งที่ลากตั้งฉากกับผิวหน้าของซิลิคอนตรงจุดที่แสงตกกระทบและแสงสะท้อนพอดีซึ่ง เรียกว่า เส้นปกติ และเมื่อพิจารณาแสงที่

เคลื่อนที่ไปถึงขอบของตัวกลางที่สอง บางส่วนของรังสีตกกระทบจะสะท้อนกลับเข้ามาในตัวกลางเดิม

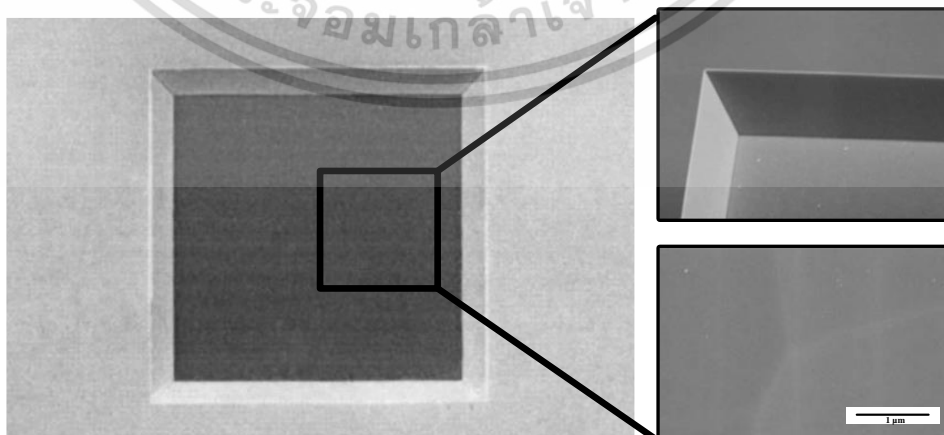
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงของหลายเส้นเมื่อสะท้อนผิวเรียบจะสะท้อนกลับมาแบบขนานกัน [57] และมีมุมของแสงที่ตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนบนตำแหน่งที่แสงตกกระทบกับแสงสะท้อนบนพื้นผิวจะเป็นตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ลักษณะการสะท้อนของแสงบนพื้นผิวเรียบ

โครงสร้างของตัวอุปกรณ์ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์ โดยรูปแบบหรือข้อจำกัดของประสิทธิภาพการแปลงพลังงานของตัวอุปกรณ์นั้นจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับการเลือกนำไปใช้งาน ในส่วนของการสร้างพื้นผิวซิลิคอนแบบเรียบ เมื่อลำแสงขนานตกกระทบผิวหน้าซิลิคอนแบบเรียบ แสงส่วนหนึ่งจะเกิดการหักเหเข้าสู่เนื้อซิลิคอน และแสงบางส่วนจะสะท้อนเป็นลำแสงที่ขนานเช่นเดียวกับลำแสงที่ตกกระทบ เรียกว่า การสะท้อนแบบสม่ำเสมอ (regular reflection) การเกิดการสะท้อนแบบสม่ำเสมอนี้จึงได้มีการพัฒนาโครงสร้างพื้นผิวให้ลักษณะเรียบ ดังแสดงในรูปที่ 2.17 เนื่องจากพื้นผิวแบบเรียบจะสามารถควบคุมความสม่ำเสมอของพื้นผิวได้ในการสร้างครั้งต่อไป และประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์จะเป็นมาตรฐานเดียวกันเสมอ

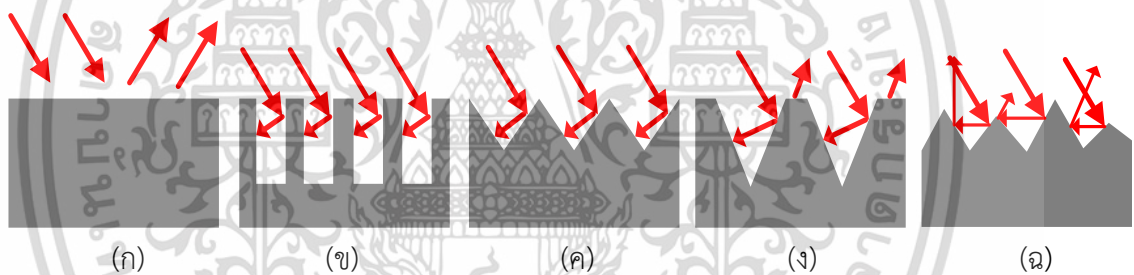


รูปที่ 2.17 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างลักษณะพื้นผิวซิลิคอนแบบเรียบ [58]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

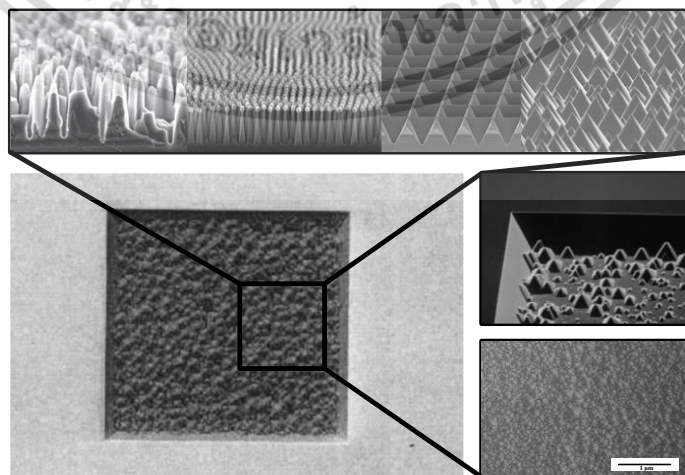
## 2.5.2 ลักษณะพื้นผิวแบบขรุขระภายในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง

การสร้างผิวหน้าซิลิคอนให้มีโครงสร้างขรุขระ (surface texturing) สามารถเพิ่มพื้นที่รับแสง และยังสามารถเพิ่มโอกาสให้แสงผ่านเข้าสู่เนื้อซิลิคอนจากการสะท้อนกลับของแสงน้อยจะทำให้ได้จำนวนการผ่านของแสงภายในตัวอุปกรณ์มีมาก ส่งผลให้ตัวอุปกรณ์สามารถดูดกลืนแสงหรือพลังงานโฟตอนมาใช้ประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มโอกาสให้เกิดการรวมตัวของพาหะได้มากขึ้น ทำให้เพิ่มกระแสแสงและการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงดีขึ้น พิจารณาพื้นผิวไม่เรียบแสงอาจสะท้อนในหลายทิศทางมีลักษณะการสะท้อนแสงไม่เป็นระเบียบหรือการทำพื้นผิวไม่เรียบ หรือที่เรียกว่า ตัวสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเทียน (Lambertian reflectors) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 [59] เมื่อลำแสงขนานตกกระทบพื้นผิวหน้าซิลิคอนที่ขรุขระ ลำแสงจะกระจัดกระจายหรือสะท้อนไปคนละทิศทาง เรียกว่า การสะท้อนแบบกระจาย (diffuse reflection) การทำให้แสงสะท้อนกลับน้อยลงสามารถช่วยลดผลของการสะท้อนแสงกลับที่ผิวหน้าซิลิคอน เนื่องจากแสงที่ตกกระทบผิวของพีระมิดด้านหนึ่งจะมีการสะท้อนไปยังผิวของพีระมิดอีกด้านหนึ่ง ซึ่งสามารถลดการสูญเสียจากแสงสะท้อนกลับที่ผิวของตัวตรวจวัดแสงจึงต้องทำการสร้างพีระมิดบนผิวหน้าของซิลิคอนเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสง และส่งผลให้เพิ่มการดูดกลืนแสงอีกด้วย



รูปที่ 2.18 ลักษณะของโครงสร้างขรุขระ (surface texturing)

- (ก) พื้นผิวแบบเชิงราบ (ข) แท่งนาโนซิลิคอน (ค) พื้นผิวพีระมิด  
(ง) พื้นผิวพีระมิดแบบกลับหัว และ(จ) พื้นผิวพีระมิดแบบนุ่ม



รูปที่ 2.19 ภาพถ่าย SEM ของตัวอย่างลักษณะพื้นผิวซิลิคอนแบบขรุขระ [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.19 เป็นความขรุขระจากการกัดพื้นผิวซิลิคอน เนื่องจากกระบวนการและวัสดุที่เกี่ยวข้องที่นำมากัด เช่น ความบกพร่องในผลึกซิลิคอน สารเคมีตกค้างหรือตกตะกอนบนพื้นผิว การแพร่ปฏิกิริยาการสลายตัวระหว่างโมเลกุลน้ำ ( $H_2O$ ) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) กับซิลิเกต ทำให้เกิดเป็น native-oxide และฟองอากาศไฮโดรเจนที่เกิดบนผิวซิลิคอนรวมถึงการกวนด้วยแท่งแม่เหล็กทำให้กระบวนการกัดพื้นผิวเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้กระบวนการกัดดำเนินอย่างต่อเนื่องในบริเวณนั้น ดังนั้นพีระมิดที่เกิดขึ้นจึงมีขนาดใหญ่ และการกระจายตัวที่ดี [59] ฟองก๊าซไฮโดรเจนเล็ก ๆ ที่เกิดในปฏิกิริยานี้เกาะติดผิวซิลิคอนได้ง่ายเสมือนเป็นหน้ากากเล็ก ป้องกันผิวจากสารละลายที่จะกัดอะตอมซิลิคอน ดังนั้นในกรณีปริมาณการกระจายและขนาดของฟองก๊าซไฮโดรเจนจึงเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องควบคุม เพื่อให้พื้นผิวเกิดพีระมิดที่สม่ำเสมอ ซึ่งขนาดของพีระมิดที่มีขนาดใหญ่จะทำให้การสะท้อนแสงมีค่าต่ำกว่าพีระมิดที่มีขนาดเล็ก ค่าการสะท้อนแสงกลับที่ผิวมีค่าต่ำนั้นจะทำให้มีการดูดกลืนแสงของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกระแสแสงที่สูงขึ้น

### 2.5.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อซิลิคอนส่วนใหญ่จะผสมกับน้ำหรือสารเคมีของเหลว เรียกว่า “etchants” เพื่อกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยจะสร้างลวดลายไว้บนผิวหน้าของวัสดุ เช่น เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) โปแทสเซียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ไฮดราซีน (Hydrazine) และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ [61] เป็นต้น สารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติทั้งไอโซทรอปิก (isotropic etching) และแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด [62] สารละลายเหล่านี้จะกัดวัสดุต่าง ๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกหน้ากาป้องกันการกัดให้เหมาะสมกับสารละลายที่ใช้ในการกัดจึงมีความจำเป็นด้วย

#### สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก

สารละลายที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) กรดไนตริก (Nitric acid) กรดอะซิติก (Acetic acid) หรือที่เรียกกันว่า HNA นั้นเป็นสารละลายที่มีลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิก ซึ่งอัตราการกัดแปรผันกันอย่างมากระหว่างอัตราการกัดยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ อัตราส่วนผสมที่ต่างกันจะทำให้อัตราการกัดเปลี่ยนแปลงไปมาก และหน้ากาสำหรับกรด HNA มีทั้งซิลิคอนไนไตรด์ ( $Si_3N_4$ ) และซิลิคอนไดออกไซด์ ( $SiO_2$ ) ซึ่งไม่สามารถป้องกันการกัดในระยะเวลานานได้

สารละลายเอธิลีนไดเอมีน เป็นสารละลายที่ใช้กัดประเภทแอนไอโซทรอปิก ที่เลือกหน้ากาในการกัดได้อย่างเด่นชัดที่สุด สามารถใช้หน้ากาป้องกันในการกัดได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่เลือกใช้

สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายไม่เป็นพิษ มีราคาที่ถูกและนิยมใช้กันแพร่หลาย การกัดซิลิคอนจะใช้ความเป็นด่างของไฮดรอกไซด์ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่สูงและการกัดแบบเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

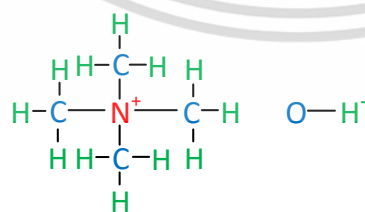
แอนไอโซทรอปิกในระดับสูง ส่วนพื้นผิวที่ผ่านการกัดจะเป็นลักษณะขรุขระ แต่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์จะกัดโลหะอะลูมิเนียมอย่างรวดเร็วและไม่นิยมนำไปใช้ในการกัดงานจำพวก MOS หรือ CMOS [63] เนื่องจากพบไอออนของต่างบางส่วนที่หลงเหลืออยู่บนผิวหน้าของชิ้นงาน

สารละลาย KOH ผสมด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (IPA) เป็นสารละลายกัดที่ขึ้นอยู่ทิศทางระนาบและมีอัตราการกัดระนาบ (100) ต่อ ระนาบ (111) สูงที่สุด และเกิด undercutting ได้ชั้นออกไซด์ต่ำที่สุด แต่มีจุดด้อยเนื่องจากสารละลาย KOH มีอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์สูง [64] จึงต้องอาศัยชั้นหน้ากากป้องกันแบบอื่นแทน

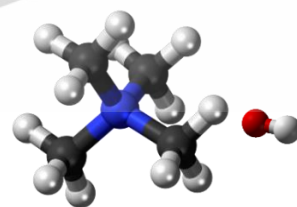
สำหรับวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอกระบวนการกัดเปียกลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิก โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ผสมด้วยกรดซิลิซิก (silicic acid) ซึ่งเป็นสารละลายที่มีการกัดที่ขึ้นกับทิศทางและระนาบและเลือกกัดในระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) สารละลาย TMAH ที่ทำการกัดซิลิคอนนั้นพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระและค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงจะทำให้กัดอะลูมิเนียมได้เร็ว [65-66] แต่เมื่อสารละลาย TMAH ถูกเติมด้วยปริมาณที่เหมาะสมของกรดซิลิซิกผสมให้ลดการกัดอะลูมิเนียมที่สมบูรณ์และกัดชั้นป้องกันซิลิคอนไดออกไซด์ที่ต่ำพร้อมกับกัดซิลิคอนให้เป็นพื้นผิวขรุขระ [67]

### 2.5.3.1 สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) สูตรทางเคมี  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$  ดังในรูปที่ 2.20 เป็นสารละลายที่มี quaternary ammonium hydroxide มากที่สุดและเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน มีอัตราการกัดออกไซด์ที่ต่ำมากและจะไม่กัดอะลูมิเนียมถ้ามีซิลิเกตจำนวนมากพอ สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้จะมีราคาที่สูงเพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับงานจำพวก MOS หรือ CMOS ได้ ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง [68] สมการปฏิกิริยาการแตกตัวของของสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ดังนี้



(ก)



(ข)

รูปที่ 2.20 โครงสร้างทางเคมีของเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ [69]

(ก) โครงสร้างลิวอิส และ(ข) โครงสร้างแบบจำลองสามมิติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

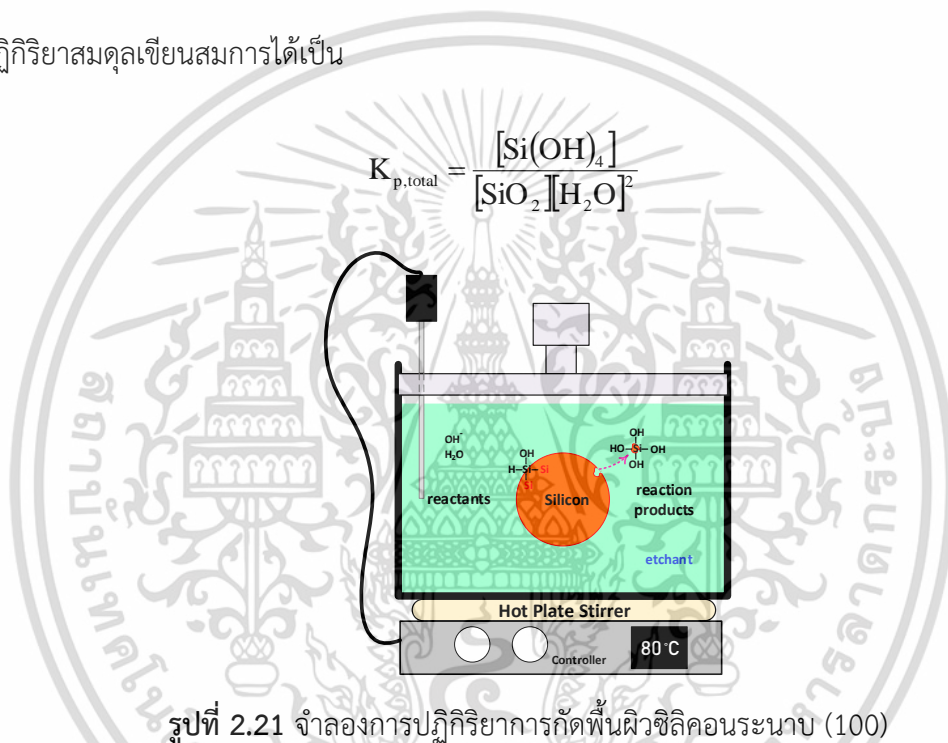
### 2.5.3.2 กรดซิลิซิก

กรดซิลิซิก (silicic acid) หรือกรดออร์โธซิลิก (orthosilicic acid) สูตรทางเคมี  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  หรือ  $\text{Si}(\text{OH})_4$  ชื่อทั่วไปของกลุ่มสารประกอบเคมีนี้มีองค์ประกอบของซิลิคอนออกไซด์ (ซิลิกา) และหมู่ของไฮดรอกซิล อยู่ในรูปของแข็งมีลักษณะเป็นผงเกล็ดสีขาวไม่มีกลิ่น กรดซิลิซิกเป็นกรดอ่อนที่มีค่าคงตัวสมดุลน้อย ทำให้กรดแตกตัวได้น้อยโดยจะละลายน้ำได้ในปริมาณที่น้อยมาก ๆ กรดซิลิซิกเกิดจากซิลิคอนออกไซด์จับตัวกับน้ำทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) [70, 75-77] ดังสมการเคมีที่ 2.31



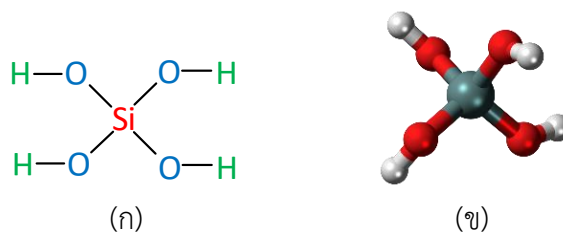
ปฏิกิริยาสมดุลเขียนสมการได้เป็น

$$K_{p,\text{total}} = \frac{[\text{Si}(\text{OH})_4]}{[\text{SiO}_2][\text{H}_2\text{O}]^2} \quad (2.32)$$



รูปที่ 2.21 จำลองการปฏิกิริยาการกัดพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100)

จากปฏิกิริยาการเกิดกรดซิลิซิกนั้นมีความสอดคล้องกับสมการความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH ในสมการเคมีที่ 2.32 อะตอมของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งไปทำปฏิกิริยาการรวมตัวกับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการก่อตัวขึ้นกลายเป็นกรดออร์โธซิลิก (orthosilicic acid) โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก แสดงดังรูปที่ 2.22



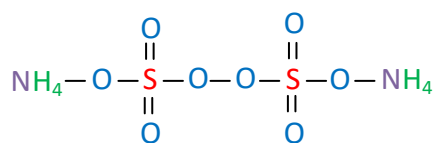
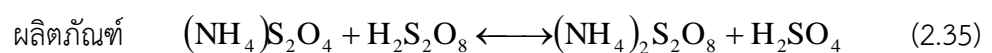
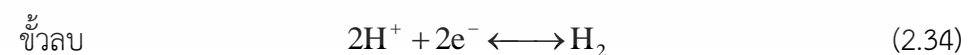
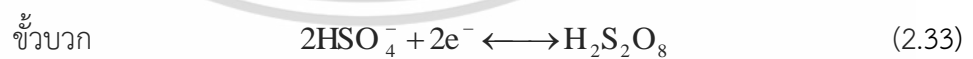
รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก [71]

(ก) โครงสร้างลิวอิส และ(ข) โครงสร้างแบบจำลองสามมิติ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นแก่ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนจากการเติมกรดซิลิซิกในสารละลาย TMAH จะกลายเป็นแหล่งกำเนิดของซิลิเกตหรือชั้นหน้ากากป้องกันบนผิวหน้าอะลูมิเนียม จึงส่งผลให้อะลูมิเนียม ซิลิคอน ไตออกไซด์ได้ซ้าง อย่างไรก็ตามการเติมกรดซิลิซิกนั้นจะส่งผลให้สารละลาย TMAH มีค่า pH ต่ำกว่า 13 [72] ทำให้เกิดความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนมาก เนื่องจากการก่อตัวของเนินพีระมิดแบบสุ่ม ซึ่งเนินพีระมิดแบบสุ่มเกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เปรียบเสมือนชั้นหน้ากากป้องกันการกัด (micromasking) บนพื้นผิวซิลิคอน [73] และสาเหตุที่เป็นไปได้จากการรวมกันจากการทับถมหรือตกตะกอน (redeposition) ของสารละลายบางส่วนที่ไม่ละลายน้ำ

### 2.5.3.3 แอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต

สารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (ammonium peroxodisulfate: AP) นั้นจะมีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น มีสูตรเคมีคือ  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  มีความสามารถในการกัดกร่อนและเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) ได้ดี เมื่อสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตได้รับความร้อนสูงจะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเนื่องจากมีสมบัติการดูดซึมน้ำได้ดี สารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตสามารถละลายได้ดีในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงแต่จะเกิดการจับตัวเมื่อนำไปละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำหรือสถานที่ที่มีความชื้น [14, 74] สารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตไม่สามารถติดไฟได้แต่สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้ซึ่งมีความสามารถในการสนับสนุนการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในการเก็บรักษาจะต้องจัดเก็บในสถานที่ค่อนข้างแห้ง สะอาด มีการระบายอากาศได้ดี และควรเก็บให้พ้นจากบริเวณที่สามารถติดไฟได้ง่าย และในการผสมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตเข้ากับสารละลายตัวอื่นควรจะต้องศึกษาข้อมูลให้ถี่ถ้วนก่อนเพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและทำให้เกิดการระเบิด สารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตสามารถเตรียมได้จากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (electrolysis) ของแอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate) การเจือจางของกรดซัลฟิวริกและอาศัยการตกผลึก เมื่อจุ่มขั้วไฟฟ้าบวกและลบลงในสารละลาย จะเกิดการสร้างเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (peroxodisulfate) โดยโมเลกุลของ  $\text{HSO}_4^-$  ที่ขั้วบวก จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมซัลเฟตเพื่อสร้างแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ดังสมการเคมีที่ 2.35



รูปที่ 2.23 โครงสร้างทางเคมีของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต [74]

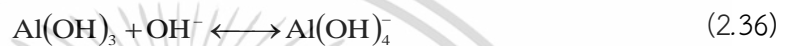
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

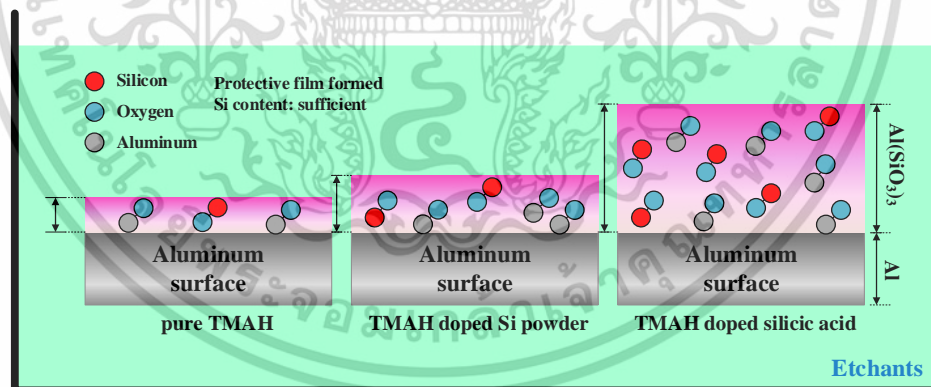
สุดท้ายนำสารที่ได้ผ่านการกรองการตกผลึกการแยกด้วยแรงเหวี่ยงและการอบแห้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แอมโมเนียมเปอร์ซิลิเกต โครงสร้างทางเคมีของสารแอมโมเนียมเปอร์ซิลิเกตหรือไฮดรอกไซด์ซิลิเกต แสดงดังรูปที่ 2.23

#### 2.5.4 ปฏิกริยาการกัดอะลูมิเนียม

กระบวนการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกมีความสำคัญมีความต้องการเลือกใช้ อะลูมิเนียมเป็นชั้น metallization พิล์มอะลูมิเนียมจะถูกควบคุมด้วยสารละลายที่เป็นกรดและต่างที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงอะลูมิเนียมไม่สามารถรักษาได้เพราะชั้นออกไซด์มี  $\text{Al}(\text{OH})_3$  [15, 78] ซึ่งทำปฏิกิริยาในสารละลายต่างอะลูมิเนียมดังสมการที่ 2.36

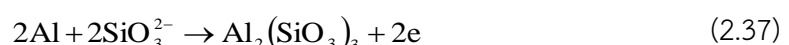


เมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่ำลง จากการแตกตัวของน้ำจะอยู่ในสภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของคูกรด ( $\text{H}^+$ ) และคูเบส ( $\text{OH}^-$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากัน ดังสมการ 2.36 ดังนั้นการละลายน้ำของสารที่เป็นกรดจึงไปทำให้ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนเพิ่มขึ้น การกัดของอะลูมิเนียมจากฟังก์ชันของสารแอมโฟเทอริกของอะลูมิเนียมเป็นชั้นป้องกันกรด ซึ่งจะสามารถช่วยป้องกันการกัดอะลูมิเนียมได้ดี สำหรับฟิล์มอะลูมิเนียมออกไซด์ซิลิเกตในสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ (Aluminium hydroxide:  $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) ในรูปแบบซิลิเกต (pyrophyllite-type) ที่ละลายได้น้อยซึ่งเป็นพื้นผิวอะลูมิเนียมออกไซด์ ดังแสดงในรูปที่ 2.24 [79]



รูปที่ 2.24 ภาพจำลองตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดอะลูมิเนียม

การเติมกรดซิลิสิกปริมาณที่เหมาะสมลงในสารละลาย TMAH จะส่งผลต่อการป้องกันการกัดของชั้นอะลูมิเนียมและชั้นออกไซด์เป็นอย่างมาก เนื่องจากไอออนไฮดรอกไซด์ในสารละลายส่วนมากจะทำปฏิกิริยากับกรดที่เติมลงไปแทนการกัดอะลูมิเนียมและการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ ปฏิกริยาการกัดของอะลูมิเนียม แสดงดังสมการต่อไปนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการที่ 2.37 เป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดซิลิซิกและอะลูมิเนียม เนื่องจากการเติมซิลิเกต ( $\text{SiO}_3$ ) เข้าไปในระบบปฏิกิริยาสารเคมี จึงซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีนั้นคืออะลูมิเนียมซิลิเกต  $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$  ซึ่งมีค่าน้อยกว่าอะลูมิเนียมไฮดรอกไซด์ โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมานี้สามารถละลายน้ำได้น้อย ดังนั้นในระหว่างกระบวนการกัด ผลิตภัณฑ์  $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$  นี้จะทำหน้าที่เปรียบเสมือนชั้นหน้ากปกป้องกันการกัดบนชั้นอะลูมิเนียมและชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ [80] และเมื่อเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH จะทำให้มีความเป็นกรด-ด่างอยู่ในระดับปานกลาง (ค่า pH ระหว่าง 8 ถึง 12) ส่งผลทำให้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ลดลง [81-82]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การออกแบบกระบวนการสร้างและวิธีการทดลอง

ในบทนี้ได้กล่าวถึงการออกแบบลวดลายต้นแบบและการเตรียมชิ้นงานสำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงสองรอยสัมผัสข้อต่อกึ่งชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ การทดลองหาเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดเพื่อใช้ในการสร้างโครงสร้างร่องพื้นที่รับสัญญาณของตัวตรวจวัดแสงด้วยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้อุณหภูมิจนถึงการกัด 80 องศาเซลเซียส แผ่นฐานรองที่ใช้คือซิลิคอนชนิดโซคราสกี (czochralski silicon: CZ) ชนิดเอ็นระนาบ (100) มีสภาพต้านทาน 5-10  $\Omega$ -cm ความหนา 625  $\mu\text{m}$  ลักษณะโครงสร้างรอยสัมผัสระหว่างซิลิคอนและอะลูมิเนียมเป็นขั้วโลหะทั้งสองของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้าง การออกแบบการทดลองและวิธีการทดลอง งานวิจัยมีส่วนที่สำคัญสองส่วน คือ ส่วนแรกเป็นการออกแบบลวดลายต้นแบบโครงสร้างแสงและหาเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดเพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบผิวเรียบร่องรูปตัวยู (U-MSM) แบบพีระมิดร่องรูปตัวยู (MPU-MSM) และแบบพีระมิดสองขนาดร่องรูปตัวยู (DPU-MSM) และส่วนที่สองนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างมาทำการวิเคราะห์ผลการทดลองเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงต่อไป

#### 3.1 การเตรียมชิ้นงานและเลือกเงื่อนไขงานวิจัย

การเลือกเงื่อนไขที่ใช้สำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงมีความจำเป็นอย่างยิ่งก่อนที่จะเข้าสู่กระบวนการสร้างชิ้นงานที่จะเกิดขึ้น การออกแบบกระบวนการสร้างเราได้มุ่งเน้นการพัฒนาและปรับปรุงงานวิจัยก่อนหน้านี้ให้มีคุณภาพดียิ่งขึ้น โดยเงื่อนไขต่างๆ ที่ได้จากการทดลองจะถูกนำมาพิจารณาเพื่อใช้ในการวิจัยนี้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

##### 3.1.1 แผ่นฐานรองซิลิคอน

สำหรับการพัฒนางานวิจัยนี้ได้มีการเลือกใช้แผ่นฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นมาสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงเนื่องจากซิลิคอนเป็นอะตอมของสารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่งที่สำคัญ และสามารถใช้สร้างเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเกือบทุกชนิด ซิลิคอนจะมีอิเล็กตรอนวงนอกสุดจำนวน 4 ตัว แต่ละอะตอมจะเกาะเกี่ยวกันกับซิลิคอนอะตอมอื่น ๆ ทำให้เกิดแถบยึดเหนี่ยวในแนวตั้ง และแนวนอนทำให้วัสดุสารกึ่งตัวนำรวมกันเป็นชั้นหรือเป็นผลึกได้ นอกจากนี้ซิลิคอนมีราคาถูกและสามารถทนความร้อนได้ดีจึงเป็นที่นิยมใช้ในการนำมาผลิตในวงจรรวม

##### 3.1.2 ขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสง

การสร้างโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบสองรอยสัมผัสข้อต่อกึ่งหรือรอยสัมผัสโลหะ – สารกึ่งตัวนำ – โลหะ โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 100  $\mu\text{m}$  ขนาดลวดลายต้นแบบไม่เล็กจนเกินไปไม่ทำให้สัมผัสกันซึ่งไม่ให้เกิดการลัดวงจรในภายหลังและขนาดไม่ใหญ่ไปเพื่อประหยัดพื้นที่ของอุปกรณ์ ในการวิจัยนี้เลือกอะลูมิเนียม (Al) นำมาใช้เป็นขั้วโลหะ เนื่องจากอะลูมิเนียมมีคุณสมบัติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แข็ง และมีจุดหลอมเหลวที่ 660 องศาเซลเซียส ทำให้ทนต่อการกัดกร่อนจากกรดและด่างของ สารละลายได้ นอกจากนี้อะลูมิเนียมสามารถนำไฟฟ้าได้ดีรวมถึงมีความต้านทานไฟฟ้าต่ำและยึดติด บนพื้นผิวของแผ่นฐานรองซิลิคอน

### 3.1.3 สารละลายที่ใช้กัดโครงสร้างพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง

กระบวนการกัดเป็นขั้นตอนที่ต้องใช้สารละลายที่เหมาะสมสำหรับการกัดโครงสร้างที่ต้องการ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบกระบวนการกัดแบ่งออกเป็นสองวิธี ได้แก่ การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกครั้งเดียว (single anisotropic etching) การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิค การปรับซ็อนตัวเอง (repetitive anisotropic etching with a self-alignment) การเลือกใช้ สารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดในการทดลอง คือ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (5, 10, 15, 20 และ 25 wt.%) และเลือกใช้สารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิก (30, 32, 34 และ 36 g/l) เพื่อช่วยลดการกัดชั้นอะลูมิเนียมและสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (5, 6, 7 และ 8 g/l) เพื่อปรับปรุงพื้นผิวซิลิคอน โดยเงื่อนไขการกัดที่ได้จากการทดลองสำหรับกระบวนการกัดแต่ละ โครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 3.1



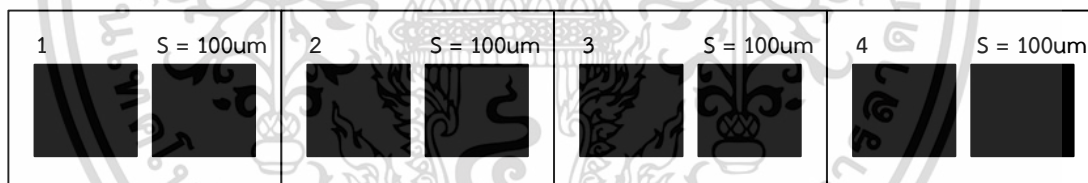
รูปที่ 3.1 กระบวนการกัดโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงด้วยเงื่อนไขสารละลายที่ใช้กัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ไปยังผู้อื่นเป็นการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 การออกแบบลวดลายต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง

ในการออกแบบกระจกต้นแบบเพื่อใช้สร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X6 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ออกแบบไปทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์ม และนำแผ่นฟิล์มไปติดบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบเพื่อใช้สำหรับกระบวนการสร้างขั้นต่อไป

สำหรับการออกแบบลวดลายต้นแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบต่างๆ นั้นจะต้องคำนึงพารามิเตอร์แรกที่สำคัญ คือ ความกว้างบริเวณปลดพาหะ (depletion region) เนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดตกคร่อมที่บริเวณปลดพาหะ ส่งผลให้กระแสแสงเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM แบบ U-MSM แบบ MPU-MSM และแบบ DPU-MSM ที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/n-Si/Al ประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสชนิดต่อกันสองรอยสัมผัสโดยขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากัน คือ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  และระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งขนาด  $100 \mu\text{m}$  ซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไปเพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ให้แก่ตัวอุปกรณ์ และไม่เล็กจนทำให้ลวดลายต้นแบบอาจสัมผัสถึงกันทำให้เกิดการลัดวงจรในภายหลังได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.2 เป็นการแสดงลวดลายกระจกต้นแบบที่ใช้สำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่โครงสร้าง



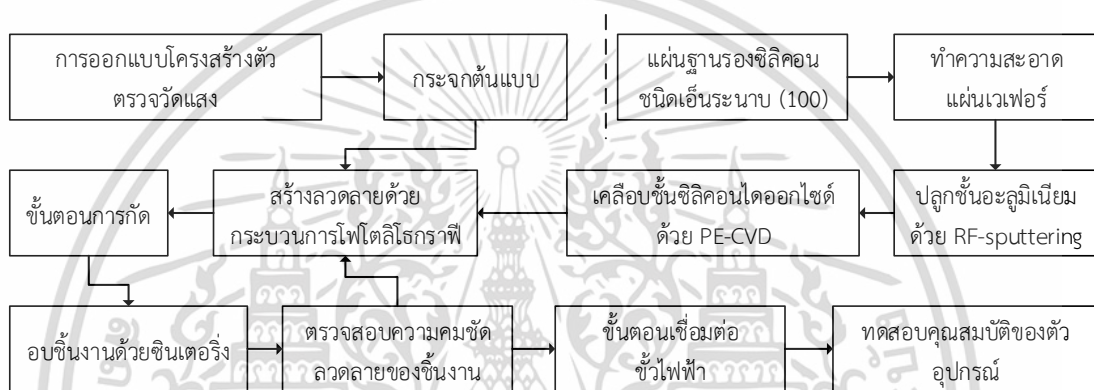
รูปที่ 3.2 ลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง

### 3.3 กระบวนการสร้าง

ในวิทยานิพนธ์นี้ถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาวัดตัวตรวจวัดแสงถูกสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100) สภาพความต้านทาน 5-10  $\Omega \cdot \text{cm}$  ความหนา  $625 \mu\text{m}$  ส่วนของขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ประกอบด้วยกระบวนการสร้างที่สำคัญ 9 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอนเริ่มจากทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ (organic) และไอออนของโลหะ (metal ions) ที่ติดอยู่บนผิวซิลิคอน 2) กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมหนา  $1.5 \mu\text{m}$  เคลือบด้วยวิธีกระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอริง (Radio Frequency Sputtering: RF sputtering) 3) กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา  $20,000 \text{ \AA}$  โดยวิธีการตกสะสมไอ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma - Enhanced Chemical Vapor Deposition: PE-CVD) เพื่อใช้เป็น หน้ากากป้องกันการกัดชั้นอะลูมิเนียม 4) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) เพื่อ สร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง โดยการเปิดผิวด้านหน้าของแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการโฟโต ลิโธกราฟี 5) การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด 6) กระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนให้ เป็นร่องรูปตัวยูโดยใช้การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก 7) กระบวนการซินเตอร์ริงเพื่อทำให้ออย สัมผัสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมและเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ 8) ขั้นตอนการเชื่อมต่อสายติด กับขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงิน และ 9) ทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสง ขั้นตอนต่างๆ มีรายละเอียด ดังต่อไปนี้



รูปที่ 3.3 แผนภาพขั้นตอนสร้างตัวตรวจวัดแสง

### 3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบไขมันที่อยู่บน ผิวด้านซิลิคอน ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด และถือว่าเป็นขั้นตอนที่ไม่ควรมองข้ามเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจมีผลโดยตรงต่อการเกิดจุดบกพร่องของตัวอุปกรณ์และส่งผลกระทบต่อขั้นตอนกระบวนการขึ้นลวดลายและประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงลดลงได้ โดยมีขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน เริ่มจากนำแผ่นซิลิคอนแช่ลงในน้ำปราศจากไอออน (de-ionization water: DI water) โดยทำความสะอาดด้วยเครื่องอัลตราโซนิก (ultrasonic) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน จากนั้นต้มในกรดปิรันยา ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ : piranha) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกจำพวกโลหะแล้วล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ (DI-water) นำไปเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน ถัดมาจุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid: HF) ที่ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native oxide) บนผิวด้านของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในอากาศ จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากประจุอีกครั้ง แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม

หลังจากผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมโดยทำการเคลือบด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริงเป็นกระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมให้มีความหนา  $1.5 \mu\text{m}$  โดยอาศัยหลักการที่อะตอมของผิวหน้าสารเคลือบซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นเป้าถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง จากนั้นอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะวิ่งมาเคลือบบนแผ่นผลึกซิลิคอน โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับความถี่สูง (RF power source) เพื่อสร้างพลาสมาของอาร์กอน ( $\text{Ar}^+$ ) แทนระยะห่างระหว่างเป้าและแผ่นเวเฟอร์จะอยู่ค้ำยข้างใกล้กัน เช่น ต่ำกว่า  $10 \text{ cm}$  และความดันของก๊าซอาร์กอนจะอยู่ในระดับประมาณ  $0.1 \text{ Torr}$  [72] ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้ไอออนของอาร์กอนเคลื่อนที่เข้าหาเป้าได้มากขึ้นทำให้อัตราการเกิดชั้นอะลูมิเนียม (deposition rate) สูงขึ้น

### 3.3.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

การปลูกฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา (PE-CVD) ใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ  $<400 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นวิธีการปลูกชั้นฟิล์มบางที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสถานะก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์การปลูกฟิล์มวิธีนี้ใช้หลักการพลาสมาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ จึงทำให้สามารถปลูกชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำ [83] ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์

### 3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

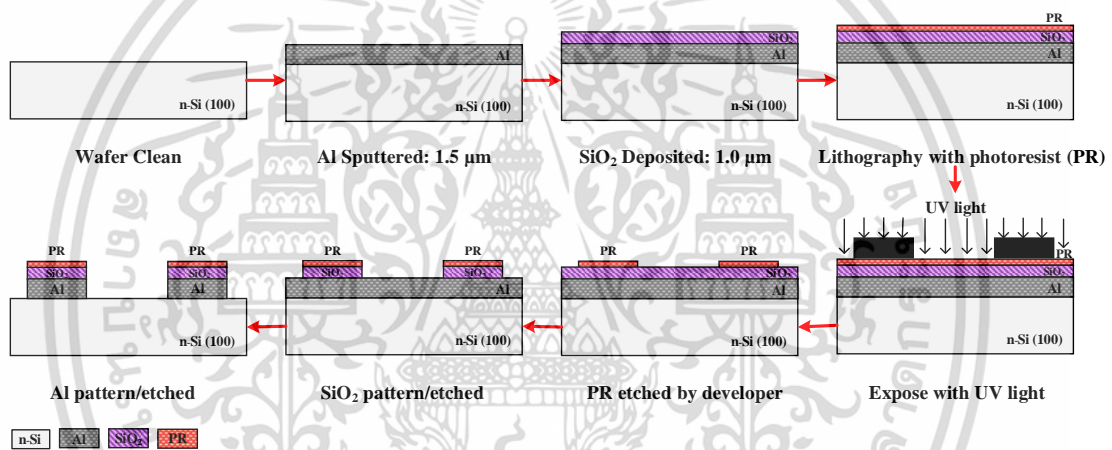
กระบวนการสร้างลวดลายของอุปกรณ์ในการสร้างลวดลายขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระจกต้นแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบนี้จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายทึบ แสงจะไม่สามารถผ่านได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ไม่ถูกแสงและบางบริเวณที่ถูกแสง เมื่อนำไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อดอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ รูปที่ 3.4 เป็นขั้นตอนการสร้างตัวตรวจวัดแสงด้วยกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยรายละเอียดทั้งหมดดังนี้

- 1) อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นออก ที่อุณหภูมิ  $90\text{-}100 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $1 \text{ ชั่วโมง}$
- 2) เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์
- 3) อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ที่อุณหภูมิ  $90 \text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นเวลา  $45 \text{ นาที}$  เพื่อให้ น้ำยาไวแสงแห้ง
- 4) ฉายแสงย่านอัลตราไวโอผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่องปรับช้อนมาร์ก (mask aligner) ใช้เวลา

ในการฉายแสง  $15 \text{ วินาที}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 5) ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer) ล้างในน้ำปราศจากประจุ แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 6) อบครั้งที่สอง (post bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 45 นาที เพื่อให้ น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- 7) กัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลาย BOE แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุแล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 8) กัดชั้นอะลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลายผสมกรดฟอสฟอริก จากนั้นล้างในน้ำปราศจากประจุ แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 9) ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออกด้วยอะซีโตน แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.4 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al

### 3.3.5 การเตรียมสารเคมีและเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้ในการกัด

การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้กัดสำหรับสร้างโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง เริ่มจากผสมอัตราส่วนของสารละลายที่ใช้กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และชั้นอะลูมิเนียม และคำนวณส่วนผสมสารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิกและสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต และความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ที่ใช้ในกระบวนการกัด ดังต่อไปนี้

การกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะต้องเตรียมสารเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงที่ต้องการเปิดลวดลายออก สารละลายที่ใช้ในการกัด เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ออกไซด์ (BOE) ประกอบด้วยส่วนผสมของ HF : NH<sub>4</sub>F ในอัตราส่วน 1 : 5 จะมีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์อยู่ที่ 1000 Å/min

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

การคำนวณการเตรียมเงื่อนไขสารละลายที่ใช้กัดสารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิกและสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต และความเข้มข้นของสารละลาย TMAH สามารถคำนวณความเข้มข้นของสารละลายได้ดังนี้

$$\text{จากสมการ} \quad C_1V_1 = C_2V_2 \quad (3.1)$$

เมื่อ  $C_1 =$  ความเข้มข้นเริ่มต้น

$V_1 =$  ปริมาตรเริ่มต้น

$C_2 =$  ความเข้มข้นสุดท้าย

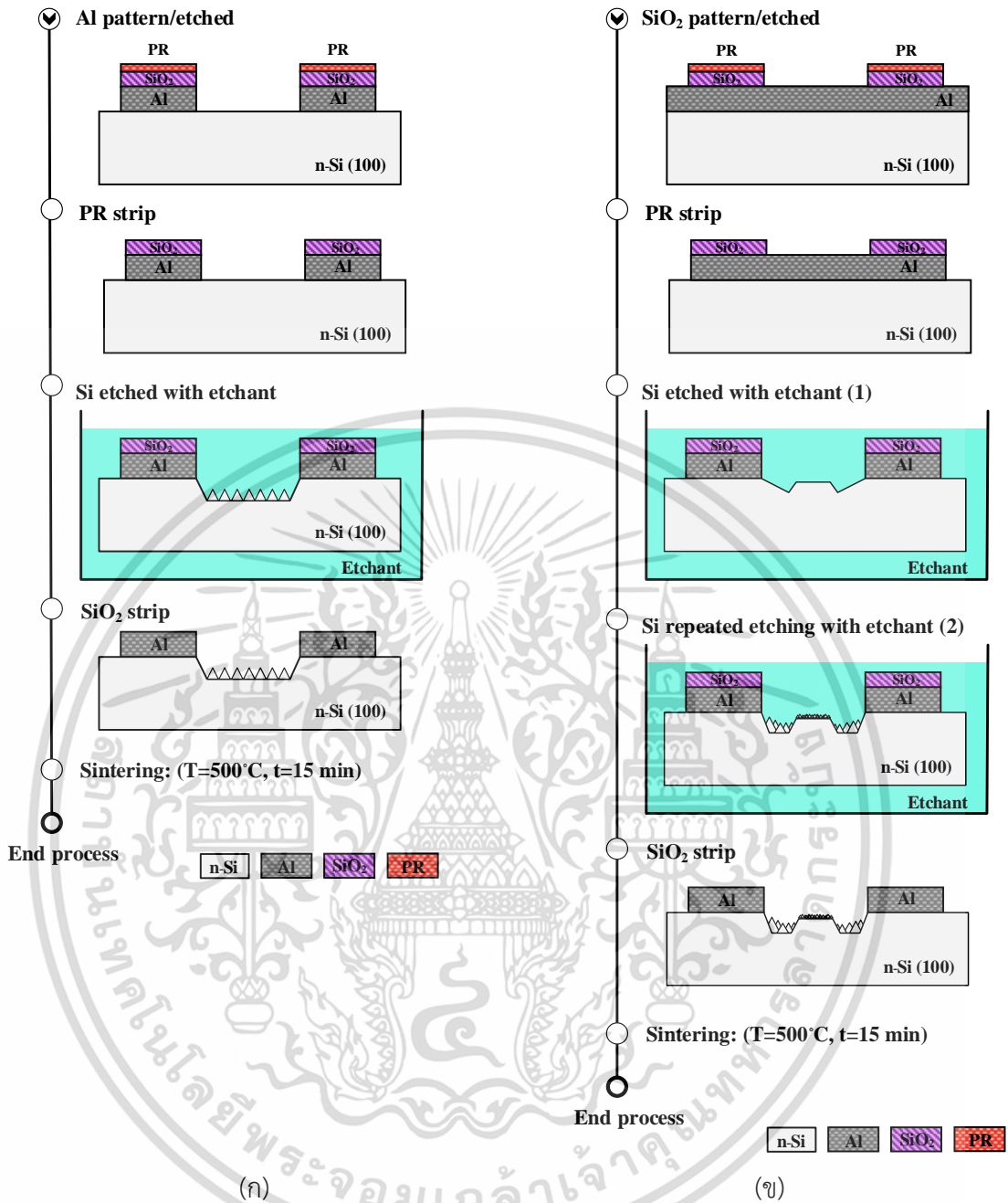
$V_2 =$  ปริมาตรสุดท้าย

### 3.3.6 กระบวนการกัด

การสร้างตัวตรวจวัดแสงจะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น หนา 100 ความหนา 625  $\mu m$  มีขั้วโลหะเป็นอะลูมิเนียม โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดมีทั้งหมดสามโครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างแบบ U-MSM โครงสร้างแบบ MPU-MSM และโครงสร้างแบบ DPU-MSM ลักษณะการกัดโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงจะแบ่งออกเป็นสองวิธี ดังแสดงในรูปที่ 3.5 โดยมีเงื่อนไขและขั้นตอนการกัดดังต่อไปนี้

วิธีแรกเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกครั้งเดียว ดังรูปที่ 3.5(ก) สำหรับวิธีการนี้จะใช้กัดตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ U-MSM ด้วยเงื่อนไขของสารละลาย dual-doped TMAH และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MPU-MSM ด้วยเงื่อนไขของสารละลาย pure TMAH มีรายละเอียดดังนี้

- 1) กัดโครงสร้างแบบ U-MSM ด้วยสารละลาย dual-doped TMAH ประกอบด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt.% ผสมด้วยสารเติมแต่งการกัดของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตที่ปริมาณ 7 g/l ร่วมกับกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l
- 2) กัดโครงสร้างแบบ MPU-MSM ด้วยสารละลาย pure TMAH ประกอบด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt.%
- 3) ต้มสารละลายที่ใช้กัดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องกวนสารละลายหมุนด้วยแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ทำการกัด
- 4) เมื่อทำการกัดชิ้นงานเรียบร้อยแล้วให้ทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ แล้วเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (ก) การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกครั้งเดียว และ(ข) การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ้อนตัวเอง

วิธีที่สองเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ้อนตัวเอง ดังรูปที่ 3.5(ข) โดยใช้กัดตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ด้วยเงื่อนไขของสารละลาย pure TMAH (ครั้งแรก) และสารละลาย silicic acid-added TMAH (ครั้งที่สอง) หรือเรียกว่า pure TMAH/ silicic acid-added TMAH มีรายละเอียดดังนี้

1) กัดโครงสร้างแบบ DPU-MSM ด้วยสารละลาย pure TMAH/ silicic acid-added TMAH นั่นคือ

กัดครั้งแรกด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt.% สำหรับการกัดครั้งแรกเราจะใช้ร่วมกับเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เทคนิคการปรับซ้อนตัวเองซึ่งสารละลาย TMAH จะกัดผ่านชั้นอะลูมิเนียมโดยตรงก่อนถึงพื้นผิวซิลิคอน และกัดซ้ำครั้งที่สองด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt.% ผสมด้วยกรดซัลฟิวริก ปริมาณ 34 g/l ที่จะกัดโครงสร้างของผิวซิลิคอนต่อจากสารละลาย TMAH

- 2) ต้มสารละลายที่ใช้กัดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องกวนสารละลายหมุนด้วยแท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ทำการกัด
- 3) เมื่อทำการกัดชิ้นงานเรียบร้อยแล้วให้ทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ แล้วเป่าชิ้นงานให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



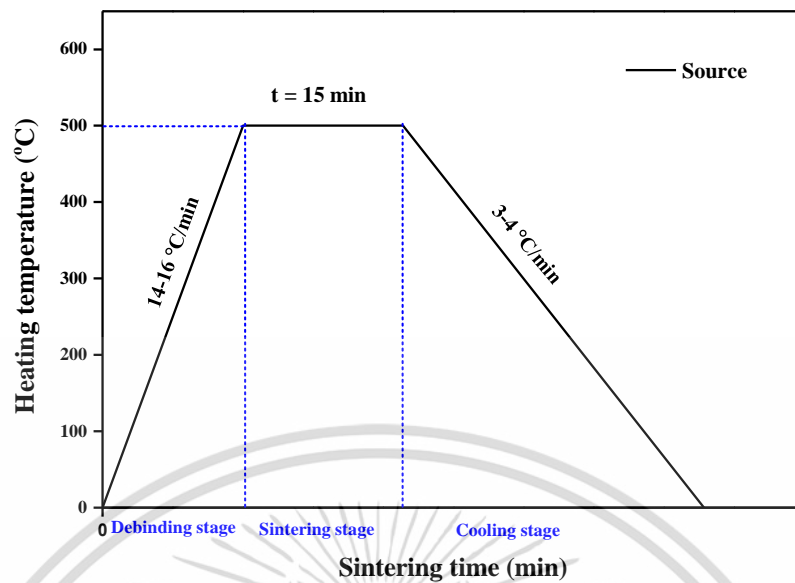
รูปที่ 3.6 (ก) อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด และ (ข) ภาพถ่ายชิ้นงานหลังการกัด

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยเงื่อนไขการกัด จะมีลักษณะดังรูปที่ 3.6(ก) จากนั้นนำชิ้นงานที่ได้จากการกัดเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริง เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างชั้นอะลูมิเนียมและเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ แสดงดังรูปที่ 3.6(ข)

### 3.3.7 กระบวนการซินเตอร์ริง

เมื่อทำการกัดชิ้นงานแล้วจากนั้นนำชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้รอยสัมผัสระหว่างส่วนของโลหะอะลูมิเนียมกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ [84] โดยปกติแล้วจะนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 0.7 ลิตร/นาที่ ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แต่สำหรับการศึกษาในกระบวนการสร้างรอยสัมผัส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงจะเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่เป็นตัวกำหนดว่ารอยสัมผัสที่ได้เป็นรอยสัมผัสแบบข้อต่อคีย์หรืออัลลอย ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนนี้จึงทำการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส

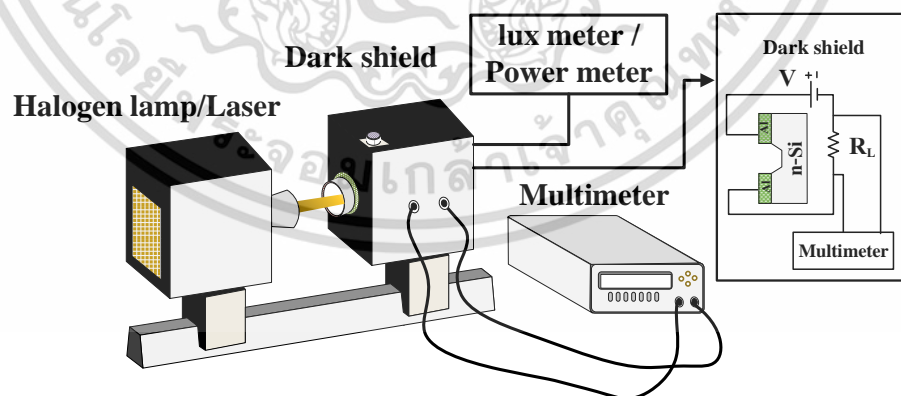
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่ใช้ในการซินเตอร์ริงตัวตรวจวัดแสงหลังการกัดที่อุณหภูมิ 500 °C เมื่อใช้เวลาในการการซินเตอร์ริง 15 นาที

### 3.3.8 การทดลองตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างทั้งหมดจากนั้นจะนำชิ้นงานไปตัดแยกออกจากกัน แล้วนำมาเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน จากนั้นทำการทดลองวัดการตอบสนองทางแสงด้วยสัญญาณแบบกระแสตรง ดังรูปที่ 3.8 เมื่อฉายแหล่งกำเนิดแสงด้วยแสงเลเซอร์ ที่มีความยาวคลื่น 635 nm ฉายให้แก่ตัวอุปกรณ์ แล้วนำข้อมูลของกระแสที่วัดได้มาเขียนเป็นความสัมพันธ์ลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดัน



รูปที่ 3.8 แผนภาพชุดเครื่องมือทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์นี้กล่าวถึงการศึกษาเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดและผลการทดลองที่ได้จากโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดโลหะ - สารกึ่งตัวนำ - โลหะ (Al/n-Si/Al) มีลักษณะสองรอยสัมผัสขั้วต่อกึ่งที่สร้างบนแผ่นฐานรองรับซิลิคอนชนิดเอ็นที่สภาพความต้านทาน 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร สำหรับเงื่อนไขการสร้างโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบราบเรียบภายในร่องรูปตัวยู แบบพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู และแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู คือ การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic wet etching) โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ากว้าง (wide electrode gap) ในส่วนผลการทดลองได้นำเสนอการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโครงสร้างภายในพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจากการออกแบบโครงสร้างที่แตกต่างกัน การศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่างๆ ทั้งแบบกระแสตรง (DC) และแบบกระแสสลับ (AC) ด้วยการมอดูเลตสัญญาณคลื่นรูปไซน์ความถี่ 100 Hz ถึง 16 MHz เช่น คุณสมบัติกระแส - แรงดันไฟฟ้า (I - V) และคุณสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดัน (C - V) จากนั้นวิเคราะห์ผลการทดลองคุณสมบัติทางแสงที่เกิดขึ้นโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสง

กลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่มีผลต่อการเพิ่มกระแสไฟฟ้า นั่นคือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (depletion width:  $W_D$ ) ดังนั้นเราจึงนำพารามิเตอร์นี้มาทำการวิเคราะห์เพื่อใช้ในการออกแบบลักษณะโครงสร้างภายในพื้นที่รับสัญญาณ เมื่อทำการป้อนแรงดันไฟฟ้าให้กับตัวอุปกรณ์ทำให้ส่วนของบริเวณปลอดพาหะถูกสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดคดคร่อมในส่วนนี้ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าแปรผันตามแรงดันที่เปลี่ยนแปลงไป ในที่นี้จะตอมพาหะทั้งหมดจะถูกไอออนซ์ สำหรับการออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงให้มีพื้นที่รับสัญญาณแสงเพิ่มขึ้นจะต้องคำนึงถึงความกว้างของบริเวณปลอดพาหะสามารถหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจากสมการ

$$W_D = \left[ \frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_D} \right) (V_{bi} - V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.1)$$

เมื่อ  $\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำมีค่าเท่ากับ  $1.054 \times 10^{-10}$  F/m,  $q$  คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ  $1.602 \times 10^{-19}$  C,  $N_D$  คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือมีค่าเท่ากับ  $4.51 \times 10^{14}$  cm<sup>-3</sup>,  $V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ (V) และ  $V_A$  คือ แรงดันไบอัส (V) จากผลการ

คำนวณความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (W) ของอุปกรณ์ที่มีสภาพความต้านทาน 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร พบว่าเมื่อแรงดันเพิ่มขึ้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมีค่ามากขึ้น โดยที่แรงดัน 10 โวลต์ จะมีค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ 3.85-5.48  $\mu\text{m}$  นั้นหมายความว่าเราสามารถออกแบบพื้นที่รับแสงไม่เกิน 5.5  $\mu\text{m}$  เบื้องต้นเราจะสามารถคำนวณหาการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงภายในโครงสร้างร่องรูปตัวยูแนวระนาบ (111) ตามความสัมพันธ์ทางตรีโกณมิติสมการ  $\tan(\theta) = h/p$  จากการคำนวณค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะทำให้สามารถกำหนดความลึก (ด้าน h) ที่ใช้กัดร่องลึกเท่ากับ 4  $\mu\text{m}$  การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมีมุมการกัดเท่ากับ 54.74 องศา พบว่าพื้นที่รับแสงผนังด้านข้างที่ลาดเอียงแนวระนาบ (111) (ด้าน g) มีค่าพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นเป็น 1.73 เท่าของพื้นที่รับแสงแนวราบ (ด้าน p) ซึ่งตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้างในงานวิจัยนี้มีร่องรูปตัวยูที่ถูกกัดระหว่างแนวระนาบ (111) และระนาบ (100) จะมีมุมการกัดเท่ากับ 54.74 องศา ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงทุกโครงสร้างจะมีพื้นที่รับแสงในส่วนนี้เพิ่มขึ้น 1.73 เท่า กระบวนการกัดเป็นขั้นตอนสำคัญสำหรับการสร้างพื้นที่ภายในโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงเพื่อเพิ่มพื้นที่รับสัญญาณแสง ดังนั้นการเลือกใช้สารละลายที่ใช้กัดเป็นส่วนที่จำเป็นในการทดลองพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อนำไปสู่การกำหนดเงื่อนไขที่ใช้กัดโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงในรูปแบบที่ต้องการ โดยมีรายละเอียดการทดลองดังต่อไปนี้

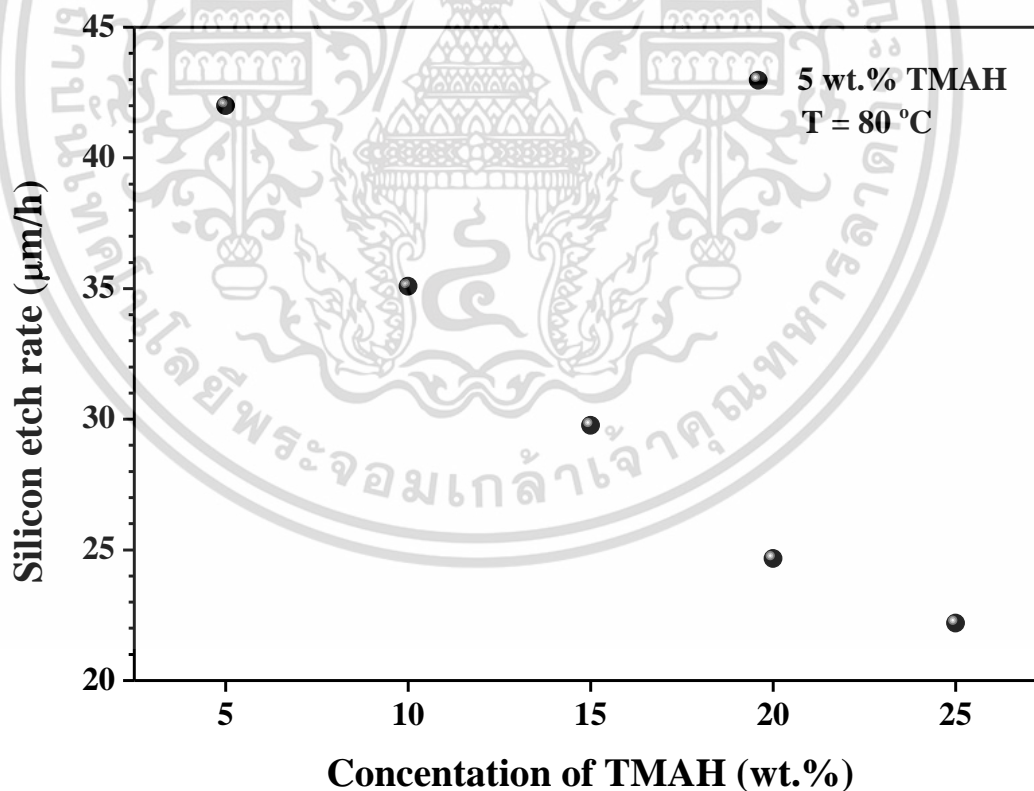
#### 4.1.1 การศึกษาลักษณะการกัดของสารละลายที่ใช้กัดโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง

สารละลายที่ใช้กัด (etchant) เป็นสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดเพื่อใช้สร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างต่างๆ จึงมีความจำเป็นต้องทำการศึกษาและทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมและสอดคล้องกับเทคนิคการสร้างของห้องปฏิบัติการให้ดำเนินการทดลองได้ สารละลายที่ถูกนำมาใช้ในการศึกษา ได้แก่ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) และสารเติมแต่งการกัดของกรดซัลฟิวริกและสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต (AP) จากการทดลองนี้ใช้กระบวนการสร้างด้วยเทคนิคการกัดแบ่งออกเป็นสองเทคนิค นั่นคือ กระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกครั้งเดียว (single anisotropic etching) และกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ้อนตัวเอง (repetitive anisotropic etching with a self-alignment)

##### 4.1.1.1 การกัดเปียกด้วยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

การสร้างโครงสร้างภายในพื้นที่รับแสงด้วยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกในการทดลองนี้ โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 5 wt.%, 10 wt.%, 15 wt.%, 20 wt.% และ 25 wt.% การเลือกใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้กัดนั้นเราจะพิจารณา

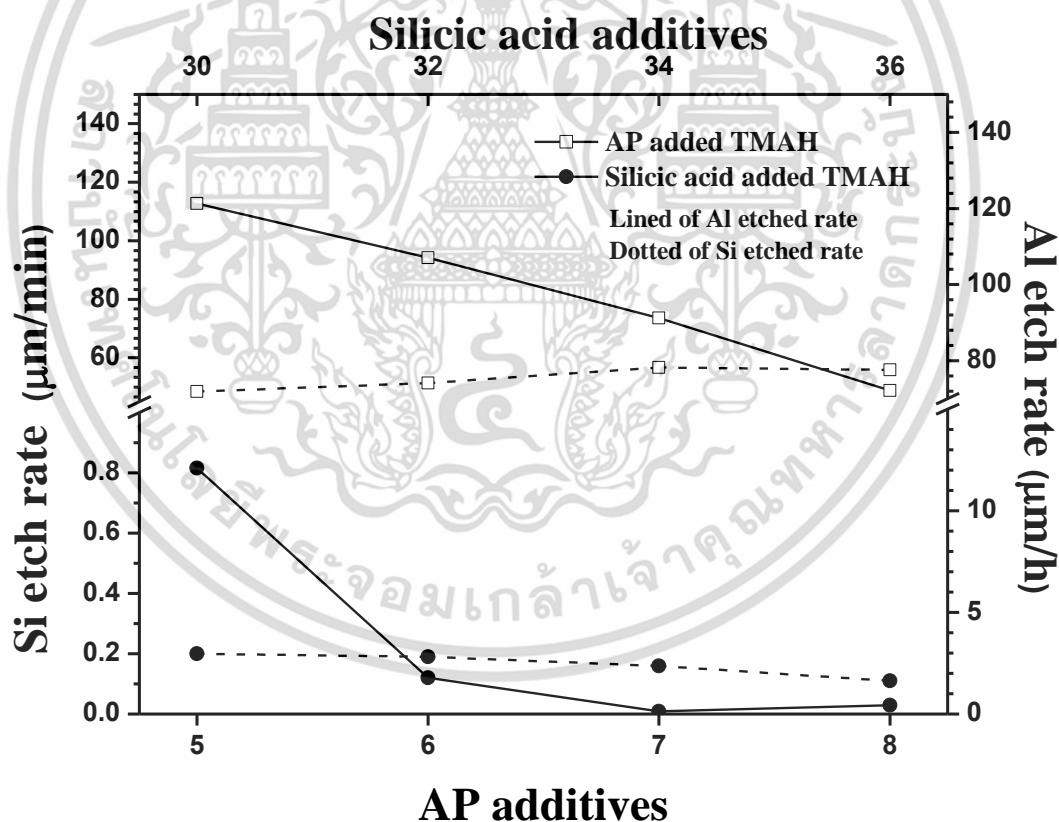
จากอัตราการกัดซิลิคอนโดยอ้างอิงจากการคำนวณความลึกของร่องตัวงู (ความลึกประมาณ  $4 \mu\text{m}$ ) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ในการกำหนดภายในโครงสร้างร่องรูปตัวงู เราสามารถหาอัตราการกัดซิลิคอนได้จากอัตราส่วนการสูญเสียมวลหรือความลึกของแผ่นซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัด (material depth) ต่อเวลาในการกัด (etching time) หน่วยของอัตราการกัด คือ ความยาวต่อหน่วยของเวลา [85-86] จากการตรวจสอบอัตราการกัดซิลิคอนของสารละลายที่ใช้กัด จะเห็นได้ว่าทุกความเข้มข้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นมีค่าประมาณเป็นเชิงเส้น ดังแสดงในรูปที่ 4.1 เมื่อพิจารณาสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% พบว่าที่ความเข้มข้นนี้เป็นเงื่อนไขที่กัดได้เร็วที่สุดมีอัตราการกัดเท่ากับ  $42 \mu\text{m/h}$  สามารถกัดซิลิคอนความลึกประมาณ  $4.1 \mu\text{m}$  ขณะที่สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt.% มีอัตราการกัดซิลิคอนช้าที่สุดเท่ากับ  $22.2 \mu\text{m/h}$  สำหรับกระบวนการกัดแบบเปียกที่มีค่าแอนไอโซทรอปีของอัตราการกัดต่ำ ทั้งนี้เพราะอัตราการกัดทางแนวอนจะต่ำกว่าอัตราการกัดทางแนวตั้งเล็กน้อย ซึ่งการกัดพื้นผิวซิลิคอน (100) ผนังด้านข้างที่ลาดเอียง(ระนาบ (111)) และด้านล่างที่แบนราบ (ระนาบ (100)) ทำมุมกับพื้นผิวของแผ่นซิลิคอนคือ  $\arctan\sqrt{2} = 54.7^\circ$  หากกัดจนถึงจุดหนึ่งที่ระนาบ (100) หมดไปจะเกิดเป็นร่องที่มีหน้าตัดเป็นรูปตัววี [87-88]



รูปที่ 4.1 อัตราการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ

#### 4.1.1.2 การกัดเปียกด้วยการเติมสารเติมแต่งการกัด

สารละลาย TMAH ที่มีความเข้มข้น 5 wt.% ถูกนำมาใช้ในงานวิจัยนี้ด้วยกระบวนการกัดแบบเปียกเนื่องจากมีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก และมีอัตราการกัดซิลิคอนค่อนข้างสูง การใช้สารละลาย TMAH บริสุทธิ์ สามารถกัดซิลิคอนให้เกิดเป็นโครงสร้างร่องรูปตัวยู แต่อย่างไรก็ตาม โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นอะลูมิเนียมอาจได้รับผลกระทบโดยตรงจากสารละลาย ซึ่งการใช้สารละลาย TMAH มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมสูง ดังนั้นเราได้มีการศึกษาสารเติมแต่งการกัด (etching additive) ลงในสารละลาย TMAH สำหรับการแก้ไขปรับปรุงคุณสมบัติของสารละลายที่ใช้กัดให้เป็นไปตามที่ต้องการเพื่อให้ได้โครงสร้างที่สมบูรณ์ ซึ่งสารเติมแต่งการกัดที่เลือกนำมาใช้ในการทดลอง ได้แก่ ตัวแรก คือ สารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิกที่มีคุณสมบัติที่สามารถลดการกัดอะลูมิเนียมและตัวที่สอง คือ สารเติมแต่งการกัดของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตที่ช่วยเพิ่มปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนนำมาเป็นเงื่อนไขในการสร้างตัวตรวจวัดแสง



รูปที่ 4.2 อัตราการกัดซิลิคอนและอัตราการกัดอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH เติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต (AP) และของสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิกที่ปริมาตรต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.2 ผลการทดลองพบว่าอัตราการกัดอะลูมิเนียมลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตมากขึ้น ในขณะที่อัตราการกัดซิลิคอนมีค่าเพิ่มขึ้นร้อยละ 15.46 เปอร์เซ็นต์ จากการเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตความเข้มข้นจาก 5 g/l ถึง 8 g/l โดยมีลักษณะการเพิ่มขึ้นของกราฟเป็นแบบเชิงเส้น การเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตลงในสารละลาย TMAH ซึ่งมีผลโดยตรงต่อการกัดซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตลงในสารตั้งต้นมีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดีจึงสามารถแยกโมเลกุลของน้ำได้ โดยจะพบว่าออกซิเจนจากสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตมีมากกว่าจากน้ำ [89-90] ดังนั้นสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟตจึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญในการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวซิลิคอนจึงส่งผลทำให้มีอัตราการกัดของซิลิคอนเพิ่มมากขึ้น

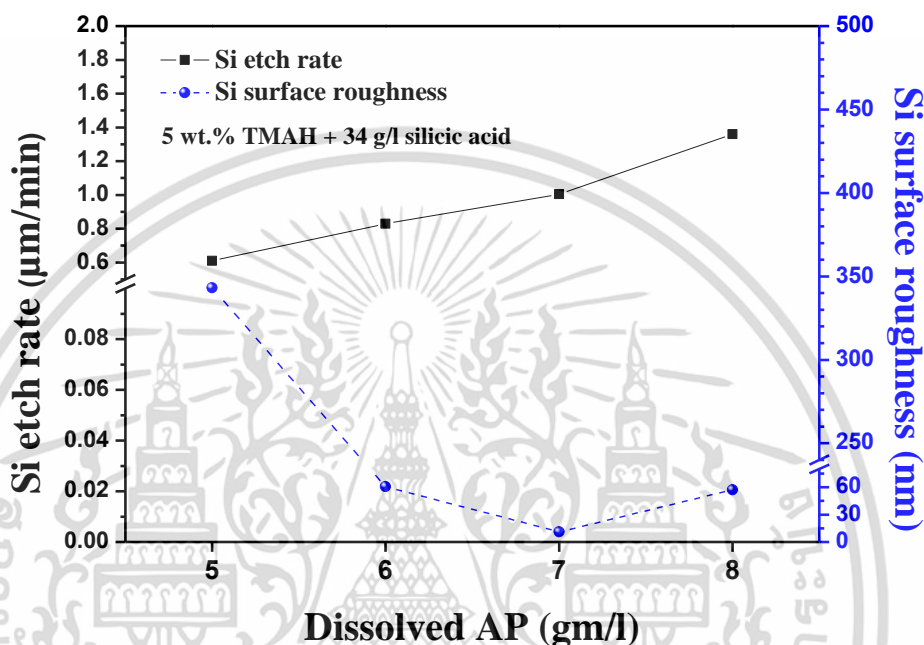
ในส่วนของสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิก จะเห็นได้ว่าอัตราการกัดซิลิคอนลดลงเมื่อความเข้มข้นของกรดซิลิซิกเพิ่มขึ้น นั่นคือความเข้มข้นของกรดซิลิซิก 30, 32, 34 และ 36 g/l มีอัตราการกัดซิลิคอนเท่ากับ 0.2, 0.19, 0.16 และ 0.11  $\mu\text{m}/\text{min}$  ตามลำดับ อธิบายได้ว่าการเติมกรดซิลิซิกทำให้เกิดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีปริมาณความเข้มข้นหมู่ไฮดรอกซิลของกรดซิลิซิก ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) มากพอที่จะสามารถทำให้ลดจำนวนโมเลกุลของน้ำลงได้ สาเหตุที่ต้องลดจำนวนโมเลกุลของน้ำเพราะว่าโมเลกุลของน้ำที่มากเกินไปส่งผลต่อการลดความเป็นด่างของสารละลายลงหรือค่า pH ต่ำกว่า 13 [67, 91] ทำให้ลดจำนวนไอออนไฮดรอกไซด์ที่แตกตัวกับโมเลกุลของน้ำน้อยลง รวมถึงแรงยึดเหนี่ยวระหว่างพันธะของซิลิคอนที่มีมากจึงทำให้เกิดแยกตัวของพันธะซิลิคอน (Si-Si) ได้น้อย ดังนั้นการจับตัวระหว่างอะตอมซิลิคอน (Si) และออกซิเจน (O) หรือการแทนที่โดยไฮโดรเจนไอออนข้างลงเป็นผลทำให้การกัดซิลิคอนน้อยลง ในการทดลองการกัดชั้นอะลูมิเนียมด้วยสารละลายที่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูง ซึ่งชั้นอะลูมิเนียมไม่สามารถรักษาอยู่ได้จึงได้มีการทดลองเติมสารเติมแต่งการกัดของกรดซิลิซิก จากผลการทดลองพบว่าการกัดชั้นอะลูมิเนียมน้อยกว่าแผ่นซิลิคอนหลายเท่า ซึ่งอัตราการกัดอะลูมิเนียมจากการเติมกรดซิลิซิกที่ความเข้มข้น 30, 32, 34 และ 36 g/l มีค่าเท่ากับ 12.12, 1.79, 0.13 และ 0.44  $\mu\text{m}/\text{h}$  ตามลำดับ โดยปัจจัยที่ทำให้เงื่อนไขของสารเติมแต่งการกัดชนิดนี้กัดชั้นอะลูมิเนียมข้างลงเกิดจากการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH เมื่อความเป็นกรด-ด่างของสารละลายต่ำ การแตกตัวของน้ำจะอยู่ในสภาวะสมดุลระหว่างความเข้มข้นของคูกรด ( $\text{H}_3\text{O}^+$ ) และคูเบส ( $\text{OH}^-$ ) ดังนั้นการละลายน้ำของสารที่เป็นกรดจึงไปทำให้ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออนเพิ่มขึ้น การกัดของอะลูมิเนียมจากฟังก์ชันของสารแอมโฟเทอริกของอะลูมิเนียมเป็นชั้นป้องกันกรด [92] ซึ่งจะสามารถช่วยป้องกันการกัดอะลูมิเนียมได้

#### 4.1.1.3 การเติมสารเติมแต่งการกัตสองชนิดลงในสารละลาย TMAH

จากผลการทดลองสารเติมแต่งการกัตของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตและกรดซิลิซิกพบว่าสารเติมแต่งการกัตทั้งสองมีลักษณะเด่นที่แตกต่างกัน เราจึงนำสารทั้งสองมาศึกษาเพิ่มเติม โดยการผสมสารเติมแต่งการกัตทั้งสองชนิดในปริมาณที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองเติมลงในสารละลาย TMAH โดยเน้นการกัตอะลูมิเนียมน้อยที่สุด ในการทดลองในส่วนนี้จึงเลือกสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 %wt ผสมด้วยกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l (5 wt.% TMAH + 34 g/l silicic acid เป็นสารละลายตั้งต้น) เติมด้วยสารเติมแต่งการกัตของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตที่ปริมาณต่างๆ (5, 6, 7 และ 8 g/l) ใช้ในการทดลองการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัตซิลิคอนและลักษณะพื้นผิวซิลิคอนหลังจากกัต การตรวจสอบหาอัตราการกัตซิลิคอนและลักษณะความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอน พบว่าลักษณะกราฟเป็นแบบเชิงเส้นมีแนวโน้มของอัตราการกัตซิลิคอนเร็วเมื่อเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตเพิ่มขึ้น จะเห็นได้ว่าการเติมปริมาณของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตที่ 5 g/l มีอัตราการกัตซิลิคอนเท่ากับ 0.61  $\mu\text{m}/\text{min}$  ซึ่งช้ากว่าปริมาณสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตที่ 8 g/l มีอัตราการกัต (1.36  $\mu\text{m}/\text{min}$ ) ประมาณ 2.2 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ซึ่งค่าที่ได้มีแนวโน้มแบบเดียวกับสารละลายที่ไม่ได้เติมกรดซิลิซิก จากการผลทดลองก่อนหน้านี้สารละลาย TMAH ที่ผสมด้วยกรดซิลิซิกจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายที่ใช้กัตนั้นเปลี่ยนแปลงไป โดยค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายจะขึ้นอยู่กับไอออนไฮดรอกไซด์ของสารละลาย เมื่อมีไอออนไฮดรอกไซด์มากขึ้นจะทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลาย TMAH ลดลงเปรียบเสมือนเป็นตัวชะลอการกัตพื้นผิวซิลิคอนจึงทำให้อัตราการกัตของแผ่นซิลิคอนลดลง อย่างไรก็ตามการใช้สารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตรวมกับการใช้กรดซิลิซิกในการทดลองส่วนนี้ทำให้อัตราการกัตซิลิคอนของเงื่อนไขนี้มีค่าเพิ่มขึ้นประมาณ 6.3 เท่าของอัตราการกัตซิลิคอนแบบไม่เติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต

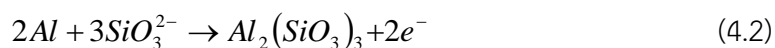
เมื่อพิจารณาลักษณะพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัตด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt.% ผสมด้วยกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l (5 wt.% TMAH + 34 g/l silicic acid) แล้วเติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตที่ปริมาณต่างๆ พบว่าสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตที่ปริมาณ 7 g/l พื้นผิวซิลิคอนมีความเรียบมากที่สุดเท่ากับ 11.1 nm ในขณะที่ปริมาณของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต 5 g/l มีความขรุขระมากที่สุดเท่ากับ 343.1 nm ลักษณะของกราฟที่ได้ไม่เป็นเชิงเส้นจึงกล่าวได้ว่าเมื่อทำการเติมปริมาณสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตที่เหมาะสมจะส่งผลให้พื้นผิวซิลิคอนราบเรียบขึ้น อย่างไรก็ตามถ้าเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตเพิ่มถึงจุดหนึ่งจะทำให้พื้นผิวหลังการกัตมีค่าความขรุขระกลับมาเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.3 จากผลการทดลองนี้จึงนำเงื่อนไขของสารเติม

แต่งการกัดทั้งสองชนิด นั่นคือสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตปริมาณ 7 g/l ผสมด้วยกรดซิลิซิก 34 g/l เติมลงในสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt.% เราเรียกเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดนี้ว่า dual-doped TMAH และนำไปตรวจสอบหาอัตราการกัดซิลิคอนและอัตราการกัดอะลูมิเนียมของสารละลาย dual-doped TMAH



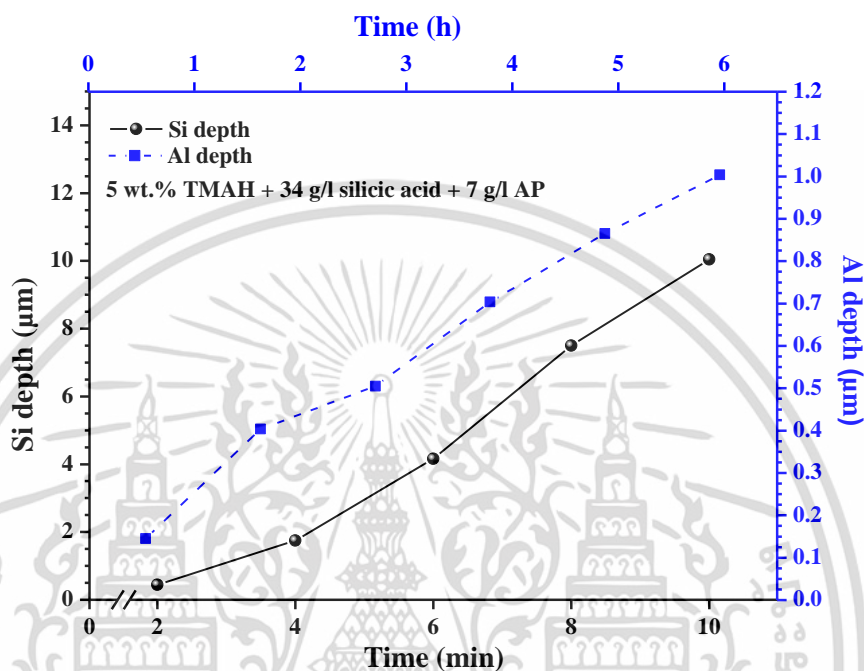
รูปที่ 4.3 อัตราการกัดซิลิคอนและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนของสารละลาย TMAH ผสมด้วยกรดซิลิซิกเติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต (AP) ที่ปริมาตรต่างๆ

สำหรับการวิเคราะห์ความลึกของชิ้นงานหลังกระบวนการกัดโดยใช้ DEP KLA-Tencor P10 surface profilometer ดังในรูปที่ 4.4 พบว่าลักษณะกราฟที่ได้มีแนวโน้มประมาณเป็นเชิงเส้นทั้งอัตราการกัดซิลิคอนและอัตราการกัดอะลูมิเนียมมากขึ้นตามเวลาที่ใช้กัด อัตราการกัดซิลิคอนและอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่ได้มีค่าเท่ากับ 1.03 μm/min และ 0.18 μm/h ตามลำดับ โดยสาเหตุที่สารละลาย dual-doped TMAH มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมน้อย เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดซิลิซิกและอะลูมิเนียมเพราะการเติมซิลิเกต (SiO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> เข้าไปในระบบปฏิกิริยาสารเคมีจึงซึ่งจะเกิดผลิตภัณฑ์ขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมี นั่นคือ อะลูมิเนียมซิลิเกต Al<sub>2</sub>(SiO<sub>3</sub>)<sub>3</sub> [93] ดังสมการเคมี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมานี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการกัดดังแสดงในสมการที่ 4.2 ผลิตภัณฑ์  $Al_2(SiO_3)_3$  นี้ทำหน้าที่เปรียบเสมือนชั้นหน้ากักป้องกันการกัดบนชั้นอะลูมิเนียม ส่งผลทำให้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมลดลง [94]



รูปที่ 4.4 ความลึกซิลิคอนและความลึกอะลูมิเนียมหลังการกัดด้วยสารละลาย TMAH ผสมด้วยกรดซิลิซิกเติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซิลิเฟต

#### 4.1.2 การศึกษาลักษณะพื้นรับแสงภายในโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง

โดยทั่วไปลักษณะของตัวตรวจวัดแสงในโครงสร้างแบบเชิงราบ (metal-semiconductor-metal photodetector: MSM) ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าระนาบเดียวกัน (ระนาบ (100)) ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าโลหะ 2 ขั้ว สร้างอยู่บนสารกึ่งตัวนำเกิดเป็นรอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่มีคุณสมบัติของรอยสัมผัสแบบช็อดทกีแบริเออร์โดยมีลักษณะสองรอยสัมผัสเชื่อมต่อแบบหันหลังชนกัน พื้นที่ได้รับแสงอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง โดยที่กระแสไฟฟ้าทั้งหมดจะขึ้นอยู่กับส่วนนี้ ดังนั้นเราจึงทำการปรับปรุงพื้นที่รับสัญญาณแสงให้มีปริมาณเพิ่มขึ้นโดยออกแบบทั้งหมดสามโครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างแรกเป็นการออกแบบร่องรูปตัวยูที่ภายในมีพื้นที่ราบเรียบ (เรียกโครงสร้างนี้ว่า U-shaped metal-semiconductor-metal photodetector: U-MSM) ใช้เงื่อนไขของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% ผสมด้วยสารเติมแต่งการกัดของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซิลิเฟต (7 g/l) และกรดซิลิซิก (34 g/l) (หรือ

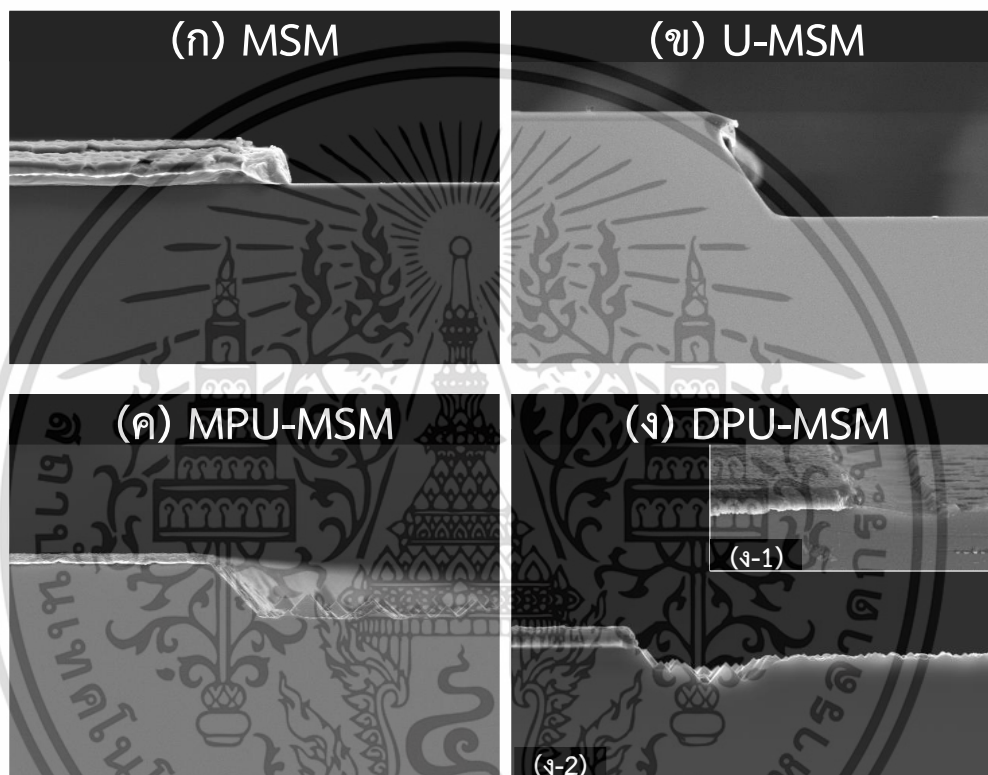
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

dual-doped TMAH) โครงสร้างที่สองเป็นการออกแบบร่องรูปตัวยูที่ภายในมีพีระมิด (เรียกโครงสร้างนี้ว่า Micro-Pyramids on U-shaped metal-semiconductor-metal photodetector: MPU-MSM) ใช้เงื่อนไขของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% (หรือ pure TMAH) และโครงสร้างสุดท้ายเป็นการออกแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู (เรียกโครงสร้างนี้ว่า Double-Pyramids on U-shaped metal-semiconductor-metal photodetector: DPU-MSM) โดยเงื่อนไขที่ใช้เป็นวิธีการกัดซ้ำสองครั้ง ในครั้งแรกทำการกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% และการกัดครั้งที่สองด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% ผสมด้วยกรดซิลิซิก (34 g/l) (หรือ pure TMAH/silicic acid-added TMAH)

#### 4.1.2.1 การตรวจสอบลักษณะพื้นผิวและโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง

ในกระบวนการกัดแบบเปียกแอนไอโซทรอปิกสารละลายที่ใช้กัดนี้จะทำปฏิกิริยาในการเลือกกัดแผ่นซิลิคอน จากการกัดเซาะร่องใต้จุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนช้ากว่าการกัดผิวในแนวตั้งหรือระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) ทำให้ลักษณะการกัดผิวซิลิคอนแต่ละระนาบไม่เท่ากันจึงเป็นเหตุผลอย่างหนึ่งที่ทำให้พื้นผิวซิลิคอนเกิดเป็นพีระมิดแบบสุ่ม (random micro-pyramids) สำหรับการศึกษาลักษณะพื้นผิวซิลิคอนภายในโครงสร้างพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงในแต่ละเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดและเทคนิคการกัดที่แตกต่างกัน จากการวัดด้วยวิเคราะห์ความลึกของชั้นงานและตรวจสอบโครงสร้างพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) จากการศึกษากระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยเงื่อนไขในหัวข้อก่อนหน้านี้พบว่าแต่ละโครงสร้างมีลักษณะเฉพาะจากเงื่อนไขการกัดทำให้ได้รูปทรงของพื้นผิวโดดเด่นแตกต่างกัน จึงนำไปสู่การเลือกใช้เงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดของสารละลาย pure TMAH และสารละลาย dual-doped TMAH มาประยุกต์ด้วยเทคนิคการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกครั้งเดียว และสารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH มาประยุกต์ด้วยเทคนิคการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับช้อนตัวเอง จากการสังเกตโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงหลังการกัดด้วยสารละลายแต่ละเงื่อนไขจากภาพภาคตัดขวางดังแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่ามีลักษณะเป็นไปตามการออกแบบที่กำหนดไว้รูปที่ 4.5(ข) เป็นโครงสร้างแบบ U-MSM มีความลึกร่องรูปตัวยูประมาณ 4.1  $\mu\text{m}$  ภายในร่องรูปตัวยูพบว่าซิลิคอนระนาบ (100) มีพื้นผิวราบเรียบมีลักษณะแบบเดียวกับโครงสร้าง MSM (รูปที่ 4.5(ก)) เมื่อพิจารณาที่โครงสร้างแบบ MPU-MSM และโครงสร้างแบบ DPU-MSM จะเห็นได้ว่ามีพีระมิดเกิดขึ้นบนร่องรูปตัวยูของซิลิคอนระนาบ (100) โดยป้อนแรงดันแก๊สตัวตรวจวัดแสงทำให้ค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะขยายออกไปในส่วนของพื้นที่รับแสงซึ่งพื้นที่รับแสงที่มีมากขึ้นจะช่วยเพิ่มโอกาสการเกิดพาหะอิสระ

เนื่องจากจำนวนพริมาตรจะเป็นตัวการสะท้อนแสงให้กับตัวอุปกรณ์ในรูปที่ 4.5(ค) และรูปที่ 4.5(ง) จะเห็นได้ว่าโครงสร้างแบบ DPU-MSM มีพริมาตรสองขนาดบนระนาบ (100) ภายในร่องรูปตัวยู โดยพริมาตรขนาดไมครอนเกิดจากการกัดซ้ำครั้งที่สองโดยกัดตรงส่วนพื้นที่แนวระนาบ (111) ที่เกิดขึ้นจากการกัดในครั้งแรกทำให้เกิดเป็นร่องพริมาตรขึ้น ดังรูปที่ 4.5(ง-1) นอกจากนี้ผิวซิลิคอนระนาบ (100) ยังเกิดพริมาตรขนาดนาโนบนส่วนของพื้นที่รับแสงและยังคงอยู่ในระยะของบริเวณปลอดพาหะไม่เกิน  $5.5 \mu\text{m}$

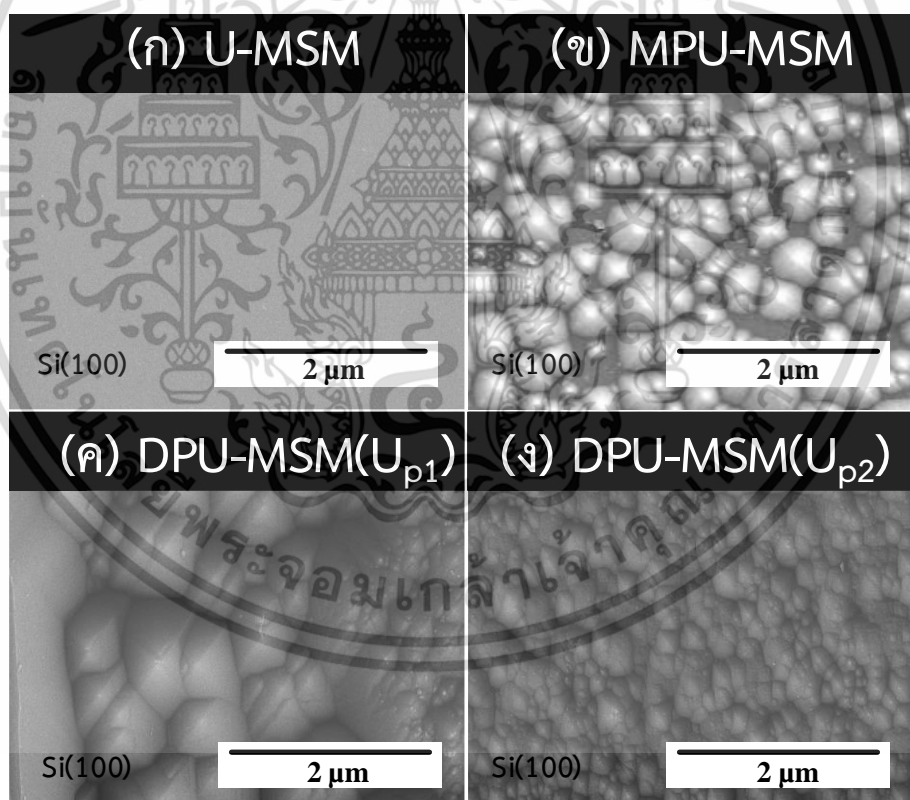


รูปที่ 4.5 ภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสง (ก) โครงสร้างแบบเชิงราบ (ข) โครงสร้างแบบราบเรียบภายในร่องรูปตัวยู (ค) โครงสร้างแบบพริมาตรภายในร่องรูปตัวยู และ (ง) โครงสร้างแบบพริมาตรสองระดับภายในร่องรูปตัวยู

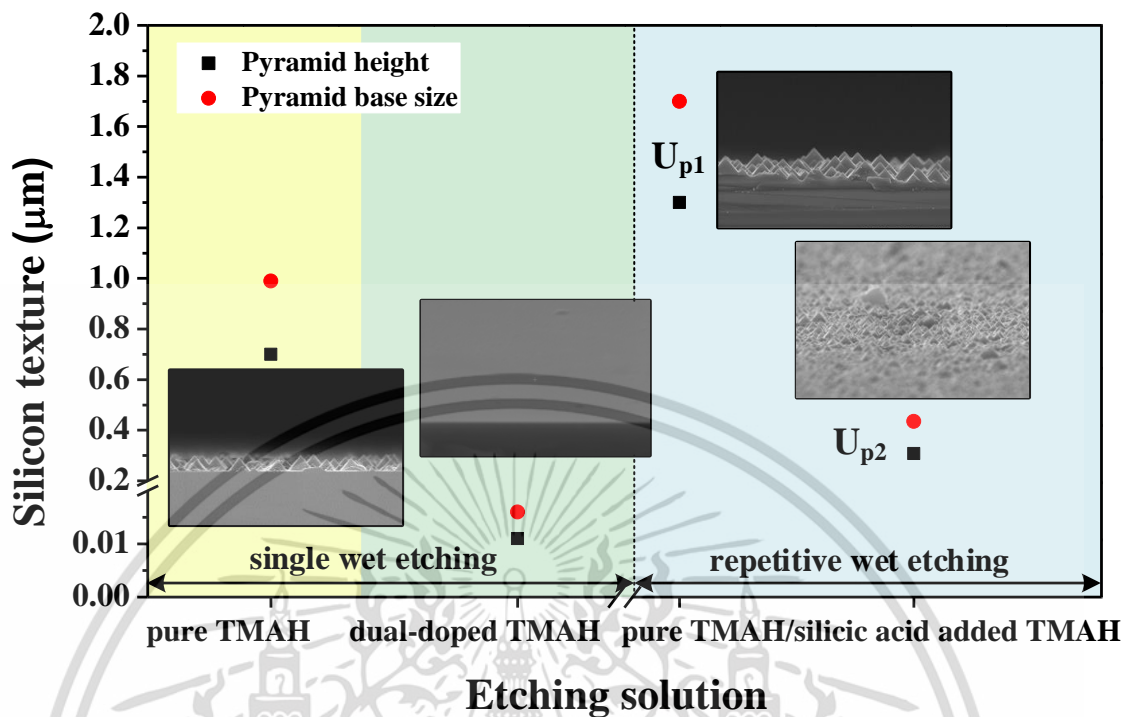
#### 4.1.2.2 พื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

จากการตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของพื้นผิวซิลิคอนและโครงสร้างในบริเวณร่องรูปตัวยูที่เกิดขึ้นด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดด้วยสารละลาย dual-doped TMAH ในรูปที่ 4.6(ก) มีลักษณะราบเรียบซึ่งพื้นผิวมีความใกล้เคียงกับผิวในโครงสร้างแบบเชิงราบ ขณะที่กัดด้วยสารละลาย pure TMAH เกิดพริมาตรกระจายอยู่ทั่วพื้นผิวซิลิคอน

ขนาดของฐานพีระมิดโดยเฉลี่ยประมาณ  $1 \mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 4.6(ข) เมื่อพิจารณาพื้นผิวหลังกระบวนการกัดแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ่อนตัวเอง พบว่าภายในโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงมีส่วนของพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นในระนาบ (100) อยู่สองระดับ ในแต่ละระดับจะมีพีระมิดขนาดไมครอนและขนาดนาโนเกิดขึ้น จากการกัดครั้งแรกด้วยสารละลาย pure TMAH จะเกิดแนวระนาบ (111) ที่ทำมุมการกัดย่อยกว่าระนาบ (100) เมื่อกัดชิ้นงานซ้ำในครั้งที่สองด้วยสารละลาย silicic acid-added TMAH ส่วนของแนวระนาบ (111) ที่ได้จากการกัดครั้งแรกจะถูกสารละลายนี้กัดโครงสร้างต่อจนเกิดเป็นพีระมิดขนาดไมครอน ( $\sim 1.7 \mu\text{m}$  เรียกว่า  $U_{p1}$ ) ตรงส่วนของพื้นที่รับแสงระดับแรก ดังในรูปที่ 4.6(ค) โดยสังเกตได้ว่าจากการกัดเปียกซ้ำสองครั้งมีพีระมิดเกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนหนาแน่นกว่าพีระมิดที่กัดด้วยสารละลาย pure TMAH เพียงอย่างเดียว เนื่องจากการซ้อนทับกันของฐานพีระมิดที่เกิดบนซิลิคอนระนาบ (100) จึงทำให้พีระมิดมีขนาดใหญ่ ขณะเดียวกันในส่วนของพื้นที่รับแสงระดับที่สองจะเกิดพีระมิดขนาดนาโน ( $\sim 400 \text{ nm}$  เรียกว่า  $U_{p2}$ ) เกิดขึ้นด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.6(ง)



รูปที่ 4.6 พื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัด (ก) สารละลาย dual-doped TMAH (ข) สารละลาย pure TMAH (ค) สารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH ( $U_{p1}$ ) และ (ง) สารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH ( $U_{p2}$ )



รูปที่ 4.7 ลักษณะความสูงและฐานพีระมิดบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดด้วยเงื่อนไขสารละลายที่ใช้กัดต่างๆ

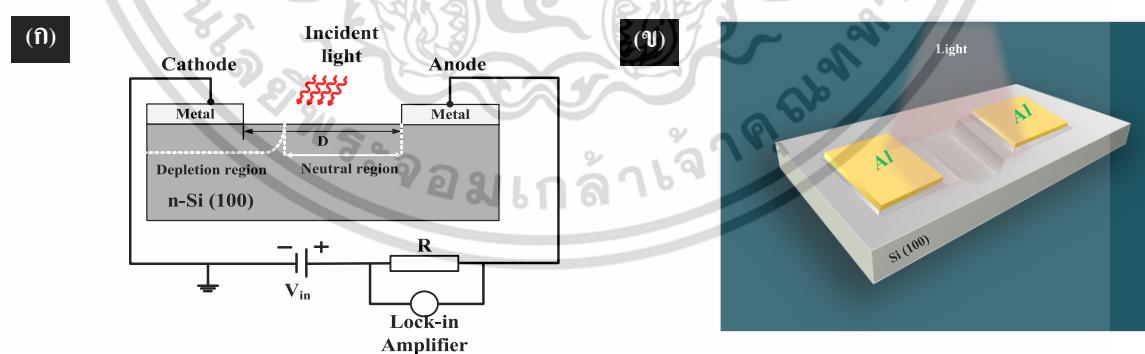
เมื่อนำเงื่อนไขการกัดของโครงสร้างทั้งสามแบบมาทำการเปรียบเทียบขนาดฐานและความสูงของพีระมิดที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนหลังการกัดซิลิคอนในรูปที่ 4.7 พบว่าเงื่อนไขการกัดหนึ่งครั้งด้วยสารละลาย pure TMAH มีจำนวนพีระมิดการกระจายตัวพีระมิดน้อยและขนาดฐานพีระมิดมีขนาดเล็กกว่าในส่วนของร่องพีระมิดแรกขนาดระดับไมครอนของเงื่อนไขสารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH เนื่องจากพื้นผิวบริเวณระนาบ (111) ถูกการกัดซ้ำสองครั้งด้วยสารละลาย silicic acid-added TMAH โดยสารละลายนี้จะกัดจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนซึ่งจะเกิดการทำปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลายที่ทำให้ได้อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน โดยอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนนี้จะไปจับตัวกับอะตอมของซิลิคอนจะทำให้เกิดสารใหม่ที่เรียกว่า กรดออร์โธซิลิก โดยกรดออร์โธซิลิกนี้จะแตกตัวเพื่อรวมกับน้ำทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ฟองก๊าซไฮโดรเจนเกิดขึ้นบนผิวซิลิคอนซึ่งเปรียบเสมือนหน้ากากป้องกันในการกัดทำให้เกิดพีระมิดขึ้นมาได้ด้วยเหตุผลนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าสารใหม่ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีการกัดนั้นรวมกับกรดซิลิซิกที่เติมเพิ่มไปนั้นซึ่งเป็นสารเคมีตัวเดียวกันจึงทำให้เกิดจำนวนของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น ส่งผลกระทบต่อขนาดใหญ่และการกระจายตัวของพีระมิดมากขึ้นเช่นกัน พิจารณาการใช้สารละลาย TMAH เติมด้วยสารเติมแต่งการกัดที่ใช้ในสารละลาย dual-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

doped TMAH มีความขรุขระน้อยลงเกิดจากการเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์โซลฟัดในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้พื้นผิวซิลิคอนมีความเรียบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการกำจัดความไม่สม่ำเสมอของพื้นผิวซิลิคอนด้วยตัวออกซิไดส์ (Oxidizing Agents) ของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์โซลฟัดทำให้ช่วยลดความขรุขระของผิวหน้าซิลิคอนลง [34, 95] อย่างไรก็ตามการกัดมีซิลิคอนที่ทำให้พื้นผิวมีความขรุขระอันเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยาในการกัดที่มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ ได้แก่ ปัจจัยหนึ่งที่เกิดจากทิศทางการกัดไม่เท่ากัน ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย และการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มซึ่งเกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นบริเวณผิวหน้าซิลิคอน เป็นต้น หลังจากการสร้างตัวตรวจวัดแสงเสร็จสมบูรณ์แล้วจะนำอุปกรณ์ไปทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

#### 4.2 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

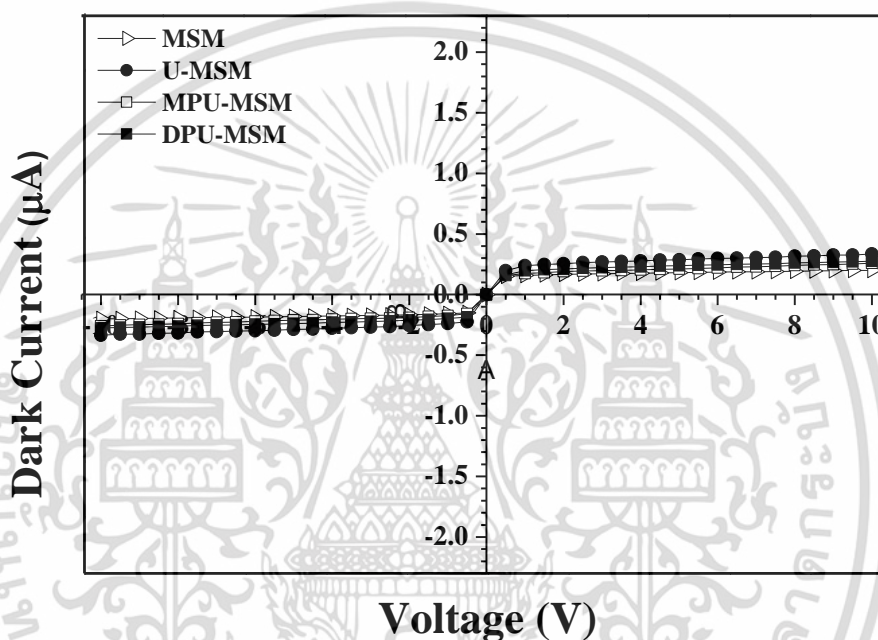
จากการศึกษาลักษณะทางกายภาพทำให้ทราบถึงเงื่อนไขที่ใช้สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงของแต่ละโครงสร้าง จากนั้นนำอุปกรณ์มาทำการทดสอบวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) แบบราบเรียบภายในร่องรูปตัวยู (U-MSM) แบบพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู (MPU-MSM) และแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู (DPU-MSM) ชนิด Al/n-Si/Al ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบกว้างและมีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่ (A) เท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  ในบทนี้จะกล่าวถึงลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันแบบสัญญาณแสงกระแสตรงและสัญญาณกระแสสลับ ซึ่งผลจากการวิเคราะห์นี้ทำให้เราเข้าใจแบบจำลองอย่างง่ายเพื่อใช้อธิบายกลไกการทำงานของพาหะหรือปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของตัวอุปกรณ์



รูปที่ 4.8 (ก) แผนภาพชุดเครื่องมือทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง (ข) ภาพจำลองตัวอย่างตัวตรวจวัดแสงที่ได้รับแสงตกกระทบ

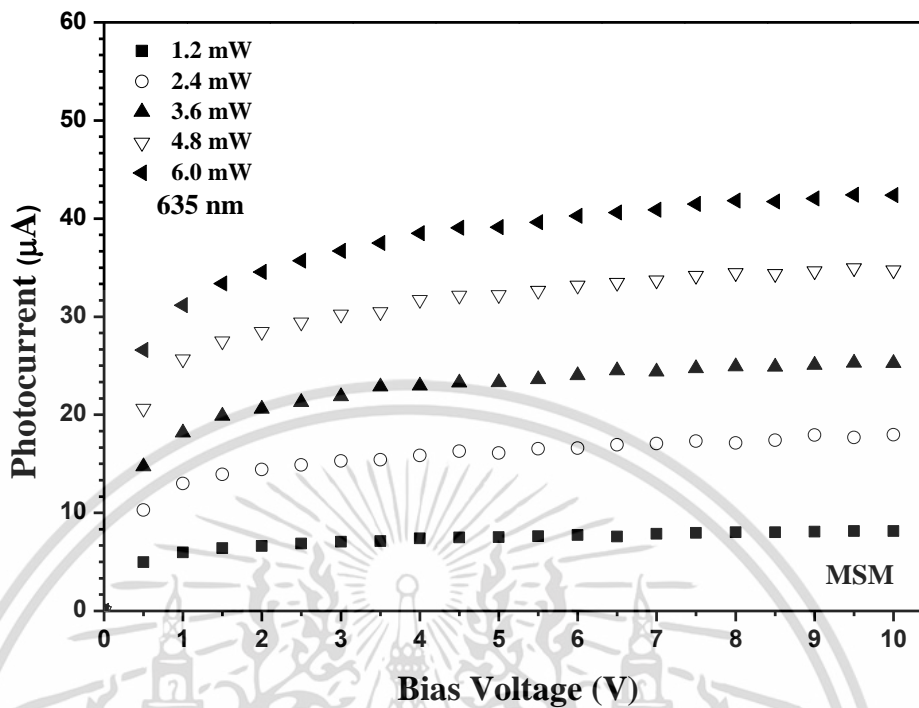
#### 4.2.1 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในแบบสัญญาณแสง กระแสตรง

การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดจากตัวตรวจวัดแสง และในขณะมีแสงตกกระทบ เพื่อให้ทดสอบประสิทธิภาพในการตรวจวัดแสง เครื่องมือที่ใช้วัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกล่องป้องกันแสงจากภายนอก (dark box) โดยจะป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V

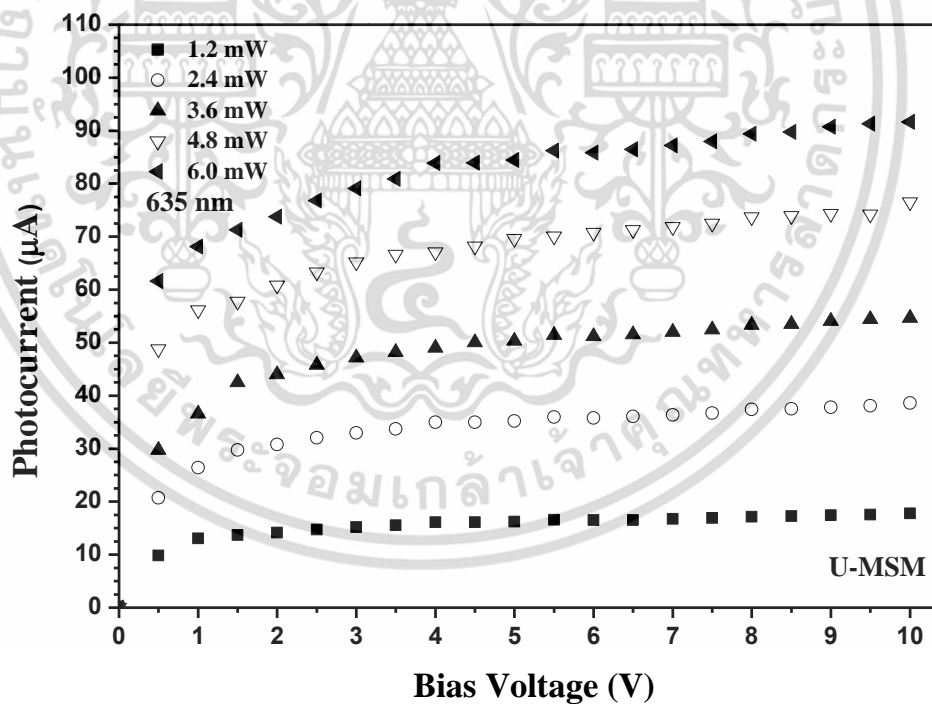


รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้าง เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากรูปที่ 4.9 พบว่าเมื่อทำการป้อนแรงดันไบอัสที่ 10 V กระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM เท่ากับ 0.20  $\mu\text{A}$  ในขณะที่ตรวจวัดแสงแบบ U-MSM ตรวจวัดแสงแบบ MPU-MSM และตรวจวัดแสงแบบ DPU-MSM มีกระแสรั่วไหลมากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM โดยประมาณ 1.5 เท่า เมื่อพิจารณากระแสรั่วไหลของตรวจวัดแสงแบบใหม่ทั้งสามโครงสร้างที่สูงกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ส่วนหนึ่งคาดว่าเกิดจากความไม่สมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าในบริเวณรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับฐานรองซิลิคอนในระหว่างการกัดเปียกของสารละลายที่กัดเซาะส่วนของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม แต่อย่างไรก็ตามกระแสรั่วที่ต่างกันไม่มากอาจมีนัยสำคัญน้อยเมื่อนำเปรียบเทียบกับค่ากระแสแสงต่อกระแสรั่วที่ได้ตั้งรายละเอียดตั้งข้อหัวถัดไป



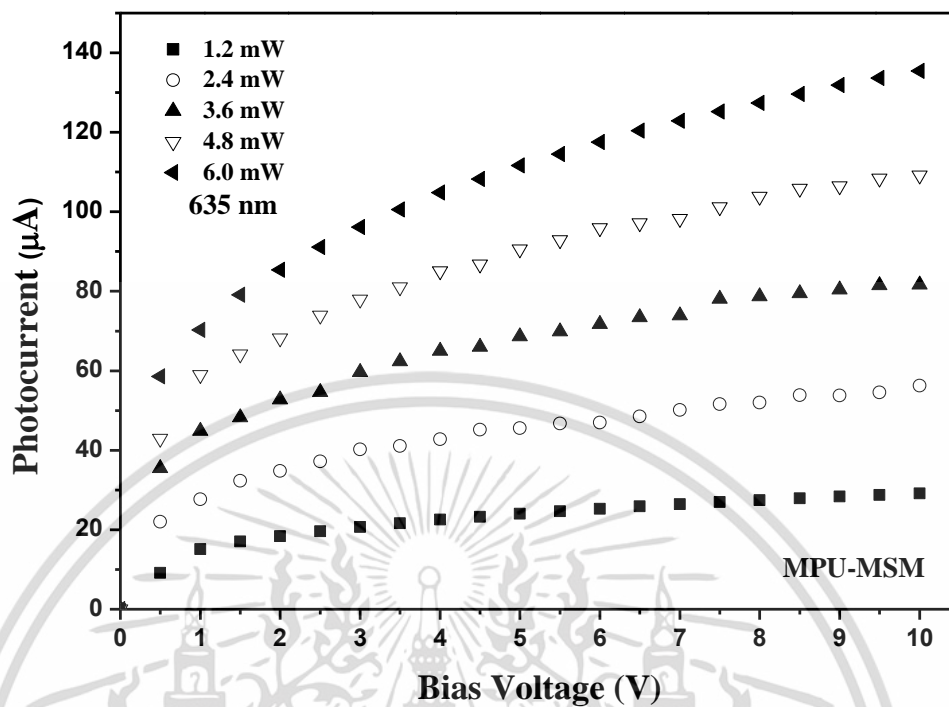
(ก)



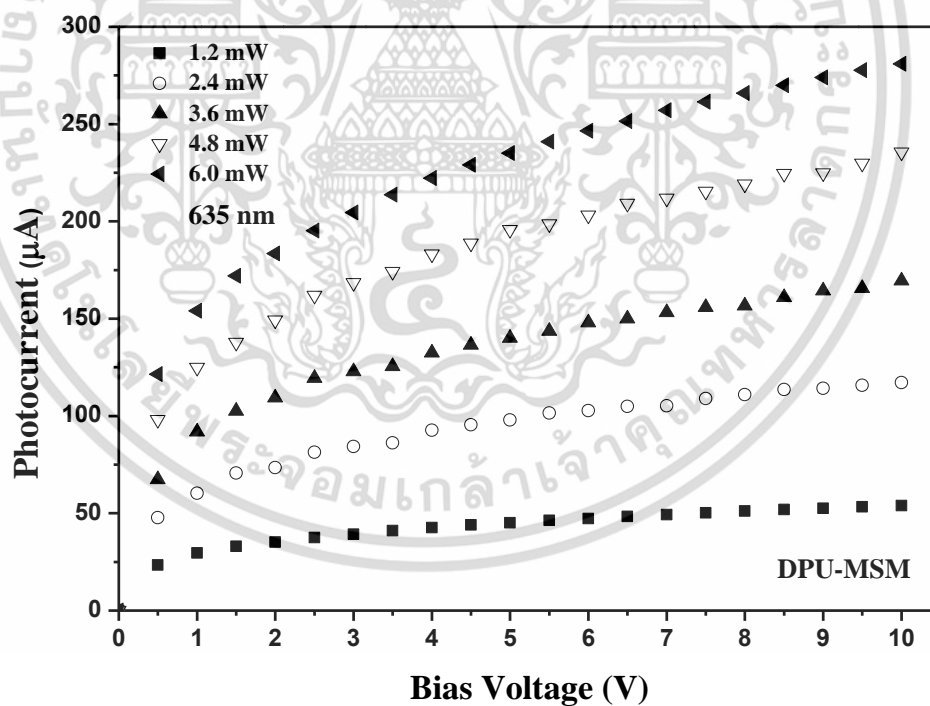
(ข)

รูปที่ 4.10 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง เมื่อได้รับแสงตกกระทบ (ก) โครงสร้างแบบ MSM (ข) โครงสร้างแบบ U-MSM (ค) โครงสร้างแบบ MPU-MSM และ (ง) โครงสร้างแบบ DPU-MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ค)

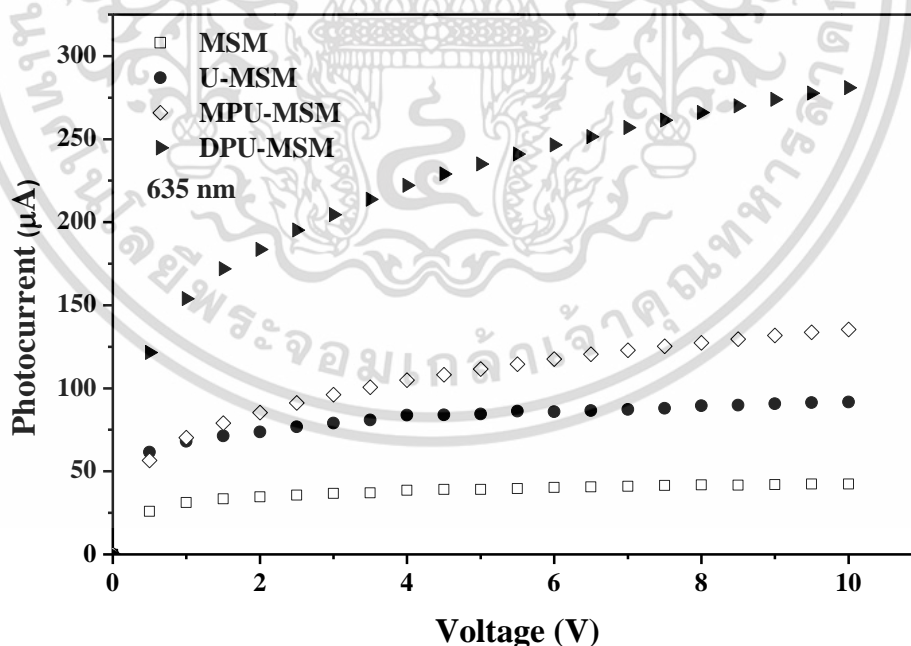


(ง)

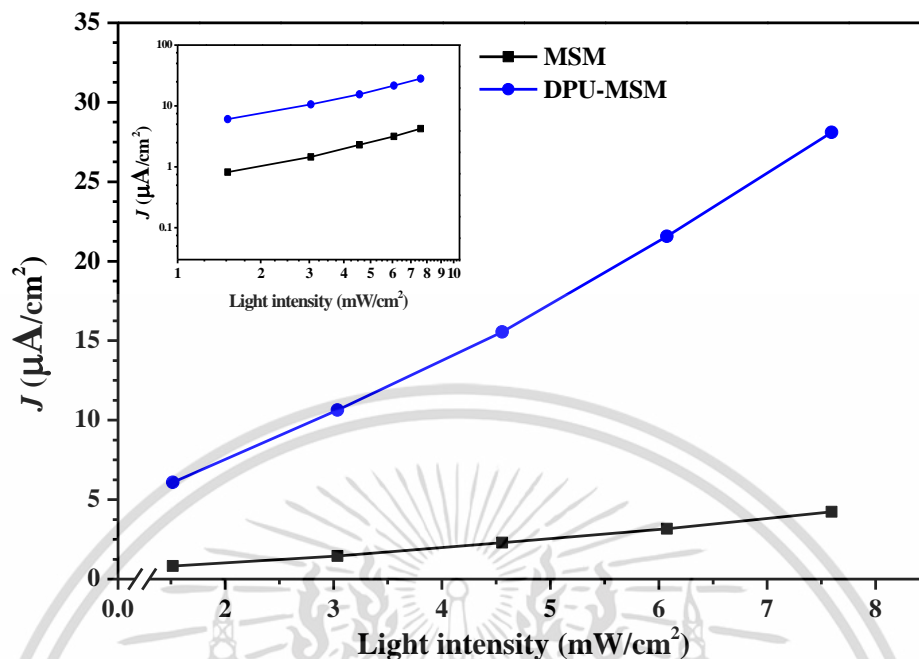
รูปที่ 4.10 (ต่อ) ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง เมื่อได้รับแสงตกกระทบ (ก) โครงสร้างแบบ MSM (ข) โครงสร้างแบบ U-MSM (ค) โครงสร้างแบบ MPU-MSM และ (ง) โครงสร้างแบบ DPU-MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การทดสอบวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้ากระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงได้รับการทดสอบภายใต้ความเข้มแสงที่เปลี่ยนแปลงไปด้วยกระจก ND ฟิลเตอร์ (Neutral Density filter : ND filter) ซึ่งวางไว้ระหว่างแหล่งกำเนิดแสงกับกล่องป้องกันแสง ใช้แหล่งกำเนิดแสงด้วยเลเซอร์ไดโอดป้อนให้แก่ตัวอุปกรณ์ที่มีความยาวคลื่น 635 nm กำลังงาน 1.2, 2.4, 3.6, 4.8 และ 6.0 mW เมื่อมีแสงตกกระทบพบว่ากระแสแสงเพิ่มขึ้นตามการป้อนแรงดันที่สูงขึ้นในขณะที่ความเข้มแสงคงที่ รูปที่ 4.10 ตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้างมีลักษณะแบบเดียวกันนั่นคือ ภายใต้การฉายแสงด้วยความเข้มแสงที่แตกต่างกัน 5 ระดับ ค่ากระแสไฟฟ้าที่ได้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนเท่าของกำลังงานแสงที่ตกกระทบ เมื่อนำตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้างมาทำการเปรียบเทียบลักษณะกระแสแสงที่กำลังงาน 6.0 mW ดังแสดงในรูปที่ 4.11 ผลการทดลองพบว่าแรงดันที่ 10 โวลต์ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM แบบ U-MSM แบบ MPU-MSM และแบบ DPU-MSM ค่ากระแสแสงเท่ากับ 42  $\mu\text{A}$ , 92  $\mu\text{A}$ , 136  $\mu\text{A}$  และ 281  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ โดยที่ค่ากระแสแสงต่อกระแสมีดของโครงสร้างแบบ DPU-MSM มีค่ามากกว่าโครงสร้างแบบอื่นประมาณ 2-6 เท่า กระแสแสงเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไปจากนั้นกระแสแสงอิ่มตัวเนื่องจากความเร็วอิ่มตัวของอิเล็กตรอน สมบัติเฉพาะของรอยสัมผัสขั้วต่อที่ดีระหว่างอะลูมิเนียมและซิลิคอน เมื่อโฟตอนที่ตกกระทบบนพื้นที่รับแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ภายในบริเวณหลอดพาหะ สนามไฟฟ้าทำให้พาหะเคลื่อนที่ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าไหลออกจากวงจรภายนอก (external circuit) สำหรับข้อมูลที่ได้นี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

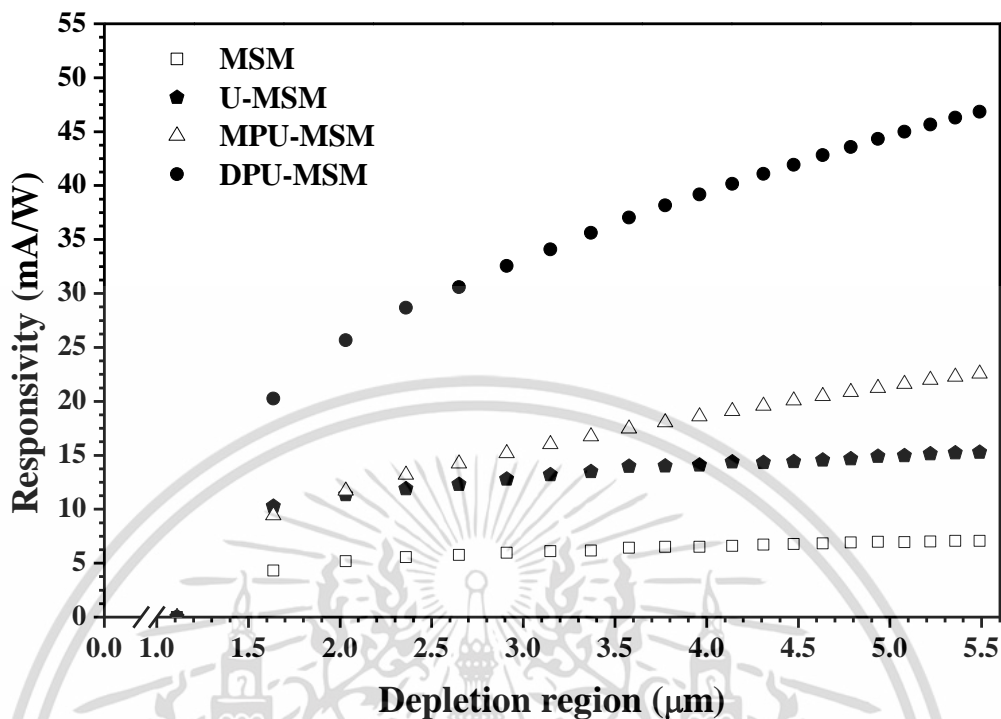


รูปที่ 4.11 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่โครงสร้าง เมื่อได้รับแสงตกกระทบ ที่กำลังงาน 6.0 mW



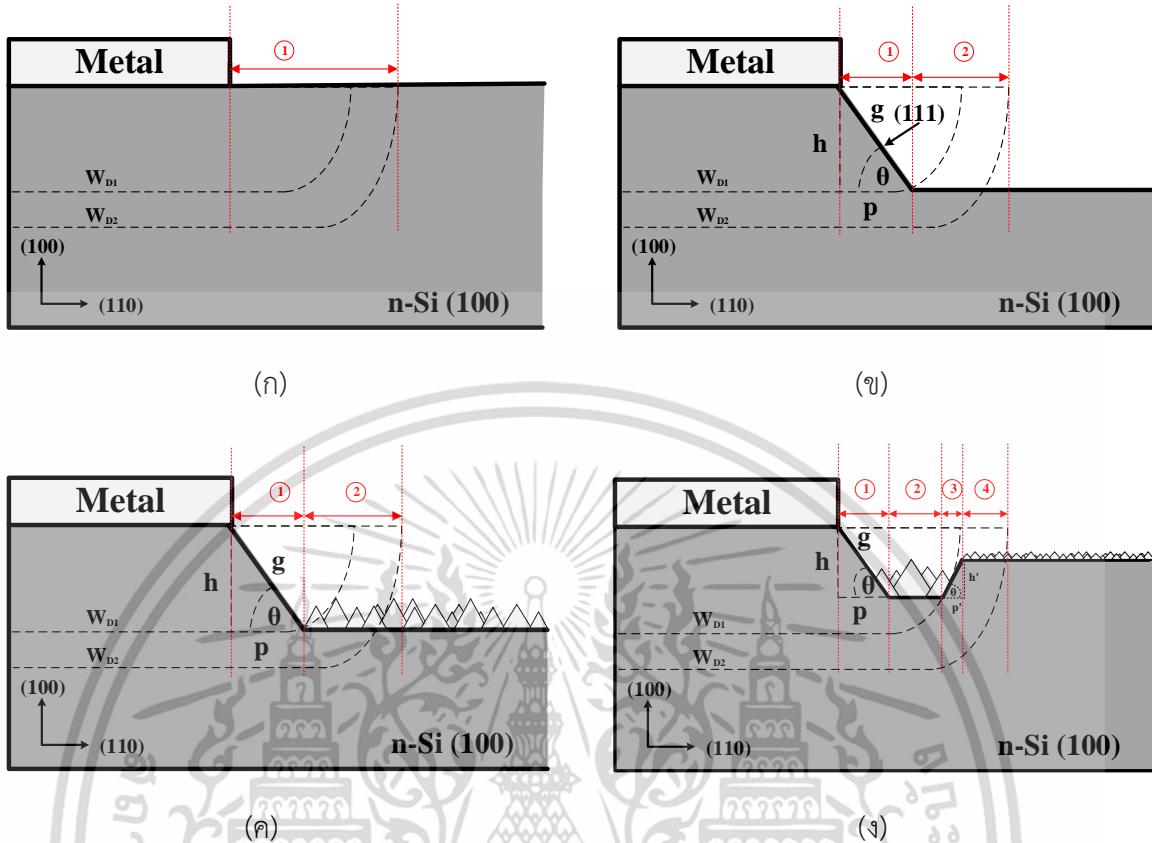
รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติความหนาแน่นกระแส – ความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM และโครงสร้างแบบ DPU-MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัส 10 โวลต์

จากผลการทดลองค่าความหนาแน่นกระแส (current density : J) ที่เปลี่ยนแปลงตามความเข้มแสง (light intensity) รูปที่ 4.12 พบว่าที่แรงดันไบอัส 10 V ความหนาแน่นกระแสแสงมีค่าสูงขึ้นเมื่อทำการเพิ่มความเข้มกำลังของแสงมากขึ้น ส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอนโฮลที่มากขึ้นจนทำให้เกิดกระแสแสงที่สูงขึ้น จะเห็นได้ว่าเลเซอร์ไดโอดที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ความหนาแน่นกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และตัวตรวจวัดแสงแบบ DPU-MSM มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยลักษณะเป็นเชิงเส้นมีค่าความหนาแน่นกระแสแสงสูงสุดของโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่ผ่านกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเองของเงื่อนไขสารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH เท่ากับ  $28.10 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  ซึ่งมากกว่าค่าความหนาแน่นกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM เท่ากับ  $4.24 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  อยู่ที่ประมาณ 6.6 เท่า ปัจจัยที่มีผลสำคัญต่อการเพิ่มขึ้นของค่าความหนาแน่นของกระแส คือ พีระมิดทั้งสองระดับที่มีความขรุขระของพื้นผิวในลักษณะขนาดไมครอนและนาโนภายในร่องรูปตัวยูของโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นผลทำให้พื้นที่รับสัญญาณแสงมีมากกว่าแบบเชิงราบ เมื่อมีแสงตกกระทบภายในบริเวณพื้นที่รับแสงทำให้เพิ่มโอกาสรับแสงได้มากขึ้นจากพีระมิดในร่องแสงที่ตกกระทบจะทำมุมหักเหของแสงส่วนหนึ่งเข้าไปในส่วนของบริเวณปลอดภัยจากการสะท้อนภายในร่องพีระมิดทำให้ส่งผลโดยตรงต่อค่าความหนาแน่นกระแสของโครงสร้างแบบ DPU-MSM



รูปที่ 4.13 ลักษณะสมบัติสภาพการตอบสนอง – ความกว้างบริเวณปลอดพาหะของตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่โครงสร้าง เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อนำตัวตรวจวัดแสงมาทดสอบสภาพการตอบสนองสัญญาณทางแสงที่กำลังงาน 6 mW ค่ากระแสแสงสอดคล้องกับสภาพการตอบสนองของตัวตรวจวัดแสงตามความสัมพันธ์  $R = (I_{photo} - I_{dark}) / P_{in}$  เมื่อ  $R$  คือ สภาพการตอบสนอง (Responsivity) โดยที่กระแสขณะรับแสงที่วัดได้ลบด้วยกระแสมืด ( $I_{photo} - I_{dark}$ ) คือ กระแสแสง (Photodetector) ส่วนค่า  $P_{in}$  คือ ความเข้มแสงที่ตกกระทบตัวตรวจวัดแสง [96-98] รูปที่ 4.13 แสดงว่าสภาพการตอบสนองเพิ่มขึ้นตามความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่ขยายมากขึ้นจากการป้อนแรงดันไฟฟ้าส่วนของบริเวณปลอดพาหะที่มีสภาพการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงเริ่มตั้งแต่ 1.1  $\mu\text{m}$  ขึ้นไป ผลการทดลองที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร กำลังงาน 6.0 mW สภาพการตอบสนองบริเวณปลอดพาหะประมาณ 5.5  $\mu\text{m}$  ของตัวตรวจวัดแสงแบบ U-MSM มีสภาพการตอบสนองทางแสงเท่ากับ 15.28 mA/W มีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM โดยประมาณ 2.1 เท่า เมื่อพิจารณาตารางที่ 4.1 พบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบ MPU-MSM มีค่าสภาพการตอบสนองทางแสงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ U-MSM โดยประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ ส่วนโครงสร้างแบบ DPU-MSM มีสภาพการตอบสนองที่สูงถึง 46.83 mA/W โดยค่าสภาพการตอบสนองมากกว่าโครงสร้างแบบ MSM ประมาณ 6.6 เท่า



รูปที่ 4.14 ภาพจำลองส่วนพื้นที่รับสัญญาณแสงของโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง (ก) โครงสร้างแบบ MSM (ข) โครงสร้างแบบ U-MSM (ค) โครงสร้างแบบ MPU-MSM และ (ง) โครงสร้างแบบ DPU-MSM

เมื่อนำสภาพการตอบสนองแสงที่เพิ่มขึ้นของแต่ละโครงสร้างมาพิจารณาในส่วนของพื้นที่รับแสงภายในความลึกของร่องที่ถูกกัดโดยการเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบเชิงราบ ในรูปที่ 4.14 เป็นโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่ได้มีการออกแบบทั้งหมดสามโครงสร้างโดยมีการวิเคราะห์พื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้นและบริเวณที่ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าดังนี้ โครงสร้างแรกเป็นตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM เมื่อป้อนแรงดันที่ 10 โวลต์ของอุปกรณ์ที่มีสภาพความต้านทานแผ่น 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร ส่งผลในบริเวณหลอดพาหะขยายเข้าไปประมาณ  $4 \mu\text{m}$  ( $W_{D1}$ ) ถึง  $5.5 \mu\text{m}$  ( $W_{D2}$ ) กระแสแสงที่ได้เกิดจากบริเวณเชิงราบตามแนวระนาบ (100) ระหว่างขั้วไฟฟ้าเพียงส่วนเดียวเท่านั้น ดังแสดงในภาพ 4.14(ก) โครงสร้างที่สองคือตัวตรวจแสงโครงสร้างแบบ U-MSM ดังรูปที่ 4.14(ข) โครงสร้างนี้มีการปรับปรุงส่วนของพื้นที่รับแสงด้านลาดเอียงในระนาบ (111) ซึ่งกระแสไฟฟ้าที่ได้จากโครงสร้างนี้มีสองส่วน คือ ส่วนแรกได้จากการคำนวณพื้นที่รับแสงข้างต้นทำให้ได้พื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้น 1.73 เท่า ซึ่งโครงสร้างที่ได้ทำการออกแบบทั้งหมดจะได้ค่าพื้นที่รับแสงเท่ากันทุกโครงสร้างเนื่องจากสารละลายที่ใช้กัดเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกที่มุม  $54.74$  องศา [99-101] และส่วนที่สองได้จากร่องแนวระนาบ (100) ในระยะที่ไม่เกิน  $5.5 \mu\text{m}$  โครงสร้าง

ที่สามคือตัวตรวจวัดแสงแบบ MPU-MSM เป็นโครงสร้างที่มีการสร้างพีระมิดภายในร่องรูปตัวยูที่ระนาบ (100) โดยกระแสไฟฟ้าที่ได้มีสองส่วนแบบเดียวกับโครงสร้างแบบ U-MSM แต่มีส่วนที่รับแสงมากกว่าจากพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ที่มีความขรุขระของพีระมิด ดังแสดงในรูปที่ 4.14(ค) และรูปที่ 4.14(ง) เป็นออกแบบโครงสร้างที่ได้มีแนวคิดการพัฒนาจากสองโครงสร้างของแบบ U-MSM และแบบ MPU-MSM เกิดเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM กระแสไฟฟ้าจากโครงสร้างนี้แบ่งออกเป็นสี่ส่วน ในส่วนที่หนึ่งและสองจะเกิดแบบเดียวกับโครงสร้างแบบ MPU-MSM และในส่วนที่สามพื้นที่รับแสงจากแนวระนาบ (111) ของร่องตัวยูอีกฝั่ง ดังนั้นโครงสร้างนี้จะได้พื้นที่รับแสงของแนวระนาบเอียงทั้งสองข้างเพิ่มขึ้น 3.46 เท่าของแบบเชิงราบ และส่วนสุดท้ายได้จากพีระมิดขนาดเล็กบนระนาบ (100) ซึ่งจะเห็นได้ว่าโครงสร้างนี้มีพีระมิดสองขนาดเกิดขึ้นภายในระยะของบริเวณปลอดพาหะ ผลลัพธ์จากการทดสอบเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างใหม่แบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยูนี้ใช้เป็นอุปกรณ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ที่สามารถตอบสนองต่อความเข้มแสงต่ำได้ดี

ตารางที่ 4.1 การเปรียบเทียบการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในแบบสัญญาณแสงกระแสตรง

ชนิดตัวตรวจวัดแสง	กระแสมีด ( $\mu\text{A}$ )	กระแสแสง ( $\mu\text{A}$ )	อัตราส่วนกระแส แสงต่อกระแสมีด	สภาพการตอบสนอง (mA/W)
โครงสร้างแบบ MSM (ผิวเรียบ)	0.2	42	210	7.1
โครงสร้างแบบ U-MSM (ผิวเรียบ)	0.33	92	279	15.3
โครงสร้างแบบ MPU- MSM (ผิวพีระมิด)	0.25	136	544	22.6
โครงสร้างแบบ DPU- MSM (ผิวพีระมิด)	0.27	281	1040	46.8

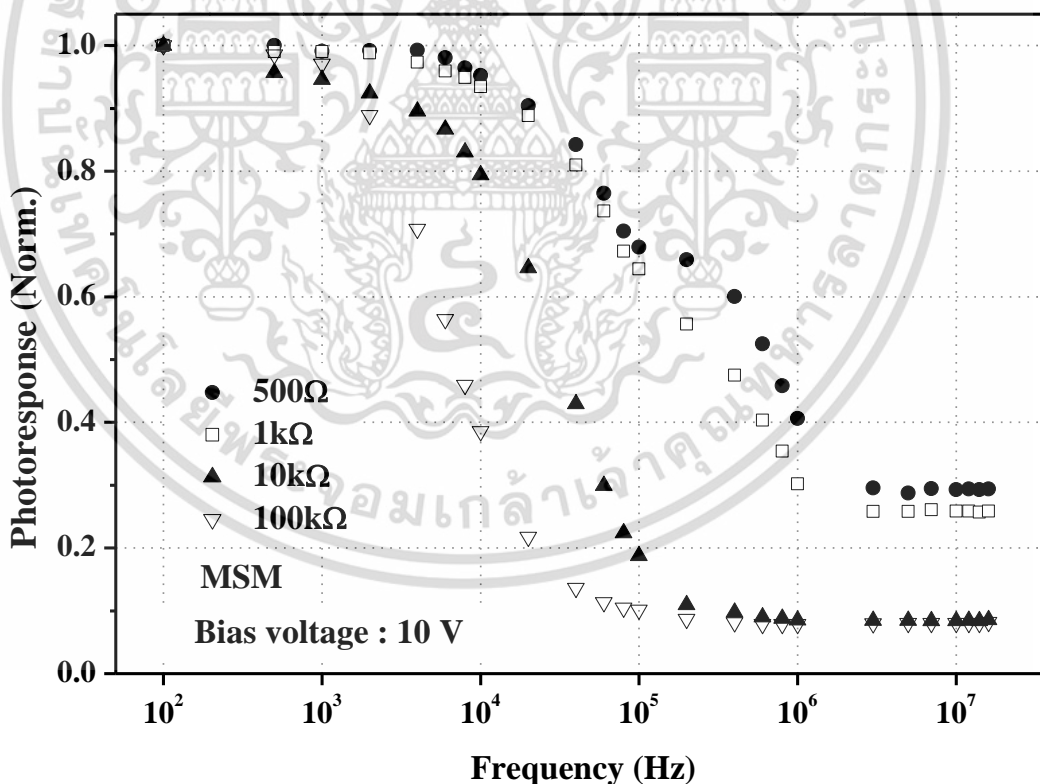
#### 4.2.2 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับ

การทดลองนี้เพื่อศึกษาเทคนิคการวัดลักษณะสัญญาณแบบสลับ (AC) ผลการทดลองทำให้ทราบถึงลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดันที่เปลี่ยนแปลงไปกับความถี่ของคลื่นรูปไซน์ โดยการมอดูเลตสัญญาณรูปไซน์ (sinusoidal wave) เข้ากับแสงเลเซอร์จากนั้นนำไปทดสอบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง

แบบ MSM เปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่สร้างขึ้นจากการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเอง

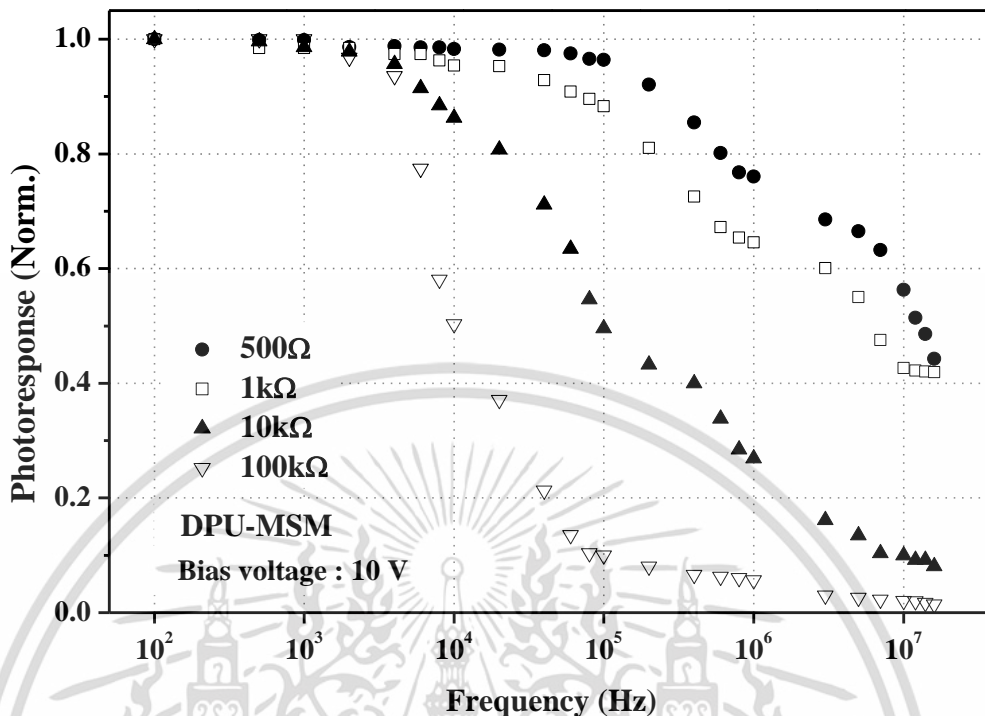
#### 4.2.2.1 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับโหลดความต้านทาน

นำอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงของโครงสร้างแบบ MSM และโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่สร้างเสร็จแล้วและผ่านการตรวจสอบคุณสมบัติกระแส-แรงดันแบบกระแสตรงมาทดสอบการตอบสนองทางแสงในแบบสัญญาณแสงกระแสสลับเพื่อยืนยันถึงผลรวมของกระแสแสงที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ที่เกิดจากกระแสแสงไดโอดและกระแสแสงคอนดักเตอร์ ในการศึกษาการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโดยใช้เลเซอร์ที่กำลังงาน 2.68 mW มีความยาวคลื่น 670 nm ถูกมอดูเลตด้วยสัญญาณคลื่นรูปไซน์จากเครื่องกำเนิดความถี่ (function generator) มีค่าแรงดันประมาณ 400 mV<sub>p-p</sub> เข้ากับแสงเลเซอร์โดยมีการเปลี่ยนแปลงช่วงความถี่ของคลื่นรูปไซน์ 100 Hz – 16 MHz และนำโหลดความต้านทานมาต่อเชื่อมกับอุปกรณ์ซึ่งให้โหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) มีค่าตั้งแต่ 500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$  ที่แรงดันไบอัส ( $V_A$ ) เท่ากับ 10 V



รูปที่ 4.15 การตอบสนองสัญญาณแสงที่ถูกมอดูเลตไรซ์กับความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่โหลดต้านทานเปลี่ยนแปลงเป็น 500  $\Omega$ , 1 k $\Omega$ , 10 k $\Omega$  และ 100 k $\Omega$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



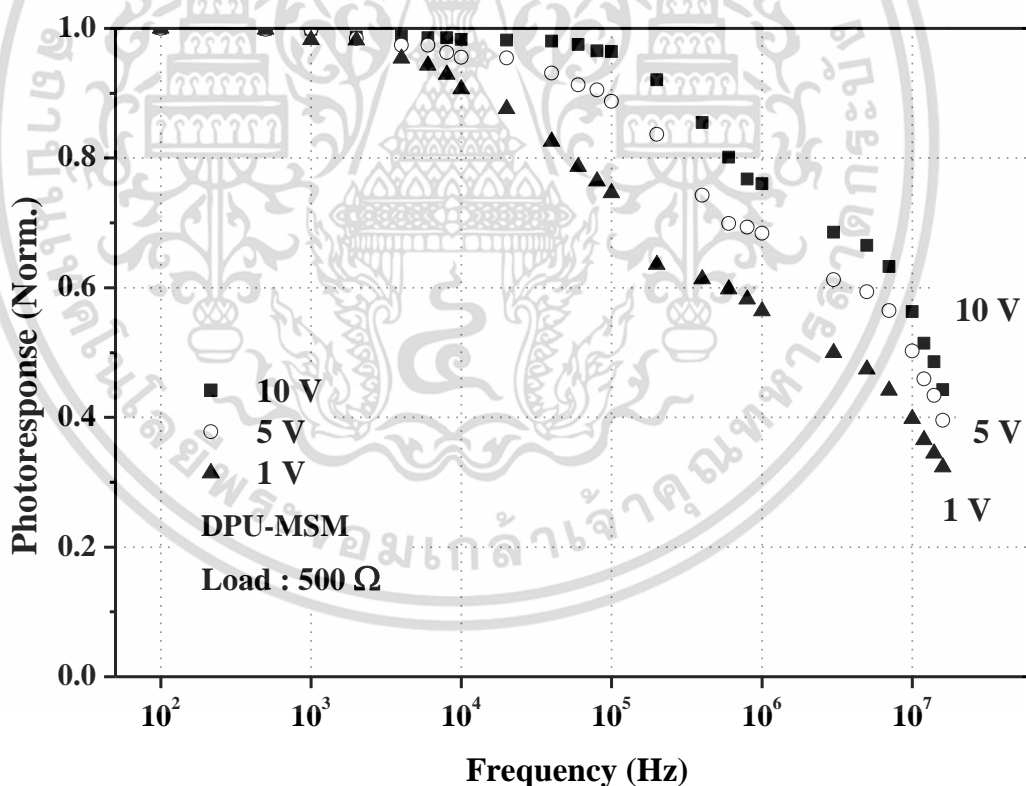
รูปที่ 4.16 การตอบสนองสัญญาณแสงที่ถูกนอร์มอลไรซ์กับความถี่ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่โหลดต้านทานเปลี่ยนแปลงเป็น 500 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ และ 100 kΩ

จากผลการทดลองลักษณะการตอบสนองสัญญาณทางแสงตัวตรวจวัดแสงของโครงสร้างแบบ MSM และโครงสร้างแบบ DPU-MSM เมื่อนอร์มอลไลซ์ (normalized) ค่าการตอบสนองทางแสงแล้ว พบว่ามีลักษณะการตอบสนองทางแสงรวมมีอยู่ด้วยกันสองช่วงนั่นคือ กระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) ที่เกิดจากบริเวณหลอดพาหะและกระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ที่เกิดจากบริเวณนิวทรัล [102] ส่วนโหลดความต้านทานค่ามาก คือ 10-100 kΩ ขนาดสัญญาณมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วเป็นผลเนื่องจากค่าคงที่ของเวลา (RC time constant) มีค่ามากขึ้นจึงทำให้เห็นการตอบสนองในช่วงเดียว เมื่อพิจารณาการตอบสนองสัญญาณทางแสงทั้งสองโครงสร้าง ในรูปที่ 4.16 โครงสร้างแบบ DPU-MSM ในส่วนของโหลดความต้านทาน 500 Ω ที่แรงดันไบอัส 10 V มีค่าความถี่คัทออฟ (cutoff frequency) ประมาณ 2 MHz ขณะที่โครงสร้างแบบ MSM ที่มีค่าความถี่คัทออฟประมาณ 100 kHz (รูปที่ 4.15) จะเห็นได้ว่าตัวตรวจวัดแสงทั้งสองโครงสร้างมีลักษณะการตอบสนองทางแสงเหมือนกัน โดยที่ขนาดของสัญญาณกระแสแสงไดโอดมากกว่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ การตอบสนองทางแสงของโครงสร้างแบบ DPU-MSM มีการตอบสนองทางแสงที่ความถี่สูงได้ดีกว่าโครงสร้างแบบ MSM เป็นผลจากกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณหลอดพาหะที่มีค่าไม่เท่ากันซึ่งจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างภายในส่วนพื้นที่รับสัญญาณแสงระหว่างขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกันแม้ว่าจะป้อนแรงดันให้กับตัวอุปกรณ์ที่มีค่าคงที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.2.2.2 ผลการทดลองลักษณะการตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบอัส

หัวข้อนี้เป็นการพิจารณาผลกระทบของการตอบสนองทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัส ( $V_A$ ) มีค่าระหว่าง 1, 5 และ 10 V ตามลำดับ และโหลดความต้านทาน ( $R_L$ ) คงที่มีค่าเท่ากับ 500  $\Omega$  ในรูปที่ 4.17 เป็นกราฟที่ได้จากการผ่านนอร์มอลไลซ์ของการตอบสนองของโหลดความต้านทาน (แกนแนวตั้ง) สัมพันธ์กับค่าความถี่ที่ในการทดลองรูปแบบกราฟ log (แกนแนวนอน) จะเห็นได้ว่าการตอบสนองที่เปลี่ยนแปลงไปตามการเพิ่มขึ้นของแรงดันไบอัสมีผลที่สอดคล้องกับการทดลองลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของสัญญาณกระแสตรงจากการทดสอบที่ผ่านมา ซึ่งกระแสแสงมีค่าสูงขึ้นเป็นผลจากความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้นเมื่อป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นให้แก่ตัวอุปกรณ์ โดยแรงดันไบอัสที่ 1, 5 และ 10 V และทำการนอร์มอลไลซ์แล้วพบว่ากระแสแสงส่วนใหญ่ที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะมีค่ากระแสแสงไดโอด ( $I_D$ ) ประมาณ 0.64, 0.70 และ 0.76 เท่า และกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณนิวทรัลมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ ( $I_C$ ) ประมาณ 0.36, 0.30 และ 0.24 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.1



รูปที่ 4.17 การตอบสนองทางแสงที่ขึ้นกับแรงดันไบอัสของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่โหลดความต้านทาน 500  $\Omega$  ต่ออนุกรมเข้ากับชิ้นงาน

ตารางที่ 4.2 กระแสแสง ความจุไฟฟ้า และความกว้างบริเวณปลอดพาหะที่ขึ้นอยู่กับแรงดันไบอัสของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM

แรงดัน (V)	Normalized ที่ low frequencies ( $I_d + I_c = 1$ )		Cutoff frequency (MHz)	$C_T$ (pF)	$W_d$ ( $\mu m$ )
	$I_d(\omega)$	$I_c(\omega)$			
1	0.64	0.36	0.1	17.56	2.03
5	0.70	0.30	0.6	14.16	3.96
10	0.76	0.24	2.0	12.11	5.49

จะเห็นได้ว่าค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์ลดลงตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้นเกิดจากการขยายตัวเพิ่มขึ้นของพื้นที่บริเวณปลอดพาหะส่งผลให้พื้นที่บริเวณนิวทรัลมีความกว้างลดลง เมื่อพิจารณาส่วนของความถี่คัทออฟของตัวอุปกรณ์ทำการป้อนแรงดันที่ 1, 5 และ 10 V จะได้การตอบสนองทางแสงที่ความถี่คัทออฟจากการนอร์มอลไลซ์ประมาณ 100 kHz, 600 kHz และ 2 MHz ตามลำดับ ซึ่งการตอบสนองทางแสงมีค่าสูงขึ้นตามแรงดันไบอัสมากขึ้นซึ่งมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าลดลงเนื่องจากความจุไฟฟ้า ( $C_T$ ) ที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งการวิเคราะห์ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้างจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

#### 4.2.3 ผลการทดลองลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง

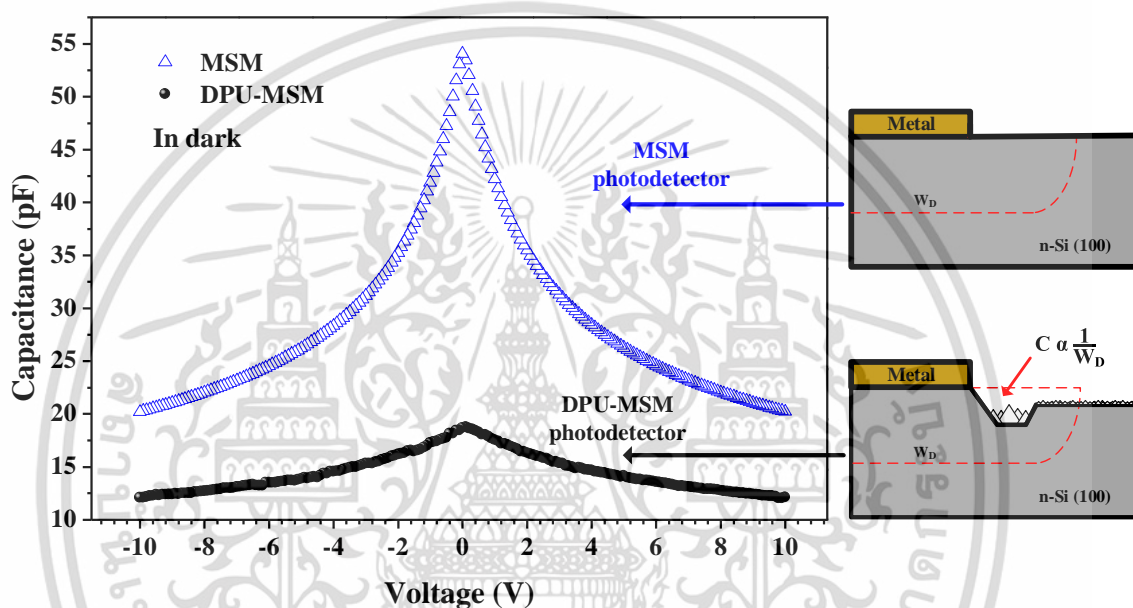
เมื่อนำอุปกรณ์มาทดสอบวัดลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน (C-V) ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ความจุไฟฟ้ารวม ( $C_T$ ) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง นั่นคือ ความจุไฟฟ้าแคโทด ( $C_C$ ) ภายใต้อแรงดันไบอัสย้อนกลับและความจุไฟฟ้าแอโนด ( $C_A$ ) ภายใต้อแรงดันไบอัสตรง โครงสร้างทั้งสองแบบ ได้แก่ แบบเชิงราบ และแบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยู จากการหาความสัมพันธ์ความจุไฟฟ้าและแรงดันไบอัส ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบหรือสภาวะมืด (dark condition) ค่าความจุไฟฟ้ามีค่าแตกต่างกันของแต่ละโครงสร้างสามารถวิเคราะห์ได้จากความสัมพันธ์

$$W_{dep} = \sqrt{2\varepsilon_{Si}\varepsilon_o\mu\rho(V_A + V_{bi})} \quad (4.3)$$

โดยที่

$$C_j = \frac{\varepsilon_{Si}\varepsilon_o A}{W_{dep}} \quad (4.4)$$

เมื่อ  $W_{dep}$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ (m),  $C_j$  คือ ค่าความจุไฟฟ้า (F),  $\epsilon_0$  คือ ค่าสภาพยอมของสุญญากาศ ( $8.854 \times 10^{-12}$  F/m),  $\epsilon_{Si}$  คือ ค่าคงที่ไดอิเล็กทริกของซิลิคอน และ  $A$  คือ พื้นที่หน้าตัดของขั้วไฟฟ้า ( $m^2$ ) ตัวตรวจวัดแสงของแต่ละโครงสร้างมีค่าความจุไฟฟ้าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ผลการทดลองเมื่อแรงดันไบอัสเพิ่มขึ้นค่าความจุไฟฟาลดลง พบว่าแรงดันที่ 10 โวลต์ ความถี่ขนาด 100 kHz ค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบ DPU-MSM เท่ากับ 12.11 pF ขณะที่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่มีค่าความจุไฟฟ้าเท่ากับ 20.22 pF ในรูปที่ 4.18



รูปที่ 4.18 ลักษณะเฉพาะความจุไฟฟ้า – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่โครงสร้าง เมื่อได้รับแรงดันไบอัสค่าต่างๆ

โดยพิจารณาจากสมการที่ 4.4 ค่าความจุไฟฟ้าแปรผกผันกับความกว้างบริเวณพื้นที่ปลอดพาหะ เมื่อป้อนแรงดันเพิ่มขึ้นความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะขยายไปในส่วนของพื้นที่รับสัญญาณแสงจากการทดลองโครงสร้าง DPU-MSM มีค่าความจุไฟฟ้าน้อยกว่าโครงสร้างแบบ MSM เนื่องจากแนวระนาบ (100) ที่ถูกกัดออกไปจนเกิดร่องพีระมิด ซึ่งเปรียบเสมือนการเพิ่มระยะของความกว้างบริเวณปลอดพาหะจึงมีผลต่อความจุไฟฟาลดลงแม้ว่าป้อนแรงดันให้แก่ตัวตรวจวัดแสงมีค่าเท่ากันทั้งสองโครงสร้าง จากการทดสอบลักษณะทางไฟฟ้าอาจกล่าวได้ว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างใหม่แบบพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยูสร้างด้วยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิคซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซ็อนตัวเองสามารถนำไปใช้ในงานด้านอุปกรณ์ทางแสงที่ต้องการค่ากระแสแสงสูงและความจุไฟฟ้าต่ำ ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดดเด่นของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างนี้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

วิทยานิพนธ์เล่มนี้นำเสนอการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิดโลหะ - สารกึ่งตัวนำ - โลหะ โดยมีฐานรองเป็นซิลิคอนและส่วนโลหะเป็นอะลูมิเนียม ในงานวิจัยได้มีการพัฒนาโครงสร้างภายในส่วนของพื้นที่รับสัญญาณของตัวตรวจวัดแสงอยู่ทั้งหมดสามแบบ คือ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ U-MSM, แบบ MPU-MSM และแบบ DPU-MSM โดยใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) สภาพต้านทาน 5-10  $\Omega$ -cm ความหนา 625  $\mu\text{m}$  มีชั้นอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1.5  $\mu\text{m}$  และเคลือบด้วยชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนชั้นอะลูมิเนียมหนาประมาณ 2  $\mu\text{m}$  โดยออกแบบลวดลายของอุปกรณ์เป็นแบบช่องเดี่ยวระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (อะลูมิเนียม) มีขนาดกว้างเท่ากับ 100  $\mu\text{m}$  และมีขนาดของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  สำหรับวิทยานิพนธ์นี้มีจุดมุ่งหมายในการเพิ่มกระแสแสงจากส่วนพื้นที่รับสัญญาณแสงของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างโดยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับซันตัวเองซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ไม่ซับซ้อนและสามารถศึกษาได้ในห้องวิจัยและมีความปลอดภัยสูง การทดลองหาสารละลายที่ใช้กัดจึงมีความสำคัญมากอีกส่วนหนึ่งของงานวิจัยโดยมุ่งเน้นสารละลายที่สามารถปรับปรุงพื้นผิวซิลิคอนและช่วยลดการกัดเซาะอะลูมิเนียมซึ่งเป็นส่วนสำคัญของตัวอุปกรณ์ ส่วนของสารละลายที่นำมาใช้ในการกัดพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง ได้แก่ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (5 wt.%) สารเติมแต่งของกรดซิลิซิก (30, 32, 34, และ 36 g/l) และสารเติมแต่งของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต (5, 6, 7, และ 8 g/l) ซึ่งผลการศึกษาที่ได้มีเนื้อหาสอดคล้องกับสมมติฐานและวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่ได้กำหนดไว้ในบทที่ 1 โดยมีรายละเอียดของการศึกษาดังต่อไปนี้

ส่วนแรกเป็นการศึกษาเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดเพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแต่ละโครงสร้าง ผลที่ได้หลังการกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยสารละลาย dual-doped TMAH (5 wt.% TMAH เติมด้วย 7 g/l AP ที่ผสมกับ 34 g/l silicic acid) จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่าเงื่อนไขของสารละลายที่ใช้กัดนี้สามารถลดความขรุขระของพื้นผิวลงมีค่าเท่ากับ 11.1 nm พื้นผิวซิลิคอนมีความราบเรียบผลจากการเติมสารเติมแต่งของสารแอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟตและจากการผสมกรดซิลิซิกจะสามารถช่วยลดการกัดอะลูมิเนียมได้เป็นอย่างมากโดยมีค่าอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่ 0.18  $\mu\text{m}/\text{h}$  ซึ่งสามารถลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมลงได้ถึง 88 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายไม่ได้กรดซิลิซิก เมื่อนำเงื่อนไขของสารละลายนี้ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบครั้งเดียวทำให้ได้ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่ภายในมีพื้นที่ราบเรียบ (U-MSM) ในส่วนของการใช้สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt.% พบว่าอัตราการกัดซิลิคอนเท่ากับ 42  $\mu\text{m}/\text{h}$  และพื้นผิวซิลิคอนมีความขรุขระเท่ากับ 0.7  $\mu\text{m}$  จากผลการทดลองที่ได้จึงนำเงื่อนไขของสารละลาย pure TMAH (5 wt.%) มาใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดให้มีโครงสร้างแบบพีระมิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภายในร่องรูปตัวยู (MPU-MSM) ด้วยเทคนิคการกัดเปียกแอนไอโซทรอปิกแบบครึ่งเดียว นอกจากนี้ ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงผ่านการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้งด้วยเทคนิคการปรับ ซ้อนตัวเองโดยการใช้เงื่อนไขสารละลาย pure TMAH/silicic acid-added TMAH ในการกัดครั้งแรก ด้วยสารละลาย TMAH บริสุทธิ์ (5 wt.%) และกัดซ้ำครั้งสองด้วยสารละลาย TMAH (5 wt.%) ที่ผสม ด้วยกรดซิลิซิก (34 g/l) หลังผ่านกระบวนการกัดด้วยเงื่อนไขนี้ทำให้ได้โครงสร้างแบบพีระมิดสอง ระดับภายในร่องรูปตัวยู (DPU-MSM) ที่มีลักษณะเป็นร่องพีระมิดขนาดไมครอนและขนาดนาโนอยู่ ภายในส่วนของพื้นที่รับแสง โดยพบว่าส่วนของพีระมิดทั้งสองขนาดนี้อยู่ในระยะของบริเวณปลอด พาทะ จากผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพตัวตรวจวัดแสงทำให้ได้พื้นที่รับสัญญาณแสงภายใน โครงสร้างเพิ่มขึ้น

ส่วนสุดท้ายเป็นการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงทั้งสี่โครงสร้าง ได้แก่ โครงสร้างแบบ MSM โครงสร้างแบบ U-MSM โครงสร้างแบบ MPU-MSM และโครงสร้างแบบ DPU- MSM ผลจากการวัดลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ พบว่ากระแสรั่วมีค่าของอุปกรณ์ทุกโครงสร้างมีค่าต่ำใกล้เคียงกันและมีลักษณะกระแสไฟฟ้าสมมาตร กันทั้งสองด้าน ซึ่งให้คุณสมบัติที่ดีเป็นที่น่าพอใจและสอดคล้องกับข้อดีที่กึ่งแบริเออร์ทั่วไปสามารถ ใช้เป็นตัวตรวจวัดแสงได้ จากนั้นทำการวัดลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะ ได้รับความเข้มแสงด้วยไดโอดเลเซอร์ความยาวคลื่น 635 nm ที่กำลังงาน 6.0 mW จากผลการ ทดสอบกระแสแสงที่ได้ของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบมีค่าน้อย ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงลักษณะ กระแสแสงจากการเพิ่มพื้นที่รับสัญญาณแสงด้วยเทคนิคการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกซ้ำสองครั้ง ด้วยการปรับซ้อนตัวเองทำให้ได้โครงสร้างแบบใหม่ขึ้น ผลที่ได้พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่มีค่ากระแสแสง สูงสุดเท่ากับ 281  $\mu\text{A}$  จากโครงสร้างแบบ DPU-MSM ขณะที่ค่ากระแสแสงรองลงมาคือ โครงสร้าง แบบ MPU-MSM และโครงสร้างแบบ U-MSM ตามลำดับ โดยที่ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดสอง ระดับภายในร่องรูปตัวยูมีความหนาแน่นกระแสมากกว่าแบบเชิงราบถึง 6.6 เท่า เนื่องจากการ ตอบสนองทางแสงที่สัมพันธ์กับการความกว้างบริเวณปลอดพาทะพบว่าส่วนที่เพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสง อยู่ในระยะบริเวณปลอดพาทะทำให้การตอบสนองทางแสงของตัวอุปกรณ์นั้นมีค่าเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

เมื่อนำทำการวิเคราะห์ลักษณะการตอบสนองทางแสงแบบสัญญาณแสงกระแสลับ พบว่าเมื่อ เปลี่ยนแปลงช่วงคลื่นสัญญาณรูปไซน์ตั้งแต่ 100 Hz – 16 MHz ที่โหลดความต้านทานเป็น 500 – 1 k $\Omega$  พบว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ DPU-MSM ที่แรงดันไบอัส 10 V มีการตอบสนองทางแสง รวมอยู่สองช่วง คือ ช่วงแรกเป็นผลจากบริเวณนิวทรัลมีค่ากระแสแสงคอนดักเตอร์เท่ากับ 0.24 และ ช่วงที่สองเป็นผลมาจากบริเวณปลอดพาทะซึ่งเป็นกระแสแสงส่วนมากของตัวตรวจวัดแสงมีค่ากระแส แสงไดโอดที่มีค่าประมาณ 0.76 ของกระแสรวม ขณะที่ความถี่คutoffของตัวตรวจวัดแสงแบบ DPU- MSM มีลักษณะการตอบสนองทางแสงจากการนอร์มอลไลซ์เพิ่มขึ้นตามแรงดันไบอัสอยู่ที่ 2 MHz ซึ่ง มีการตอบสนองที่ความถี่สูงกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบที่ตอบสนองทางแสงที่ความถี่คutoff 100 kHz

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งการตอบสนองทางแสงมีค่าสูงขึ้นตามแรงดันไบอัสมากขึ้นซึ่งมีผลต่อค่าความจุไฟฟ้าที่บริเวณรอยต่อมีค่าลดลงซึ่งเป็นผลให้ค่าคงที่ของเวลามีค่าน้อยลง

ในส่วนของลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดัน พบว่าหลังการกัดเงื่อนโซของสารละลาย pure TMAH/silicic acid ผลที่ได้จากการวัดความจุไฟฟ้ามีการเปลี่ยนแปลงอย่างเห็นได้ชัดเมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างแบบเชิงราบ โดยความจุไฟฟ้าของโครงสร้างแบบ DPU-MSM นั้นมีค่าลดลง 40 เปอร์เซ็นต์ เกิดจากการกัดพื้นที่รับแสงส่วนนั้นออกทำให้ส่วนของความกว้างปลอดพาหะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากความจุไฟฟ้า ( $C_T$ ) ที่บริเวณรอยสัมผัสมีค่าแปรผกผันกับบริเวณปลอดพาหะ

จากการศึกษาตัวตรวจวัดแสงชนิดโลหะ – สารกึ่งตัวนำ – โลหะ โครงสร้างใหม่แบบร่องพีระมิดสองระดับภายในร่องรูปตัวยูโดยการกัดแอนโคโนโทรปิกด้วยเทคนิคการปรับซันตัวเองซึ่งเป็นกระบวนการสร้างที่ทำให้พื้นที่รับสัญญาณแสงเพิ่มขึ้นและเทคนิคนี้ยังช่วยลดขั้นตอนการสร้างชั้นป้องกันการกัดซันทับหลายครั้งได้ถือได้ว่าเป็นกระบวนการสร้างที่ง่าย ต้นทุนในการผลิตต่ำ แต่สามารถเพิ่มการตอบสนองแสงและลดความจุไฟฟ้าให้แก่ตัวอุปกรณ์ได้อย่างเป็นดี ซึ่งสามารถนำตัวตรวจวัดแสงไปประยุกต์ใช้งานได้มากมาย ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ควบคุมกระแสแสงจากการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสโดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้งานที่ความถี่สูง ตัวอย่างเช่น อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ไอริส หรืออุปกรณ์ที่สามารถตอบสนองแสงต่อความเข้มแสงน้อยได้ ซึ่งแนวทางการต่อยอดนั้นสามารถนำไปใช้วัดค่าความไว (sensitivity) ที่ช่วงความเข้มของแสงต่ำสุดจนถึงความเข้มของแสงสูงสุดของตัวอุปกรณ์สามารถตอบสนองแสงที่เหมาะสมที่สุด (optimum) ขึ้นอยู่กับความกว้างบริเวณปลอดพาหะ หากวัดค่าความไวที่ได้มีค่าระดับความอึมตัวจะทำให้ลดค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะลงได้

อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองที่ได้สามารถนำตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้สามารถพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพได้ ดังเช่น การปรับโครงสร้างเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตเทท (interdigitated) หรือสร้างชั้นป้องกันการสะท้อนแสง เพื่อเพิ่มกระแสแสงของอุปกรณ์ การเติมอะตอมสารเจือของทองแดงหรือทองคำ ซึ่งจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงนี้มีลักษณะสมบัติที่ดียิ่งขึ้นและเป็นประโยชน์ต่อวงการอุตสาหกรรมของออปโตอิเล็กทรอนิกส์ในอนาคตอย่างมาก

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Yufeng Jin, Zhiping Wang, Jing Chen. **Introduction to Microsystem Packaging Technology**. Taylor & Francis Group, 2011. p. 3.
- [2] Jirawat Jantawonga, Nithi Atthib, et. al., “Fabrication of MEMS-based capacitive silicon microphone structure with staircase contour cavity using multi-film thickness mask.” **Microelectronic Engineering**. 206 (2019) 17–24.
- [3] ยุทธนา แจ้งอรุณ. “การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [4] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “ลักษณะเฉพาะทางแสงและไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [5] Kamonwan Suttijalern, and Surasak Niemcharoen. “Anisotropic wet etching of a novel micro-texture structure for an Al/n-Si/Al metal–semiconductor–metal photodetector fabrication.” **Journal of Micromechanics and Microengineering**. vol. 31, 2021. 085007 (12pp).
- [6] Li-Hong Lai, Tien-Chang Chang, et. al. “A U-Grooved Metal–Semiconductor–Metal Photodetector (UMSM-PD) with an i-a-Si:H Overlayer on a [100] P-Type Si Wafer.” **IEEE Photonics Technology Letters**. 10 (1998) pp. 579-581.
- [7] H. S. Fresser, F. E. Prins and D. P. Kern. “Metal-semiconductor-metal structures as electron detector for 1 kV microcolumns.” **Microelectronic Engineering**. 27 (1995) pp. 159-162.
- [8] Jalal Rouhi, Shahrom Mahmud, Sabar Derita Hutagalung, Nima Naderi, Saeid Kakooei and Mat Johar Abdullah. “Controlling the shape and gap width of silicon electrodes using local anodic oxidation and anisotropic TMAH wet etching.” **Semicond. Sci. Technol.** 27 (2012) pp. 1-11.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [9] Osamu Tabata, Ryoup Asahl, Hirofumf Funabashi, Keuchi Shimaoka and Susumu Sugfyama. “Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions\*.” **Sensors and Actuators A**. 34 (1992) pp. 51-57.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] Kaoru Sakaino, Sadao Adachi. “Study of Si (1 0 0) surfaces etched in TMAH solution.” **Sensors and Actuators A**. 88 (2001) pp. 71-78.
- [14] Jiunn-jye Tsaur, Chen-Hsun Du and Chengkuo Lee. “Investigation of TMAH for front-side bulk micromachining process from manufacturing aspect.” **Sensors and Actuators A**. 92 (2001) pp. 375-383.
- [15] งามจิต มงคลนนานนท์, “การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [16] วุฒิไกร คำอ่อน, “การกัดพื้นผิวเรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [17] ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, “การลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้คูสารเจือของสารละลาย TMAH สำหรับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิต” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.
- [18] ธนกฤต แสงโสง, “การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559.
- [19] สุรชาติ เมืองงอ่า, “การศึกษาลักษณะสมบัติและการสร้างโฟโตไดโอดชนิด MSM ที่มีโครเมียมเป็นขั้วโลหะ” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [20] นายวรเทพ น้อยปรีชา, “การออกแบบการสร้างโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2553.
- [21] สุรดา เอื้อมานะพงษ์, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Cr/n-Si (Pt-Doped)/Cr”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [22] รัตนารรณ สันบุญตัน, “การสร้างโฟโตไดโอดโลหะ/สารกึ่งตัวนำ/โลหะโครงสร้างขั้วอินเตอร์ดิเจิตร่วมกับกระบวนการผลิตซีมอส” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [23] ไอลดา สุวรรณชาติ, “ผลกระทบของการฉายรังสีเอกซ์บนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีมอสที่แพร่สารเจือแพลทินัม” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] บุศรา นรารักษ์, “การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโพโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2556.
- [25] ศุภกร จันทรประภา. “การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดตก็ยไโดโอดที่แพร่อะตอมสารเจือแพลตทินัมโดยการฉายรังสีเอกซ์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2557.
- [26] กุลวรงค์ นุตะมาน, “การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิฟิเทท” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2552.
- [27] สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิล์ม”, พิมพ์ครั้งที่ 4 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ. 2549.
- [28] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2558.
- [29] Batool Eneaze B. Al-Jumaili, Zainal A. Talib, Asmiet Ramizy, NaserM. Ahmed, L. Y. Josephine, Suriati B. Paiman, Ibrahim B. Muhd, and Sinan A. Abdulateef. “Responsivity Dependent Anodization Current Density of Nanoporous Silicon Based MSM Photodetector.” *Hindawi Publishing Corporation Journal of Nanomaterials*. (2016), 8 pages.
- [30] สรวิต มุ่งการนา, “เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกักย้อมสีเป็นชั้นลดการสะท้อน.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [31] Jung-Sheng Huang, Kuan-Wei Lee, Cheng-Yao Huang, and Shih-Feng Wang. “Analyses of Responsivity and Quantum Efficiency of p- Si/ i-  $\beta$ - FeSi<sub>2</sub>/ n- Si Photodiodes.” *Sensors and Materials*. Vol. 30, No. 4 (2018) pp. 925–932.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [32] Giuseppe Luongo, Filippo Giubileo, Luca Genovese, Laura Lemmo, Nadia Martucciello and Antonio Di Bartolomeo. "I-V and C-V Characterization of a High-Responsivity Graphene/Silicon Photodiode with Embedded MOS Capacitor." **Nanomaterials**. 7, 158 (2017), pp1-8.
- [33] วรภัทย์ พัฒนอาจกุล. "การศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีแอโนไดซ์เซชัน ในอุปกรณ์ตรวจจับไอของแอลกอฮอล์." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [34] T. Jarnpen, 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) pp. 727-730.
- [35] รังสรรค์ เมืองเหลือ "การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการใช้ของก๊าซแบบความต้านทาน (RTD) โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค." โครงการวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ หน้า 23-24, 2556.
- [36] กมลวรรณ สุทธิเจริญ. "การเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยการเพิ่มขนาดพีระมิดแบบสุ่มด้วยการเติมกรดซิลิซิกในสารละลาย TMAH." วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2561.
- [37] K. Kobayashi, S. Niemcharoen, S. Supadech, Y. Yasumura, K. Sato. "Intrinsic and extrinsic photoresponse of Mo/n-Si/Mo structures with wide electrode gap." **Solid-State Electronics** 46 (2002) pp. 1411-1416.
- [38] Z. Huang, Y. Mao, G. Lin, X. Yi, A. Chang, C. Li, S. Chen, W. Huang, and J. Wang. "Low dark current broadband 360- 1650 nm ITO/ Ag/ n- Si Schottky photodetectors." **Optics Express**. 5827 (2018) Vol. 26, No. 5 pp. 1-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [39] 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.
- [40] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “เทคโนโลยีวงจรรวม.” พิมพ์ครั้งที่ 2 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ. 2564.
- [41] Yuya Tanaka, Yutaka Noguchi, Michael Kraus, Wolfgang Brütting and Hisao Ishii. “Three-terminal capacitance-voltage measurements of pentacene field-effect transistors during operation.” **Organic Electronics**. 14 (2013) 2491–2496.
- [42] P Eliáš, I Kostić, J Šoltýs and S Hasenöhrl. “Wet-etch bulk micromachining of (100) InP substrates.” **J. Micromech. Microeng.** 14 (2004) 1205–1214.
- [43] 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.
- [44] Marwa Nabil and Hussien. A. Motaweh, “Alkali Anisotropic Chemical Etching of P-Silicon Wafer”, **International Conference on Mechanics, Materials and Structural Engineering**. (2016) 191-196.
- [45] Vassili Karanassios and George Mew, “Anisotropic Wet Chemical Etching of Si for Chemical Analysis Applications”, **Sensors and Materials**, Vol. 9, No. 7 (1997) 395-416.
- [46] Miguel A. Gosálvez. “**ATOMISTIC MODELLING OF ANISOTROPIC ETCHING OF CRYSTALLINE SILICON.**” Helsinki University of Technology, Finland, Sep. 2003.
- [47] G. Westwood and C-P. S. Hsu. “Reduced Anisotropy in Tetramethylammonium Hydroxide Based Silicon Etchants.” **The Electrochemical Society**. 80 (2) (2017) pp. 243-247.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [48] Kirt R. Williams, Kishan Gupta and Matthew Wasilik. “ Etch Rates for Micromachining Processing— Part II. ” **Journal of Microelectromechanical Systems**. Volume: 12, Issue: 6, (2003) pp. 761 – 778.
- [49] Wolfgang Haiss. Et. al. “Surface termination and hydrogen bubble adhesion on Si(100) surfaces during anisotropic dissolution in aqueous KOH.” **Journal of Electronanalytical Chemistry**. Vol. 597, Sep. 2006. pp. 1-12.
- [50] J.T.L.Thong, W.K.Choi, C.W.Chong, TMAH etching of silicon and the interaction of etching parameters, **Sensors and Actuators A**. 63 (1997) pp. 243–249.
- [51] U. Schakenberg, W. Benecke and P. Lange. “ TMAHW etchants for silicon micromachining.” **1991 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers** (1991) pp. 815-818.
- [52] G. Kovacs, N. Maluf and K. Petersen. “Bulk Micromachining of Silicon.” **Proc. Of the IEEE**. Vol. 86, Aug. 1998. pp. 1536-1551.
- [53] C. M. A. Ashruf. Et. al. “ Electrochemical etch stop engineering for bulk micromachining.” **Mechatronics**. Vol. 8, Feb. 1998. pp. 595-612.
- [54] 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.
- [55] ยุทธนา แจ้งอรุณ, กมลวรรณ สุทธิเจริญ, จิรวัดน์ ปราบเขตอภิชา ทองรักษ์, รังสรรค์ เมืองเหลือ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “เทคนิคการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้เพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM.” **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9**. หน้า 540-543, 2-4 พฤษภาคม 2560.
- [56] Osamu Tabata. “Anisotropic etching of silicon in TMAH solutions.” **Sensors and Materials**. Vol. 13, No. 5 (2001) pp. 271 -283.
- [57] นายอภิรักษ์ มังกรแก้ว “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟมีเตอร์ ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ.” มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 16, 2559.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [58] G.Yan, P.C.H.Chan, I.-M.Hsing, R.K.Sharma, J.K.O.Sin and Y.Wang. “An improved TMAH Si- etching solution without attacking exposed aluminum.” **Sensors and Actuators A**. 89 (2001) pp. 135-141.
- [59] ผศ.ดร. ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณ์รักษ์ และคณะ “การสร้างผิวซิลิคอนขรุขระรูปทรงพีระมิดสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์ด้วย การใช้หน้ากากกริดในสารละลายเคมีที่ไม่ใช่ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. กันยายน 2558.
- [60] Norio Fujitsuka, Kanae Hamaguchi, Hirofumi Funabashi, Eishi Kawasaki and Tsuyoshi Fukada. “Silicon anisotropic etching without attacking aluminum with Si and oxidizing agent dissolved in TMAH solution.” **Sensors and Actuators A**. 114 (2004) pp. 510–515.
- [61] Petteri Kilpinen. “KOH anisotropic silicon etching for MEMS accelerometer fabrication.” 2014.
- [62] 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.
- [63] Krzysztof P. Rola and Irena Zobel. “Effect of molecular structure of alcohols on wet anisotropic etching of silicon.” **Sensors and Actuators A: Physical**. Volume 242, 1 May 2016, pp. 18-26.
- [64] Krzysztof P. Rola, Konrad Ptasin´ski, Adrian Zakrzewski and Irena Zobel, Silicon 45° micromirrors fabricated by etching in alkaline solutions with organic additives, **Microsystem Technologies**, volume 20, (2014) pp. 221–226.
- [65] Oliver Powell and H Barry Harrison. “Anisotropic etching of {100} and {110} planes in (100) silicon.” **J. Micromech. Microeng.** 11 (2001) pp. 217–220.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [66] 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.
- [67] 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.
- [68] C.G. Wu. Et. al. “Optimization of (100)-Si TMAH etching for Uncooled Infrared Detector.” **Proc. SPIE**. Vol. 7383, Aug. 2009.
- [69] Rémy Charavel, Jean Laconte and Jean Pierre Raskin. “Advantages of p<sup>++</sup> polysilicon etch stop layer versus p<sup>++</sup> silicon.” **Proceedings of the SPIE**. Volume 5116 (2003), pp. 699-709.
- [70] Vadim V. Annenkov, Elena N. Danilovtseva, Viktor A. Pal'shin, Ol'ga N. Verkhozina, Stanislav N. Zelinskiy and Uma Maheswari Krishnan. “Silicic acid condensation under the influence of water-soluble polymers: from biology to new materials”, **RSC Advances**. 7 (2017), pp. 20995-21027.
- [71] S. A. Greenberg. “The Chemistry of Silicic Acid.” **Journal of Chemical Education**. 36 (1959), pp. 218-219.
- [72] W. Manz, J. Mohr and O. Paul. “Silicon Microsystem Technology.” **Microsystem Technology**. 2001.
- [73] M A Gos' alvez and R M Nieminen. “Surface morphology during anisotropic wet chemical etching of crystalline silicon.” **New Journal of Physics**. 5(2003) pp. 100.1-100.28.
- [74] B. K. Sivertsen and H. Serum. “A reinvestigation of the crystal structure of ammonium persulfate, (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>.” **Zeitschrift für Kristallographie - Crystalline Materials**. 130 (1969), pp. 449-460.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [75] Kurt W Kolasinski. “Electron transfer during metal-assisted and stain etching of silicon.” **Semiconductor Science and Technology**. 31 (2016) 014002 (9pp).
- [76] Yoshinobu Aramaki, Takushi Yokoyama, Yoshihiro Okaue and Koichiro Watanabe. “Chemical adsorption of silicic acid to aluminum combined with cation exchange and chelate resins as model compounds of the surface of microbes.” **Semiconductor Science and Technology**. Chemical Geology 212 (2004) pp. 339– 349.
- [77] John Garra, Sebastiano Brida, Lorenza Ferrario and Makarand Paranjape. “Application of Dual-Doped TMAH Silicon Etchant in the Fabrication of a Micromachined Aluminum Flexing Beam Actuator.” **Sensors and Materials**. 13 (2001) pp. 351-358.
- [78] Yi-Chen Wang, Wen-Hsiung Lu, Hang-Ban Chen, and Shi-Chern Yen. “Synergetic Effect of Aluminum and Mo/Al Etching in Phosphoric Acid-Based Etchant with Nitric Acid.” **Journal of The Electrochemical Society**. 159 (2) (2012). pp. D103-D107.
- [79] Erno Hilbrand Klaassen. “MICROMACHINED INSTRUMENTATION SYSTEMS.” **STANFORD UNIVERSITY**. May 1996.
- [80] 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.
- [81] Norio Fujitsuka, Kanae Hamaguchi, Hirofumi Funabashi, Eishi Kawasaki and Tsuyoshi Fukada, “Aluminum protected silicon anisotropic etching technique using TMAH with an oxidizing agent and dissolved Si.” **R&D Review of Toyota CRDL**. Vol. 39 No.2 (2004) pp. 34-40.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [82] Ei-no H. Klaassen, Richard J. Reay, Christopher Storment and Gregory T.A. Kovacs. “Micromachined thermally isolated circuits.” **Sensors and Actuators A**. 58 (1997) pp. 43-50.
- [83] P.Rai-Choudhury (Ed.). **Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication**. vol. 1, SPIE & IEE Press, 1997, p. 58.
- [84] Jidapa Vijafun, Kamonwan Suttijalern, Nutthaphat Thornyanadacha and Surasak Niemcharoen. “Efficiency Increasing for MSM Photodetector by Fabrication of Random Pyramid on U-Shape and Sintering,” **Proceedings of The 42nd Electrical Engineering Conference (EECON). 2019** pp. 341-344 (in Thai).
- [85] Nestor Gabriel Gonzalez-Pereyra. “Anisotropic Etching of Monocrystalline Silicon Under Subcritical Conditions”, **Clemson University**. April 2015.
- [86] 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.
- [87] 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.
- [88] J. Laconte, D. Flandre and J.-P. Raskin. “Silicon bulk micromachining with TMAH”, Springer, 2006.
- [89] Kalpathy B. Sundaram, Arun Vijayakumar, Ganesh Subramanian. “Smooth etching of silicon using TMAH and isopropyl alcohol for MEMS applications.” **Microelectronic Engineering**. 77 (2005) pp. 230–241.
- [90] K. Biswas, S. Das, D.K. Maurya, S. Kal, S.K. Lahiri. “Bulk micromachining of silicon in TMAH- based etchants for aluminum passivation and smooth surface.” **Microelectronics Journal**. 37 (2006) pp. 321–327.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [91] Jaybalan Tamahrajah. “Experimental and theory-based studies of silicic acid formation under hydrothermal conditions – evaluation of various methods.” University of Oldenburg, Sep. 2015.
- [92] Kamonwan Suttijalern, Jirawat Prabket et.al. “Tetramethyl Ammonium Hydroxide Etchant Improvement for Aluminum Passivation and Smooth of Silicon Surface.” **The 2019 International Electrical Engineering Congress.** (2019) pp. 35-38.
- [93] Kamonwan Suttijalern, and Surasak Niemcharoen. “Smooth Surface with U-grooved Structures for Light-detecting Area of Photodetectors Using Dual-doped Tetramethyl Ammonium Hydroxide.” **Sensors and Materials.** Vol. 33, No. 12 (2021) pp. 4297–4309.
- [94] 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.
- [95] Kamonwan Suttijalern, Jirawat Prabket, Rangsan Muanglue, Yutthana Jangarun and Surasak Niemcharoen. “Fabrication of UMSM Photodetectors by adding Ammonium Peroxodisulphate in TMAH solution.” **Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017).** 2-4 May, 2017, pp. 532-535 (in Thai).
- [96] V. Mikhelashvili, Y. Shneider, A. Sherman, S. Yofis, G. Ankonina, O. Eyal, I. Khanonkin and G. Eisenstein. “Highly sensitive photo-detectors for the ultra-violet wavelength range based on a dielectric stack and a silicon on insulator substrate.” **Applied Physics Letters.** 114 (2019), pp. 073504.
- [97] Taoyu Zou, Jianqi Zhang, Shuyi Huang, Chenning Liu, Renzheng Qiu, Xiaozhi Wang, Wei Wu, Hai Wang, Zhixiang Wei, Qing Dai, Chuan Liu, Shengdong Zhanga and Hang Zhou. “Reduced graphene oxide-induced crystallization of CuPc interfacial layer for high performance of perovskite photodetectors.” **RSC Advances.** 9 (2019) pp. 3800-3808.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [98] Yuanjie Su, Shibin Li, et.al. “High responsivity MSM black silicon photodetector.” **Materials Science in Semiconductor Processing**. 16 (2013) 619–624.
- [99] Jidapa Vijafun, Kamonwan Suttijalern, Nutthaphat Thornyanadacha and Surasak Niemcharoen “Dark Current Reduction of MSM Photodetector by Sintering.” **Proceedings of The 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2021)**. APR. 1-3, 2021, pp. 132-135.
- [100] Kamonwan Suttijalern, Jirawat Prabket and Surasak Niemcharoen. “The U-Shaped Photodetector Structure Optimization by Increase Random Pyramid Size.” **International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (2019)**. pp. 330-333.
- [101] กมลวรรณ สุทธิเจริญ, จิรวัดน์ ปราบเขต, รังสรรค์ เมืองเหลือ, ยุทธนา แจ็งอรุณ และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “การสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยการเติม แอมโมเนียมเปอร์ร็อกไซด์ซัลเฟต ลงในสารละลาย TMAH.” **การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9**. หน้า 532-535. 2-4 พฤษภาคม 2560.
- [102] S. M. Sze. **Physics of Semiconductor Devices**. John Wiley & Sons, New York (1981) 2nd Edition.
- [103] Hu, G. J., Taur, Yuan, Dennard, Robert H., Terman, L. M. and Ting, Chung-Yu. “A self-aligned 1- $\mu\text{m}$  CMOS technology for VLSI.” **International Electron Devices Meeting**. (1983) pp. 739–741.
- [104] Tarui, Y., Hayashi, Y., Sekigawa and Toshihiro. “Diffusion Self-Aligned MOST; A New Approach for High Speed Device.” **Proceedings of the 1<sup>st</sup> Conference on Solid State Devices**. (1969).
- [105] McLintock, G. A.; Thomas and R. E. “Modelling of the double-diffused MOST's with self-aligned gates.” **International Electron Devices Meeting**. (1972) pp. 24–26.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] **Kamonwan Suttijalern**, and Surasak Niemcharoen, “ Anisotropic wet etching of a novel micro- texture structure for an Al/n- Si/ Al metal– semiconductor– metal photodetector fabrication,” Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 31, 2021, 085007 (12pp).
- [2] **Kamonwan Suttijalern**, and Surasak Niemcharoen, “ Smooth Surface with U-grooved Structures for Light-detecting Area of Photodetectors Using Dual-doped Tetramethyl Ammonium Hydroxide,” Sensors and Materials, Vol. 33, No. 12 (2021) 4297–4309.
- [3] **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket, Rangson Muanghlua and Surasak Niemcharoen “ Tetramethyl Ammonium Hydroxide Etchant Improvement for Aluminum Passivation and Smooth of Silicon Surface” Proceedings of IEEE 2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON), March, 2019, pp. 35-38.
- [4] **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket and Surasak Niemcharoen “The U-Shaped Photodetector Structure Optimization by Increase Random Pyramid Size” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2019, March, 2019, Hong Kong, pp. 330-333.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Anisotropic wet etching of a novel micro-texture structure for an Al/n-Si/Al metal–semiconductor–metal photodetector fabrication

Kamonwan Suttijalern<sup>✉</sup> and Surasak Niemcharoen<sup>\*✉</sup>

Department of Electronics Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalokkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

E-mail: [surasak.ni@kmitl.ac.th](mailto:surasak.ni@kmitl.ac.th)

Received 1 March 2021, revised 3 June 2021

Accepted for publication 24 June 2021

Published 9 July 2021



CrossMark

## Abstract

Micro-electro-mechanical system fabrication involves molding on a single substrate. Chemical wet etching is common in these systems because it can provide a very high etch rate and selectivity. This optical device has been successfully completed fabrication by using the single-step lithography process. The surface was coated with PR and patterned using a single mask to create U-shaped structures by a wide electrode gap on a silicon substrate. Then it was etched using anisotropic wet etching process in potassium hydroxide, tetramethylammonium hydroxide (TMAH), silicic acid and dissolved silicon powder. The etchant created a 58% increase in the light sensitive area of the U-shaped trench in the structure higher compared to the planar structure. Random micro-pyramids, formed on the silicon surface in the U-shaped structure by the silicic acid-added TMAH solution, led to a ~254 times higher ratio between photon generated current and dark current at reverse bias. This processing technique is a promising technology for improving performance for next-generation optical sensors or silicon photodetector.

Keywords: micro-texture, U-shaped structure, silicon photodetector, optical absorption area, single-step lithography

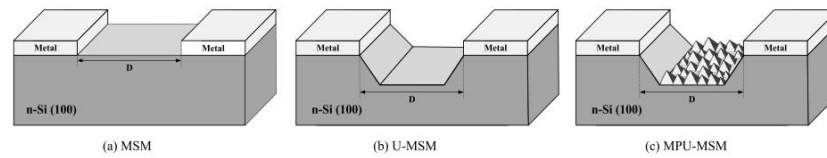
(Some figures may appear in color only in the online journal)

## 1. Introduction

Micro-electro-mechanical systems (MEMS) are miniaturized devices or systems, that usually consist of micromechanisms, communications, microactuators, microsensors introduction to microsystem packaging technology and other microstructure, fabricated on a common silicon substrate [1–3]. The fabrication of MEMS evolved from technology used in semiconductor device fabrication. MEMS manufacturing has been widely used in many types of equipment, for e.g. heart rate

sensors, acceleration sensors, microphones, and many other devices [4–6]. However, elements of MEMS devices which can respond to fast-accelerations are needed in some devices. Therefore, a photodetector element is a key device to measure rapid light changes. An optical receiver uses energy from incoming photons to generate electrical signals [7]. In commercial photoelectric devices, there are many types of photodetectors with different structures, for e.g. avalanche photodetectors, p–i–n photodetectors, p–n junction (or photodiodes), and metal–semiconductor photodetectors. Each type of diode structure has advantages and disadvantages, depends on the purpose of implementation. Metal–semiconductor–metal photodetectors (MSM) have been shown to be very efficient, with

\* Author to whom any correspondence should be addressed.



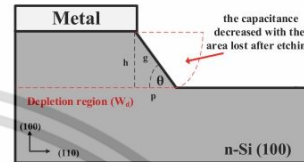
**Figure 1.** Cross-section of photodetector structures: (a) MSM photodetector, (b) U-shaped trenches MSM photodetector (U-MSM), and (c) micro-pyramid in the U-shaped trenches MSM photodetector (MPU-MSM).

very low-noise and parasitic capacitance less than 0.1 fF coupling between the photodiode pad to the doped region [8].

The MSM structure for a photodetector device, which contains back-to-back Schottky diodes on top of an active light absorption region [9], so that reduction only one photomask design process. MSM structures have both short electrode gap [10] and wide electrode gap [11], with differing behaviors. The short electrode gap cannot use voltage to control the current, but there are limitations of the small size mask design (or narrow gap). On the other hand, with a wide electrode gap, a voltage can be applied to control the current and it is easy to fabricate. With this advantage, MSM photodetector structures have resulted in very efficient and high speed sensors, compared to other photoelectric detectors. However, the MSM structure has a high leakage current and very low quantum efficiency [12].

In the past, MSM photodetectors have been studied extensively, using MEMS fabrication processes, to increase the active area in the depletion region, formed by an etched contour. The light sensitive area of the MSM structure depends only on the distance between the two electrodes. Recently, the literature summarized has reported regarding photoelectric devices have been improved with U-shaped electrodes for MSM photodetector devices, where a stronger lateral electric field, in the light absorption region, led to higher quantum yields [10]. However, the fabrication of the U-shaped electrodes is still complicated. Here, we developed a texture profile inside the U-shaped trench that traps the incident light, leading to a promising process for fabricating etched MSM photodetectors, as shown in figure 1. This structure increased efficiency over the conventional planar MSM structure in figure 1(a); our etched profile with the U-shaped trench structure is in figure 1(b). The U-MSM photodetector trenches were shown to increase capture of incident photons within the light receiving area. Because of the bias voltage, only the edges of the trenches effectively capture photons, the light receiving area is independent of the distance between the electrodes [11, 13]. However, the U-shaped trenches only partially increased the light detecting area, but they also reflected some light reflected from the trench walls.

Here, we etched the silicon surface texture profile and characterized the random micro-pyramids, formed inside the active area of the trenches, to make our new MPU-MSM photodetector structures, as shown in figure 1(c). The high response of photodetector was achieved successfully from the texture profile inside U-shaped trench, which the MPU-MSM photodetector structure can enhance an increasing amount



**Figure 2.** Cross-section of the area lost after etching in relation to the capacitance.

of photocurrent. In addition, an effects of etching induced decreasing capacitive value from U-shaped area loss. From the relationship of the equation for capacitance;

$$C = \frac{\epsilon_s A}{W_d} \quad (1)$$

In this equation,  $\epsilon_s$  is semiconductor permittivity ( $1.054 \times 10^{-12} \text{ F cm}^{-1}$ ), and  $W_d$  is the widths of the depletion region. It can be seen from the equation that the capacitance value depends on the width of depletion region. Therefore, when the depletion zone is partially lost, the capacitance decreases with the depth of the U-shaped trench structure in figure 2, which is an advantage of the U-MSM and MPU-MSM structures.

The pyramid structure was formed on the silicon surface by the anisotropic etching technique. The random micro-pyramids were produced on the silicon surface, when  $\text{OH}^-$  in the etchant found defects in the (100) plane, rather than the (111) plane [14, 15],  $\text{OH}^-$  bound to silicon to create orthosilicic acid, which breaks down in combination with water to form  $\text{H}_2$ .

The  $\text{H}_2$  bubble formed a protective mask from the etchant [16]. Typically, which created the micro-pyramids, as shown in figure 3. Many etchants are used, including potassium hydroxide (KOH), which is non-toxic and has no effect on the environment, low cost, uses the solution alkalinity to etch silicon and also exhibits high etch anisotropy, but KOH solution will quickly etch Al metal and it is not commonly used in CMOS, because the  $\text{K}^+$  remains on the device surface [17]. Therefore, ethylenediamine pyrocatechol (EDP) is preferred for silicon etching, it has a medium silicon etch rate, low anisotropic etching and thus is used in CMOS fabrication [18]. However, EDP solution evaporates quickly with toxic gases that are also harmful the etching equipment. Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) solution anisotropically etches

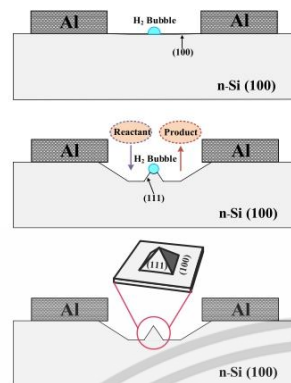


Figure 3.  $H_2$  bubble formed on the Si (100) surface.

silicon and is widely used, although expensive, because it is non-toxic, medium to high silicon etching strength and is compatible with integrated circuits and CMOS [19]. Ordinary TMAH would attack Al, but when TMAH is added, with suitable amounts of Si powder or silicic acid, the mixture passivates Al completely. An etching solution of TMAH and KOH, doped with ammonium persulfate (AP), yields smooth etched silicon surfaces [20–22].

## 2. Sample preparation

The etching experiment used silicon wafers, using six-inch diameter, 625  $\mu\text{m}$  thick, n-type (resistivity 5–10  $\Omega\text{ cm}$ ) single crystal (100)-oriented silicon wafers. The photodetector photomask (or optical mask) were designed using Corel DRAW X6 Graphic. The shape of electrodes is a simple square of size  $1 \times 1\text{ mm}^2$ . The process steps are shown in figure 4.

After cleaning, several etchants were used to study anisotropic etching of the silicon wafers. Next, an aluminum layer with a thickness of 1.5  $\mu\text{m}$  was sputtered on the silicon wafer using sputtering process. Then, a 1.0  $\mu\text{m}$  thick  $\text{SiO}_2$  layer was deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition. In addition, the photoresist (PR) mask for the Al electrodes was added to the wafer by a single-step lithography. The wafer was covered with PR by spin coating, and the wafer was heated to 80  $^\circ\text{C}$  for 30 min, i.e. sufficient to drive off any moisture in the wafer surface. After prebaking, the PR was exposed to intense UV light. Then portions of the PR were dissolved by a developer. When the PR was stripped, a patterned wafer remained after development, then unwanted  $\text{SiO}_2$  was removed by a buffered oxide etch and Al was removed by acid solutions. The sample was immersed in 5 wt% HF to remove the native oxide, followed by rinsing in de-ionized water and blown dry with  $\text{N}_2$  gas. Additionally, the sample was anisotropically etched process with five different etchants are shown in figure 5. In this present study, the fabrication process of the

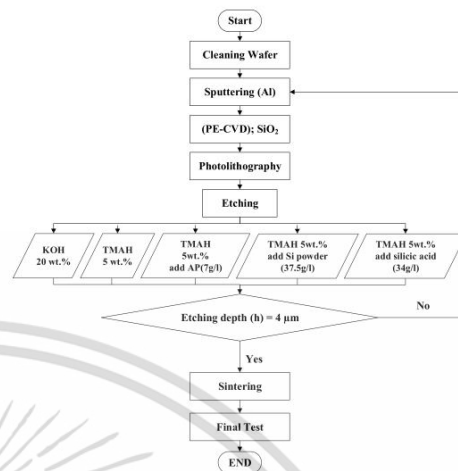


Figure 4. Fabrication flow chart for the photodetectors.

MPU-MSM structure was etched continuously with a chemical solution by a single-step wet etching technique. The result after etching causes a U-shaped structure and the random pyramids to be formed simultaneously. The etching solutions were prepared by diluting commercially available etchants, including 20 wt% KOH solution (84% pure, Merck, USA), 5 wt% TMAH solution (25 wt%, Merck, Germany), 5 wt% TMAH solution with AP; AP additive ( $7\text{ g l}^{-1}$ ), 5 wt% TMAH solution with silicic acid additive ( $34\text{ g l}^{-1}$ ) and 5 wt% TMAH solution with Si powder additive ( $37.5\text{ g l}^{-1}$ ). All experiments were carried out in a closed glass beaker at a constant 80  $^\circ\text{C}$ , where the etchant was stirred by a magnetic stirrer at 200 rpm. After etching, the sample was rapidly during sintered in a  $0.71\text{ min}^{-1}$   $\text{N}_2$  gas flow at 500  $^\circ\text{C}$  for 15 min. Finally, profiles of the etched U-grooved pattern and the silicon and aluminum etch rates were measured with a DEP KLA-Tencor P10 surface profilometer. The surface morphology of these profiles were also characterized by scanning electron microscopy (SEM). The electrical properties and current-voltage ( $I$ - $V$ ) characteristics of samples were determined using the Cascade Microtech M150 probe station measurement.

## 3. Results and discussion

### 3.1. Structure of U-shaped photodetector

The energy band diagram of the planar MSM photodetectors as shown in figure 6. In the light sensitive area, between the two electrodes, light incident on the device creates electron-hole pairs, from which electrons always flow from the cathode to the anode and holes flow towards the anode, driven by the electric field. The depletion width ( $W$ ) is the important variable when considering current generation, as most of the

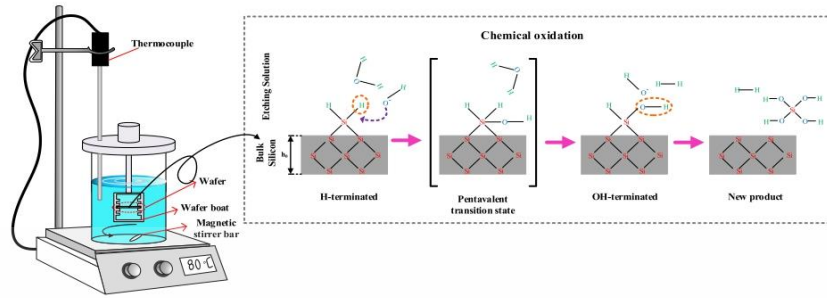


Figure 5. Chemical etching of silicon surface in the etchant.

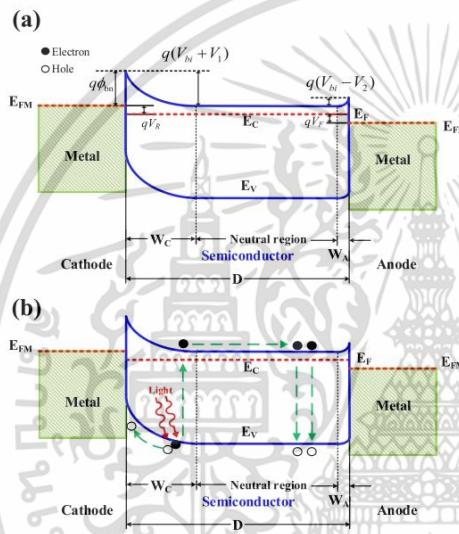


Figure 6. Band diagrams of MSM structure. (a) Dark conditions under bias voltage and (b) under illumination with bias voltage.  $V_{bi}$  is the Schottky barriers at the two ends.  $W_C$  and  $W_A$  are the depletion width.

electric field drop, induced by the bias voltage, occurs across the depletion region, resulting in the direct photocurrent variation with the bias voltage. In this region, substrate atoms are ionized and the photodetector design must increase the sensitive area and take into account the depletion width. The MSM structure photodetector has the same plane electrodes consisting of two aluminum electrodes on a semiconductor, the MSM photodetector with two Schottky barrier contacts, i.e. back-to-back Schottky diode [23–25].

In an MSM structure photodetector, there is a limit to the distance between the electrodes ( $D$ ), defined as the light

sensitive area. Therefore, the original MSM photodetector was modified to form our U-MSM photodetector. Further, we modified the surface within the U-shaped trench on the (100) silicon plane, to form a 'MPU-MSM photodetector'. In these structures, the depletion zone width in the Schottky junction is given by:

$$W_D = \left[ \frac{2\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_D} \right) (V_{bi} - V_A) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

where  $\epsilon_s$  is semiconductor permittivity ( $1.054 \times 10^{-12}$  F cm<sup>-1</sup>),  $q$  is electron charge ( $1.602 \times 10^{-19}$  C),  $N_D$  is donor atom concentration ( $8 \times 10^{13}$  cm<sup>-3</sup>),  $V_{bi}$  is built-in voltage, and  $V_A$  is bias voltage.

Where the built-in voltages are:

$$q\phi_{Bn} = q(V_{bi} - \phi_n) \quad (3)$$

$$q\phi_n = \frac{E_g}{2} - kT \ln \left( \frac{N_D}{n_i} \right) \quad (4)$$

Calculation of the widths of the depletion regions shows that the depletion zone electric field increases with the reverse-bias voltage. At a bias voltage of 5 V, the calculated depletion width is 3.96  $\mu$ m, so the designed U-shaped trench depth was set to  $\sim 4$   $\mu$ m. The increased light sensitive area can be calculated as:

$$h/g = \sin \theta \quad (5)$$

$$p/g = \cos \theta \quad (6)$$

where  $p$  is the width light sensitive area/unit length on the U-shaped trench,  $g$  is light detecting area/unit length along the U-shaped trench,  $h$  is the etch depth and  $\theta$  is the silicon etch angle ( $54.74^\circ$ , the preferred etch angle between the (100) and (111) Si planes [26]). At a bias voltage of 5 V, the depletion width within the U-shaped structure is  $\sim 4$   $\mu$ m, which determines that the U-shaped structure depth should be similar. Then, from figure 7, the calculated increase in the light sensitive area

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

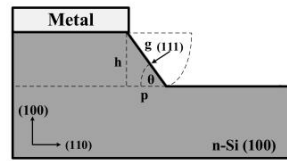


Figure 7. Cross-sectional view of the U-shaped trench in the etched (100) silicon wafer.

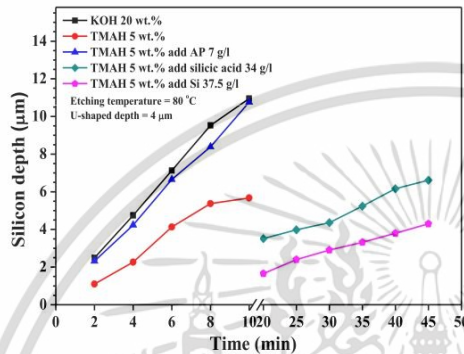


Figure 8. Silicon etching depth vs etching time.

of the U-shaped structure, where the U-shaped depth (side  $h$ ),  $h = 4 \mu\text{m}$ , derived from the depletion width,  $4 \mu\text{m}$ , and the etching angle =  $54.74^\circ$ , light detecting area of the U-shaped structure (side  $g$ ) was 1.73 times larger than the area on a horizontal light sensitive area (or the planar structure).

### 3.2. Etch rate

In this work, this experiment also showed that the silicon depth in the  $4 \mu\text{m}$  range was examined as a determinant parameter within the U-shaped structure. In figure 8, the performance of five different etchants is shown. Three etchants (20 wt% KOH solution, 5 wt% TMAH solution, and 5 wt% TMAH solution with AP additive ( $7 \text{ g l}^{-1}$ )) were relatively fast, reaching the target  $\sim 4 \mu\text{m}$  depth in less than 5 min. The other two took more than 20 min for the same depth. In all cases, etching depth was roughly proportional to time. The wet etching process with the anisotropies value of the low silicon etch rate because the horizontal silicon etch rate is slightly lower than the vertical silicon etch rate [27]. Additional of silicic acid and Si powder in a TMAH etching solution leads to slower etching, which is more suitable for controlling the shallow depth of the etching.

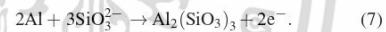
We determined the silicon etching rate,  $R$ , from the ratio of mass loss or material depth,  $h$ , per etching time,  $t$ , i.e.  $R = h/t$ . Anisotropy of silicon etching using 20 wt% KOH solution (also called the KOH), 5 wt% TMAH solution (also called the TMAH), 5 wt% TMAH solution with AP additive

( $7 \text{ g l}^{-1}$ ) (also called the AP-added TMAH), 5 wt% TMAH solution with Si powder additive ( $37.5 \text{ g l}^{-1}$ ) (also called the Si-added TMAH) and 5 wt% TMAH solution with silicic acid additive ( $34 \text{ g l}^{-1}$ ) (also called the silicic acid-added TMAH). The results show that the KOH solution has the highest silicon etch rate at  $1.19 \mu\text{m min}^{-1}$ . The TMAH solution and the AP-added TMAH have silicon etch rates at  $0.69 \mu\text{m min}^{-1}$ , and  $1.06 \mu\text{m min}^{-1}$  respectively, as shown in table 1.

The addition of AP increased the silicon etch rate by  $\sim 1.5$  times pure TMAH solution is shown in figure 9. Oxygen from AP oxidizes more strongly than oxygen from water and AP leads to a higher silicon etch rate. When adding silicic acid to TMAH, decrease in the pH value ( $\text{pH} < 13$ ) [28]. According to the silicon etching mechanism, the decrease in the pH value corresponds to a decrease in hydroxyl ions in the bulk solution and the pH value could decrease through the dissociation of the silicon etching reaction product which acted as a weak acid [29, 30]. The silicic acid is formed which coats the silicon surface, which then inhibits access of the etchant to the silicon. This caused the etch rate to be decreased by  $\sim 4$  times.

Consider etching of the  $\text{SiO}_2$ , the  $\text{SiO}_2$  etch rate has a much lower Si etch rate. KOH solution showed a  $\text{SiO}_2$  etch rate slower than the TMAH solution. However, when adding the appropriate amount of Si powder or silicic acid, the  $\text{SiO}_2$  etch rate is slower than the TMAH solution approximately 76%–94%. The Si atoms in the additive chemistry of Si powder or silicic acid cause ionized forms  $\text{SiO}(\text{OH})_3^-$  and  $\text{SiO}_2(\text{OH})_2^{2-}$  affect the slow binding of silicon dioxide layer [31].

The Al etching by each etchant was studied. The etching conditions directly affected the device integrity. In figure 10, the Al etch rate with KOH solution was faster than with TMAH solution, thus using KOH solution to fabricate photodetectors with Al/n-Si/Al can damage the electrodes. However, the TMAH solution with added Si powder etched at  $30 \text{ nm min}^{-1}$ , or 60 times slower than the pure TMAH solution. Adding silicic acid to TMAH decreased the etch rate to  $3.7 \text{ nm min}^{-1}$ , i.e. it was eight times slower than Si-added TMAH



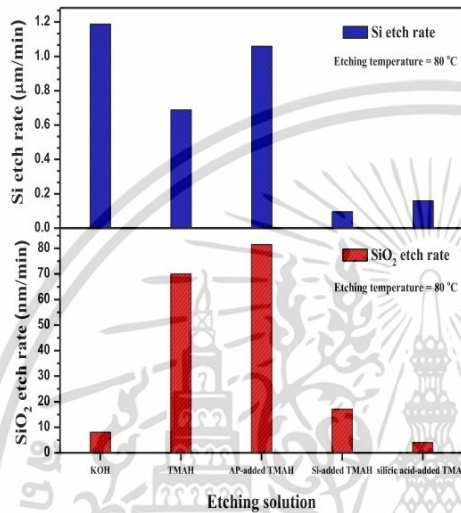
With addition of silicic acid, the pH of the TMAH solution was reduced (between pH 8 and pH 12), by introduction of silicate,  $(\text{SiO}_3)_3$  to the system according to equation (7) [32, 33]. When the exposed Al dissolved, the silicates in solution formed aluminosilicates;  $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$  that were less soluble than the hydrated aluminum oxides, that would otherwise form at the metal surface, as shown in figure 11. The aluminum etch rate decreased, due to an increase in the thickness of the aluminosilicate layer on the Al surface.

### 3.3. Etched surface texture

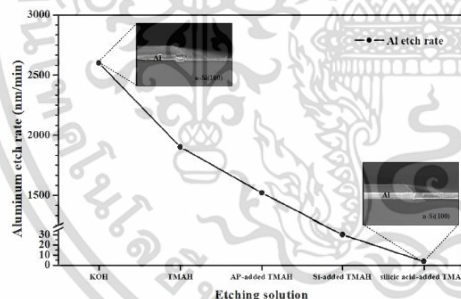
The physical characteristic of the silicon surface inside the formed U-shaped structure was studied. In figure 12, the silicon surface texture was measured with a DEP KLA-Tencor P10 surface profilometer. From micrographs, we found a surface smoothness of 2 nm with AP-added TMAH. The addition of AP at the right concentration led to a smoother Si surface,

**Table 1.** Summary of the etch rates of Si at different etchants.

Etch label	Base etchant		Additive		Etch rate ( $\mu\text{m min}^{-1}$ )
KOH	KOH	20 wt%	—	—	1.19
TMAH	TMAH	5 wt%	—	—	0.69
AP-added TMAH	TMAH	5 wt%	AP	$7 \text{ g l}^{-1}$	1.06
Si-added TMAH	TMAH	5 wt%	Si powder	$37.5 \text{ g l}^{-1}$	0.09
Silicic acid-added TMAH	TMAH	5 wt%	Silicic acid	$34 \text{ g l}^{-1}$	0.16

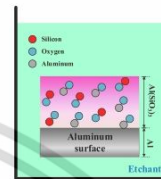


**Figure 9.** Silicon and silicon dioxide etch rates for various etchants.

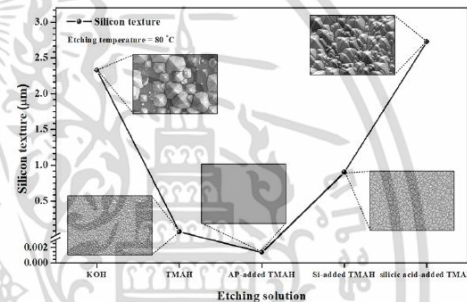


**Figure 10.** Aluminum etch rate for various etching solutions.

due to the elimination of the silicon surface by the oxidizing agents [34], AP, smoothed the silicon surface texture. However, silicic acid-added TMAH produced a very rough surface with  $\sim 2.74 \mu\text{m}$  high hillocks. In contrast, the micro-pyramid



**Figure 11.** Aluminum protective layer in etchant.

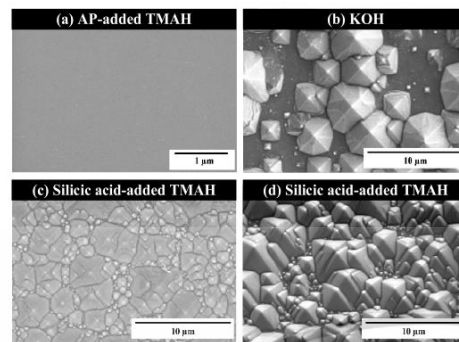


**Figure 12.** Relationship between surface texture on the silicon surface (100)-oriented and etchant conditions.

texture on the silicon surface with KOH solution had  $2.28 \mu\text{m}$ , with the Si-added TMAH, they were  $0.87 \mu\text{m}$  and with pure TMAH solution,  $0.069 \mu\text{m}$ . In anisotropic wet chemical etching, the etchant reacts with the undercut Si on the crystal defects, therefore it was slower on the vertical walls ((111) planes) than the (100) planes on the U-shaped bases. This difference in etch rates [35, 36] is one reason for the formation of the small pyramidal hills (also called random micro-pyramids).

The Si surfaces were imaged with a field emission SEM at  $30,000\times$  magnification is shown in figure 13, which shows etched (100) planes under various conditions. With AP-added to low concentration TMAH, the silicon surface was very smooth, the AP reduced the size of the bubbles formed, thereby reducing their dwell time, i.e. the time the bubbles resided on the silicon surface, which produced micro-masking effects [37, 38] and the smooth surface are shown in

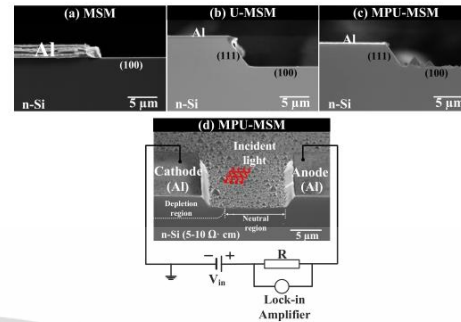
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



**Figure 13.** SEM microphotograph of (100)-oriented silicon wafer etched in (a) AP-added TMAH, (b) KOH solution, (c) silicic acid-added TMAH, and (d) silicic acid-added TMAH with an inclined angle of 30°.

figure 13(a). The silicon surface, after etching with KOH solution or silicic acid-added TMAH, the micro-pyramids formed had similar orientation and size. However, with silicic acid-added TMAH micro-pyramids were more widely and evenly distributed, this was caused by local pseudomasking of the Si surface. We attribute this micromasking to some combination of redeposition of insoluble etch products, the solution concentration, uneven etching direction, and bubbles formed at the etched surface [39, 40].

The silicon surface characteristics were investigated after etching with various etchant conditions. The result shows two new photodetector structures, which are the U-MSM (etched with AP-added TMAH) and the MPU-MSM photodetector, (etched with KOH solution, TMAH solution, Si-added TMAH, and silicic acid-added TMAH). Figure 14 shows the cross-section micrographs of the three photodetector structures (MSM, U-MSM, and MPU-MSM) generated under different conditions, considering the relatively long region between electrodes. This region consists of the depletion region and the neutral region. The depleted region is more effective in generating currents than the neutral region due to the neutral region contributes to the device current via the diffusion process of minority carriers (holes) entering into the depleted region. Since this sample has the electrode separation much wider than the sum of the depleted region width and the diffusion length of carriers, both of these sub-regions are entirely illuminated. Thus, the current from the depleted region would increase with its width, while the contribution from the neutral region would remain unchanged [41, 42]. Under illumination, photogenerated electrons and holes are axially separated due to the electric field in the proximity of the Schottky contact, holes move towards the cathode, creating a current, the photocurrent,  $I_{\text{photo}}$  [42]. All three structures use the same fundamental principles, but the probability, that electron-hole pairs will be generated and separated in the depletion region (or the electric current) differ, because



**Figure 14.** SEM cross-sections of photodetectors structure under the etched condition: (a) MSM structure, (b) U-MSM structure obtained by AP-added TMAH, and (c) MPU-MSM structure obtained by silicic acid-added TMAH. (d) Schematic diagram of MPU-MSM photodetector.

the light sensitive area size is not the same. In figure 14(a), the MSM structure has a smaller light sensitive area, than the U-MSM structure  $\sim 1.73$  times (calculated in equation (6)). The base of the etched U-shaped trench on a (100)-oriented silicon wafer, is bounded by (111) planes at  $54.74^\circ$  [43, 44]. Figure 14(b) shows a U-MSM photodetector structure etched with AP-added TMAH solution with a fast Al etching rate. However, in the preparation process, a silicon dioxide layer has been deposited on the aluminum layer to prevent further aluminum etching by the AP-added TMAH solution for a while, thus it can control the aluminum electrodes will not completely corrode. For the MPU-MSM structure in figure 14(c), the depletion width ( $W$ ) extends the light sensitive area by an increased area in the micro-pyramids, and consequently increases opportunities for carrier generation in the depletion region. The current from the depleted region increases with its width, while the contribution from the neutral region would remain unchanged. The difference in aluminum electrode dose does not affect device performances because the prepared aluminum electrode thickness in this work of  $0.5\text{--}1.0\ \mu\text{m}$  is sufficient for electrical conductance, (light transmission normally less than  $100\ \text{\AA}$  thick aluminum electrode) which is fabricated for numerous optoelectronic devices. Figure 14(d) shows the photodetector cross-section of the MPU-MSM, with the Al/n-Si/Al structure constructed by silicic acid-added TMAH condition.

### 3.4. Etched surface texture

The texture on the (100) plane surface of the MPU-MSM structure was imaged with a SEM ( $5000\times$  magnification) and analyzed, using the ImageJ program. The micro-pyramids were counted, the mean base size and size distribution computed. First the scale from the microscope was set, an area for analysis select the area. Next, binarization and threshold adjustment before pyramids were counted are shown in

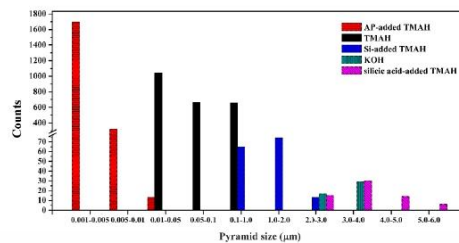


Figure 15. Pyramid size distribution on a silicon scanned area of the etchant conditions.

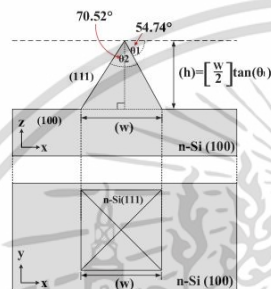


Figure 16. Side (upper) and top view (lower) diagram of a micro-pyramid on a (100) Si surface after etching.

figure 15. We found that with Si-added TMAH, there were more pyramids than with the KOH solution and silicic acid-added TMAH, but the mean micro-pyramid base size was  $\sim 30\%$  smaller than with Si-added TMAH. For TMAH solutions with different etching additives, the use of silicic acid led to fewer pyramids than with Si powder. However, the total surface area of the pyramids was higher. When etching defects and forming micro-pyramids, during the wet etching, large  $H_2$  bubbles formed near the surface defects. These bubbles remained for a long time on the surface to mask it from the etchant, the bubble lifetime had a broad distribution [14]. In addition, overlapping of pyramid bases made the pyramid appear larger. Surface morphologies, obtained from the KOH solution and the silicic acid-added TMAH, showed that the pyramids had similar base sizes. However, from pyramid size distribution, we found that fewer pyramids formed on the KOH solution surface than with silicic acid-added TMAH, the silicic acid-added TMAH increased the number of pyramids.

The micro-pyramids were formed on the silicon surfaces, using the anisotropic etching. With KOH and silicic acid-added TMAH etchant, the micro-pyramids were large and prominent. With KOH etchant, the micro-pyramids were smaller than with silicic acid-added TMAH, where the micro-pyramids overlapped during etching. A diagram of the geometry of a micro pyramid formed on the Si surface is shown in figure 16.

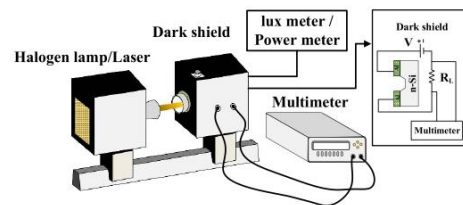


Figure 17. 3D device schematic of the photodetector measuring process.

With KOH etchant, the pyramid bases were  $\sim 3.29 \mu\text{m}$  wide and with silicic acid-added TMAH etchant they were larger,  $\sim 3.85 \mu\text{m}$  calculate the mean-pyramid height from the relationship as in equation (8),

$$h = \left(\frac{w}{2}\right) \tan \theta_1 \quad (8)$$

where  $h$  is the pyramid height,  $w$  is the base and  $\theta_1 = 54.74^\circ$  is the angle from the anisotropic etching. According to the calculation, the mean height was  $2.33 \mu\text{m}$  for the KOH solution and  $2.72 \mu\text{m}$  for the silicic acid-added TMAH.

### 3.5. Electrical characteristics of photodetector

The etchants discussed in this study have been applied to the fabrication of photodetector. The photodetector is an application of the surface micromachining of silicon etching. We fabricated the photodetector device using the anisotropic wet chemical etching, with a magnetic stirrer rotating at 200 rpm, at  $80^\circ\text{C}$ . The investigation on the electrical characteristics of the MSM photodetector, the U-MSM photodetector, and the MPU-MSM photodetector with Al/n-Si/Al were carried out using a Cascade Microtech M150 probe station. All of the current-voltage characteristic measurements were tested with a direct current (DC) signal to determine the photocurrent at differently illuminated and the optical response investigated. The device measuring diagram is shown in figure 17, using the light source with a halogen lamp and laser diode. For calibration, measure the light intensity emitted by a halogen lamp by a lux meter with an illuminate of 25 000 lux. The laser diode with a wavelength of 635 nm, measuring by an optical power meter in ranges of optical power, consists of 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, and 6.0 mW. The position of the photodetector mounted in the dark shield and connect in series with the resistor ( $R_1 = 100 \Omega$ ). After completing the optical part measurement, the incident light is projected, start bias voltage from -10 to 10 V with 0.5 volts per step, and measuring with a multimeter to obtain the current.

In the dark, currents with bias voltages, from -10 V to 10 V, for all the detectors are shown in figure 18. We shown that the U-MSM and the MPU-MSM photodetectors have a dark current significantly higher than that of the MSM photodetector. Electrode imperfections in the contact between the Al electrode and the Si substrate, due to the etchant eroding the

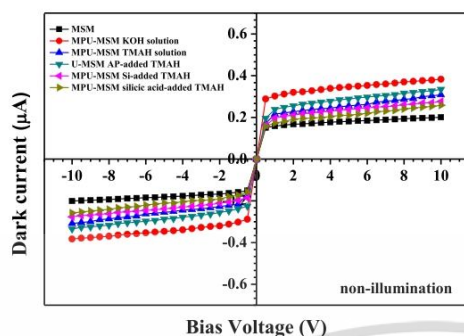


Figure 18. Dark current characteristics of MSM, U-MSM and MPU-MSM photodetectors on non-illuminated.

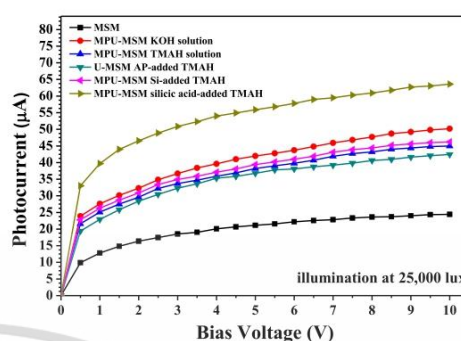


Figure 19. Comparisons of  $I$ - $V$  curves for MSM, U-MSM and MPU-MSM photodetectors with illuminated 25 000 lux.

Al electrode caused this. The analyzing the dark current of the MPU-MSM photodetector in the condition of using between silicic acid-added TMAH and KOH solution, the KOH etchant had the highest dark current because  $K^+$  ions remain on the surface after etching [45], which form traps with lower activation energies allowing faster electron migration and higher current. In contrast, etching with TMAH did not leave such traps.

Photocurrents in the light intensity at 25,000 lux and 10 V bias voltage, with an etch depth of 4 and 5  $\mu\text{m}$  are shown in figure 19. The photocurrent of the U-MSM photodetector (etched with AP-added TMAH) was  $\sim 1.7$  times higher than the original MSM photodetector, which correlates to the difference in sensitive area generated by adding the U-shaped trench edges, as the geometry in equation (6). Photocurrent of MPU-MSM photodetector appears related to increase the light detecting area due to light reflected or scattered from pyramids is absorbed by multiple neighboring pyramids, leading to increased fraction of photons absorbed, compared to the planar surface. When light hits the front side of the micro-pyramid, the light ray moves from the air to the air-silicon interface and is partly transmitted into the silicon and partly reflected. The reflected light ray has a second chance to be coupled in silicon: it hits again the pyramidal texture and is partly coupled into silicon and partly reflected. The second hit of the reflected light ray to the texture is an advantage of the micro-pyramids surface in comparison with a planar surface [46]. In a recently reported work by Hylton *et al* a similar structure with pyramid textures formed on (100)-oriented silicon wafer, the (111) planes at are angled  $54.74^\circ$ , which leads to an absolute reflection reduction of approximately 20% compared to a flat polished wafer in air [47]. Reflectivity of surface roughness at a wavelength of 800 nm from 11.85% to 23.97%, and fabricating a silicon surface with pyramid textures, the light trapping structure with near ideal absorption in the ultraviolet and visible spectrum and the light trapping efficiency of 55% in the near infrared region compiled by Moona *et al* and Barugkin *et al* [48, 49], is a credible

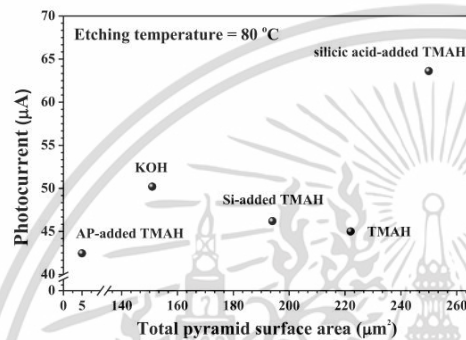
benchmark to assess the performance of light trapping structures, which directly affects the increased photocurrent of the photodetector.

Ratios between light and dark currents are shown in table 2 for the photodetectors based on various structured conditions with their primary performance parameter. Consider the increasing photocurrent of the MPU-MSM photodetector, it found that the silicic acid-added TMAH, the photocurrent-to-dark current ratio is the most when comparing all etchants, which is consistent with the dispersion number and the micro-pyramid size of the silicon surface characteristics and the integrity of the electrodes is shown in figure 20.

The silicon surface of U-shaped directly related to the enhancement of wet etching, which is one of the performances for this random micro-pyramid structure. The dimensional structure of light sensitive area affected the exposure the device responsiveness, (light sensitive area for MPU-MSM > U-MSM > MSM structures, respectively) and the photosensitive enhancement can perform by geometric adjustment [50, 51]. This was due to the large pyramid surface volume and high density of surface state enhance the sensitivity [52–54]. An optical absorbance correlated to carriers-transition in the light sensitive area of depletion regions, as well as leading to photogating in the semiconductor layer, then increasing the photocurrents. In contrast, the photocurrent of the KOH solution is high, but the dark currents also have a high value. Therefore, the photocurrent-to-dark current ratio is lower than every etchant. The reason that the KOH solution conditions have a higher dark current than all the etchant due to the contamination of potassium ( $K^+$ ) ions in the KOH solution remaining on the material surface [30, 55], perhaps the carrier trapping and cause changes in threshold voltage and dark current. Consequently, the conditions of this KOH solution cannot use in photodetector fabrication. The results obtained in the investigation of the electrical characteristics of the MPU-MSM photodetector structure using by the silicic acid-added TMAH conditions are suitable to develop in the field of an optical device.

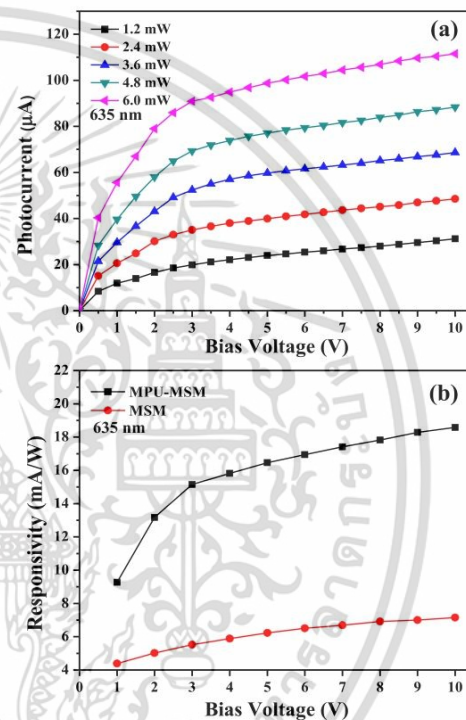
**Table 2.** Summary of the analysis results by ImageJ program and electrical properties.

Conditions	Total pyramid surface area ( $\mu\text{m}^2$ )	Average micro-pyramids base size ( $\mu\text{m}$ )	Mean pyramid height ( $\mu\text{m}$ )	Dark current at 10 V ( $\mu\text{A}$ )	Photocurrent at 25 000 lux ( $\mu\text{A}$ )	Photocurrent: dark current ratio at 10 V
MSM	—	—	—	0.20	24.5	122.5
U-MSM (AP-added TMAH)	5	0.002	0.0014	0.33	42.5	128.8
MPU-MSM (KOH)	151	3.29	2.33	0.38	50.2	132.1
MPU-MSM (TMAH)	222	0.09	0.07	0.31	45.0	145.1
MPU-MSM (Si-added TMAH)	194	1.28	0.90	0.28	46.2	165.0
MPU-MSM (silicic acid-added TMAH)	250	3.85	2.72	0.25	63.6	254.4

**Figure 20.** Variation photocurrent versus pyramid surface area of the KOH, Si-added TMAH and silicic acid-added TMAH conditions.

An optical property comparison of fundamental investigation, as shown in figure 19, reveals that the highest photocurrent on the MPU-MSM photodetector. In addition, the MPU-MSM photodetector also investigated electrical properties for the visible light intensity of 635 nm, as shown in figure 21(a). The magnitude of current and voltage was obtained, which depends on an incident light intensity, i.e. the photocurrent increased with more optical power. With corresponding the MPU-MSM photodetector, it responded dominantly to the DC signal. In addition, the high photocurrent level of the MPU-MSM photodetector can be explained by the increase of the light detectable area, which agrees with the etching process of a random pyramid in a U-shaped structure.

The performance of the photodetector can be quantified in terms of the responsivity of the photodetector. The responsivity ( $R_\lambda$ ) is characterized by the output signal per incident optical power ( $P_{in}$ ). Typically, the photocurrent ( $I_{photo}$ ) can calculate from  $I_{meas} - I_{dark}$ . The responsivity is there described as  $R_\lambda = I_{photo}/P_{in}$ . The maximum responsivity for the MPU-MSM photodetector was obtained as  $18.58 \text{ mA W}^{-1}$  at incident optical power of 6 mW, as shown in figure 21(b). When incident optical was adsorbed into random micro-pyramids, the light responsivity was

**Figure 21.** Characteristics of photodetector; (a) presents the MPU-MSM photodetectors under the different light intensities at  $\lambda = 635 \text{ nm}$ . (b) Portrays responsivity in comparison to the MSM and MPU-MSM photodetectors during 635 nm light illumination with incident optical power of 6 mW.

enhanced plentifully for photodetector. This research proposed the fabrication process of the specific MPU-MSM photodetector, which demonstrated more distinctive photocurrent

characterization than the traditional MSM photodetectors. The optical and electrical properties are corresponding to the fundamental mechanism and specific structure of the photodetector. In this study, we have reviewed the optical response of the micro-pyramid in the U-shaped trench structure led to an increase in the responsivity by 2.5 times compared to the planar structure, which led to manifesting remarkable value in the photodetector technology market.

#### 4. Conclusion

The optimal etching condition was determined in the experimental results as the mixture TMAH 5 wt% add AP ( $7 \text{ g l}^{-1}$ ) solution for the fabrication of the U-MSM photodetector. The silicon after etched is smooth within the U-groove structure, resulting in a U-shaped structure, the photocurrent of  $\sim 1.7$  times that of the planar structure. However, the AP solution limit on the fast aluminum etch rate may affect the incomplete electrode. Meanwhile, the pyramid height on the textured silicon surface is higher when the etching solution contains the mixture TMAH 5 wt% add silicic acid ( $34 \text{ g l}^{-1}$ ) due to the random micro-pyramids formed in the U-shaped structure. Hence, the etching condition for modifying the MPU-MSM photodetector structure with the silicic acid-added TMAH yields the increased light detecting area with the excellent surface quality of the etched silicon and reduced etching of aluminum and silicon dioxide. The photodetectors electrical characteristics analysis in all three structures found that the random micro-pyramids on the U-shaped structure have the photocurrent-to-dark current ratio of approximately 1.35 times that of the U-shaped structure and 1.42 times more than the MSM structure. This is a crucial finding in the direction of improved etchant study of silicon texture. The etching by TMAH solution with the addition of silicic acid, did not find the residual of metal ions or chemical contaminants falling on the surface, which could create the MPU-MSM photodetector compatible with integrated circuits, which can be very useful in fabricating highly efficient optical devices.

#### Data availability statement

All data that support the findings of this study are included within the article (and any supplementary files).

#### Acknowledgments

This work was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang under Scholarship Number KDS 2019/017. The authors would like to acknowledge the Thai Microelectronics Center (TMEC) for silicon wafer fabrication and the Electronics Research Center (ERC) for the laboratory to carry out this research. We would like to express our thanks to Mr John Morris and Ms Tanassanee Jitpanich for contributing to their helpful discussions.

#### ORCID iDs

Kamonwan Suttijaleram  <https://orcid.org/0000-0002-9508-4483>

Surasak Niemcharoen  <https://orcid.org/0000-0002-2565-9632>

#### References

- [1] Jin Y, Wang Z and Chen J 2011 *Introduction to Microsystem Packaging Technology* 1st edn (Boca Raton: Taylor & Francis Group) p 3
- [2] Thong J T L, Choi W K and Chong C W 1997 *Sens. Actuators A* **63** 243–9
- [3] Basu A, Adams G G and McGruer N E 2016 *J. Micromech. Microeng.* **26** 104004
- [4] Jantawong J, Atthi N, Leepattarapongpan C, Srisuwan A, Jeamsaksiri W, Sooriakumar K, Austin A and Niemcharoen S 2019 *Microelectron. Eng.* **206** 17–24
- [5] Zhou C, Wang X, Kuang X and Xu S 2016 *J. Micromech. Microeng.* **26** 075003
- [6] Safi A, Kang W, Czaplinski D, Divan R, Moldovan N and Espinosa H D 2013 *J. Micromech. Microeng.* **23** 125014
- [7] Rai-Choudhury P (ed) 1997 *Handbook of Microlithography, Micromachining, and Microfabrication* (Bellingham, Washington USA: SPIE & IEE Press) (<https://doi.org/10.1117/3.2265070>)
- [8] Su Y, Li S, Wu Z, Yang Y, Jiang Y, Jiang J, Xiao Z, Zhang P and Zhang T 2013 *Mater. Sci. Semicond. Process.* **16** 619–24
- [9] Lee Y C, Hassan Z, Abdullah M J, Hashim M R and Ibrahim K 2005 *Microelectron. Eng.* **81** 262–7
- [10] Laih L-H, Chang T-C, Chen Y-A, Tsay W-C and Hong J-W 1998 *IEEE Photonics Technol. Lett.* **10** 579–81
- [11] Kobayashi K, Niemcharoen S, Supadach S, Yasumura Y and Sato K 2002 *Solid-State Electron.* **46** 1411–6
- [12] Fresser H S, Prins F E and Kern D P 1995 *Microelectron. Eng.* **27** 159–62
- [13] Suttijaleram K, Prabket J, Muanghlua R and Niemcharoen S 2019 *The 2019 International Electrical Engineering Congress* (Hua Hin, Thailand) pp 35–8
- [14] Landsberger L M, Naseh S, Kabrizi M and Paranjape M 1996 *J. Microelectromech. Syst.* **5** 106–16
- [15] Eliá P, Kostić I, Oltýs J and Hasenöhrl S 2004 *J. Micromech. Microeng.* **14** 1205–14
- [16] Dhillon P K and Sarkar S 2016 *Curr. Appl. Phys.* **16** 956–62
- [17] Shikida M, Sato K, Tokoro K and Uchikawa D 2000 *Sens. Actuators A* **80** 179–88
- [18] Sundaram K B, Vijayakumar A and Subramanian G 2005 *Microelectron. Eng.* **77** 230–41
- [19] Sakaino K and Adachi S 2001 *Sens. Actuators A* **88** 71–8
- [20] Biswas K, Das S, Maurya D K, Kal S and Lahiri S K 2006 *Microelectron. J.* **37** 321–7
- [21] Chung G-S 2008 *Microelectron. Eng.* **85** 271–7
- [22] Yan G, Chan P C H, Hsing I-M, Sharma R K, Sin J K O and Wang Y 2001 *Sens. Actuators A* **89** 135–41
- [23] Garg M, Tak B R, Rao V R and Singh R 2019 *IEEE Trans. Electron Devices* **66** 2036–9
- [24] Garg M, Tak B R, Rao V R and Singh R 2018 *IEEE Int. Conf. on Emerging Electronics (ICEE) Bengaluru, India* (<https://doi.org/10.1109/icee44586.2018.8937959>)
- [25] Roy S C, Kundu T and Rao V R 2015 *J. Lightwave Technol.* **33** 3345–50
- [26] Fan Y, Han P, Liang P, Xing Y, Ye Z and Hu S 2013 *Appl. Surf. Sci.* **264** 761–6
- [27] Powell O and Barry Harrison H 2001 *J. Micromech. Microeng.* **11** 217–20

- [28] Lee S B and Babić D 1999 *J. Electrochem. Soc.* **146** 4213–8
- [29] Miyagi T, Sasahara A and Tomitori M 2015 *Appl. Surf. Sci.* **349** 904–10
- [30] Zhang X G (ed) 2004 *Handbook of Electrochemistry of Silicon and Its Oxide* (Berlin: Springer)
- [31] Tsaur J-J, Du C-H and Lee C 2001 *Sens. Actuators A* **92** 375–83
- [32] Chen D, Liu S, Liang J, Hou X, Guo B, Yang S and Lv H 2015 *J. Nanoeng. Nanosys.* **229** 136–40
- [33] Fujitsuka N, Hamaguchi K, Funabashi H, Kawasaki E and Fukada T 2004 *Sens. Actuators A* **114** 510–5
- [34] Resnik D, Vrtaćnik D, Aljancic U and Amon S 2003 *J. Micromech. Microeng.* **13** 26–34
- [35] Khandelwal R, Plachetka U, Min B, Moormann C and Kurz H 2013 *Microelectron. Eng.* **111** 220–3
- [36] Tosaka H, Minami K and Esashi M 1995 *J. Micromech. Microeng.* **5** 41–6
- [37] Haiss W, Raisch P, Bitsch L, Nichols R J, Xia X, Kelly J J and Schiffrin D J 2006 *J. Electroanal. Chem.* **597** 1–12
- [38] Garra J, Brida S, Ferrario L and Paranjape M 2001 *Sens. Mater.* **13** 351–8
- [39] Wang F, Zhang Y, Yang M, Sui Y, Sun Y, Yang L, Yang J and Zhang X 2018 *J. Alloys Compd.* **752** 53–60
- [40] Sato K, Shikida M, Yamashiro T, Tsunekawa M and Ito S 1999 *Sens. Actuators A* **73** 122–30
- [41] Fonash S J 1983 *J. Appl. Phys.* **54** 1966–75
- [42] Niemcharoen S, Kobayashi K, Kimura M and Sato K 2001 *Solid-State Electron.* **45** 1815–9
- [43] Rouhi J, Mahmud S, Hutagalung S D, Naderi N, Kakooei S and Abdullah M J 2012 *Semicond. Sci. Technol.* **27** 1–11
- [44] Eliáš P, Martaus J, Šoltýs J and Kostić I 2005 *J. Micromech. Microeng.* **15** 1007–14
- [45] Biswas K and Kal S 2006 *Microelectron. J.* **37** 519–25
- [46] Souren F M M, Rentsch J and van de Sanden M C M 2015 *Prog. Photovolt., Res. Appl.* **23** 352–66
- [47] Hylton J D, Burgers A R and Sinke W C 2004 *J. Electrochem. Soc.* **151** G408–27
- [48] Moona G, Kapruwan P, Sharma R and Ojha V N 2017 *Natl Acad. Sci.* **88** 617–23
- [49] Barugkin C, Allen T, Chong T K, White T P, Weber K J and Catchpole K R 2015 *Opt. Express* **23** A391–400
- [50] Ilyas N, Li D, Song Y, Zhong H, Jiang Y and Li W 2018 *Sens.* **18** 4163
- [51] Houssa M, Chagarov E and Kummel A 2009 *MRS Bull.* **34** 504–13
- [52] Eng P C, Song S and Ping B 2015 *Nanophotonics* **4** 277–302
- [53] Deng K M and Liang L 2014 *Adv. Mater.* **26** 2619–35
- [54] Ding M, Guo Z, Chen X, Ma X and Zhou L 2020 *Nanomaterials* **10** 362
- [55] Schakenberg U, Benecke W and Lange P 1991 *Int. Conf. on Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers San Francisco, CA, USA* pp 815–8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Volume 33 Number 12(4) 2021

ISSN (print) 0914-4935  
ISSN (online) 2435-0869  
CODEN: SENMER

# Sensors and Materials

International Journal on Sensor Technology

EDITOR-IN-CHIEF

M. Ishida

EDITORS

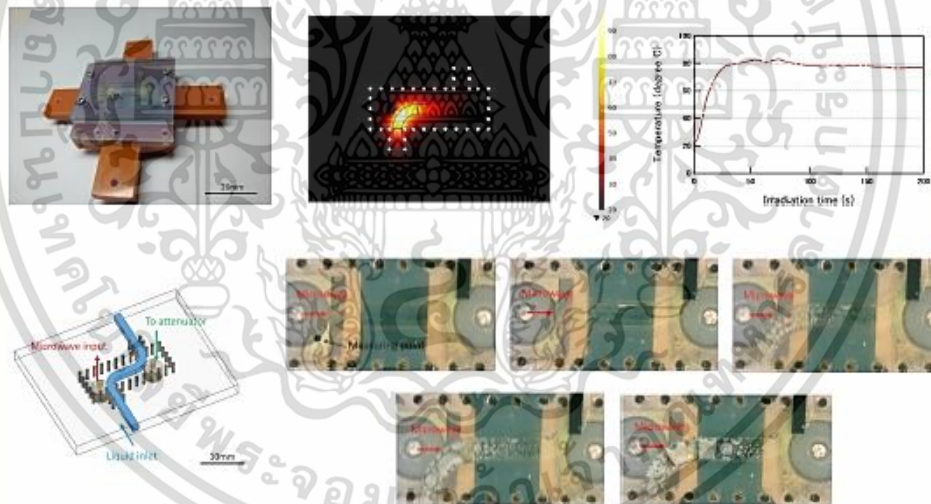
J. Wilde K. Mitsubayashi

ASSOCIATE EDITORS

K. Maenaka J. Ohta

Special Issue on Microfluidics and Related Nano/Microengineering  
for Medical and Chemical Applications

Guest editor: Yuichi Utsumi (University of Hyogo)



MYU

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Smooth Surface with U-grooved Structures for Light-detecting Area of Photodetectors Using Dual-doped Tetramethyl Ammonium Hydroxide

Kamonwan Suttijaleam and Surasak Niemcharoen\*

Department of Electronics Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

(Received May 15, 2021; accepted September 1, 2021)

**Keywords:** U-grooved structure, anisotropic etching, oxidizing agent, smooth surface, silicon photodetectors

Micro-electromechanical system (MEMS) fabrication has gained popularity as a means of etching silicon substrates. This paper discusses the surface texturization of a U-grooved structure by a very simple and cost-effective technique for use as a U-grooved metal–semiconductor–metal (UMSM) photodetector with aluminum/n-Si/aluminum materials. A series of etching experiments were carried out involving the addition of ammonium peroxodisulfate  $[(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4]$  at different concentrations to tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH)/silicic acid etching solution, also called dual-doped TMAH. It was found that the addition of 11.5 g/l  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  to TMAH/silicic acid enhances the smoothness of the surface and prevents the unwanted etching of exposed aluminum. We utilized dual-doped TMAH in the fabrication of a nanostructure in a U-grooved photodetector and found that the U-grooved photodetector has a ~59% higher photocurrent than that of a planar photodetector. The U-grooved photodetector demonstrates that increasing the light-detecting area results in high photocurrent performance for high-efficiency optical devices.

### 1. Introduction

Semiconductor inventions have been widely developed and are now highly advanced, enabling high-speed performance so that systems may immediately respond, have low power consumption, and be used with mobile devices. Micro-electromechanical system (MEMS) is a process technology used to create tiny integrated devices or systems that combine mechanical and electrical components, leading to higher packaging density.<sup>(1–3)</sup> Anisotropic etching is an integral part of MEMS fabrication, which is used to transform the microsurface structure of a device into a circuit pattern or to etch materials that are difficult to remove from the device.<sup>(4–6)</sup> The etchants used in anisotropic etching have unequal etching selectivity between the various crystal surfaces. As a result, the groove formed by the etching has the geometry of a U-groove. Silicon has a very high anisotropic etching rate, and only certain solutions can be used for the anisotropic wet etching of silicon. For example, potassium hydroxide (KOH) is a nontoxic

\*Corresponding author: e-mail: surasuk.ni@kmitl.ac.th  
<https://doi.org/10.18494/SAM.2021.3432>

etchant with a moderate Si/SiO<sub>2</sub> etching rate ratio and a high silicon etching rate. However, KOH is not compatible with CMOS processes due to potassium ion (K<sup>+</sup>) contamination.<sup>(7,8)</sup> Ethylenediamine pyrocatechol (EDP) has a moderate silicon etching rate and compatibility with integrated circuit processes, but it has high toxicity and requires special safety measures.<sup>(9,10)</sup> Tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) is gaining popularity for use in MEMS because it is nontoxic and safe to handle, has a high silicon etching rate, and is compatible with the conventional MOS fabrication process, making TMAH a good choice as a silicon etchant for future MEMS products.<sup>(11–13)</sup> Additives, such as silicic acid, ammonium peroxodisulfate [(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>], and isopropyl alcohol (IPA), may also alter the etching anisotropy.<sup>(14–16)</sup> An ordinary TMAH solution yields rough etched silicon surfaces; however, when TMAH is doped with suitable amounts of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and silicic acid, the mixture solution provides complete aluminum passivation as well as an increased silicon etching rate and smooth etched surfaces.<sup>(17,18)</sup>

U-grooved photodetectors may be considered as an industrial competitor to planar structure photodetectors. This study focused on improving the nanostructured silicon surface and enhancing the performance of U-grooved photodetectors by anisotropic etching methods. Etching of the electrode metal layer in an alkaline solution using a wet etching technique is required to manufacture photodetectors with an aluminum/n-Si/aluminum structure. In previous studies, silicic acid has been shown to reduce the etching rate of aluminum by as much as 80% compared with aluminum etching without silicic acid. The silicon surface becomes very rough after etching in this solution. However, a suitable amount of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> can be utilized to obtain a smoother surface.<sup>(19)</sup> This paper reports the results of experiments performed to compare silicon etching rates and the smoothness of the etched silicon surface for different silicon etchants, namely, pure TMAH and dual-doped TMAH solution. We report a photodetector with a new U-grooved structure as a result of developing an etching solution. The U-grooved structure has the advantage of an increased optical response due to the larger light-detecting area, and its nanostructured surface enables the device to be fabricated with several specifications at the same time. In addition, low-cost and industrial-scale production is easier using the technique.

## 2. Materials and Methods

A U-grooved metal–semiconductor–metal (UMSM) structure photodetector with aluminum/n-Si/aluminum materials in this study was fabricated on a 6-inch n-type Si (100) substrate with a thickness of 625 μm and a resistivity of 5–10 Ω·cm. The process steps are shown in Fig. 1. Initially, organic substances and metal ions on the surface of the silicon were removed in an ultrasonic bath. Then, a 1.5-μm-thick aluminum (Al) layer was grown by sputtering. Next, a 1500-Å-thick silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) layer was deposited by plasma-enhanced chemical vapor deposition (PE-CVD). After that, the textured silicon surface of the photodetector was exposed by photolithography as shown in Fig. 2.

The silicon surface was prepared by an anisotropic etching process as shown in Fig. 3. The etching solutions comprised 5 wt.% TMAH and 34 g/l silicic acid with different amounts of (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (10.0, 10.5, 11.0, 11.5, 12.0, 12.5, and 13.0 g/l) at 80 °C. The solution was heated with a hot plate and stirred with a magnetic stirrer rotating at 200 rpm.

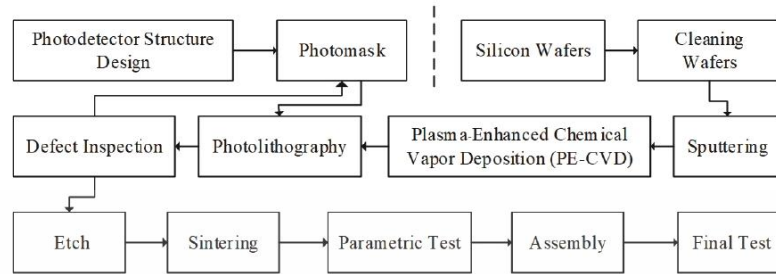


Fig. 1. Fabrication flowchart of photodetector based on silicon structure.

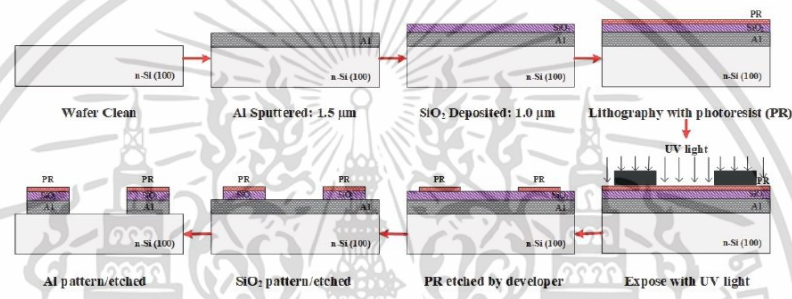


Fig. 2. (Color online) Photolithography steps.

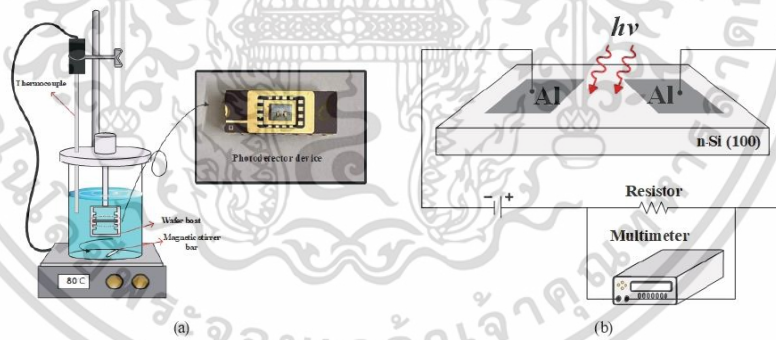


Fig. 3. (Color online) (a) Etching process and (b) 3D schematic of the photodetector measuring process.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Finally, the silicon roughness was measured with a surface profilometer (DEP KLA-Tencor P10), the microscopic structure of the Si surface was investigated with an atomic force microscope (AFM), and a scanning electron microscope (SEM) was utilized to characterize the surface morphology and measure the etching depth. The optical and electrical properties of samples were investigated using a Cascade Microtech M150 probe station, using a light source with a wavelength of 635 nm.

### 3. Results and Discussion

#### 3.1 Physical characteristics of photodetector

The silicon surface was etched by anisotropic etching in TMAH (5 wt%) and silicic acid (34 g/l) with different amounts of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (10.0–13.0 g/l), and the surface roughness and etching rate parameters were measured using a surface profilometer (DEP KLA-Tencor P10). A previous study of Suttijalern *et al.*<sup>(7)</sup> found that the average surface roughness of 5 wt% TMAH solution with 34 g/l silicic acid was 2730 nm at 80 °C. When we added 11.5 g/l  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  to 5 wt% TMAH solution with 34 g/l silicic acid, the estimated roughness of the smooth area was less than 11.1 nm. As shown in Table 1, 5 wt% TMAH with 34 wt% silicic acid solution had a significantly lower aluminum etching rate than 5 wt% TMAH. However, etching in 5 wt% TMAH and 34 wt% silicic acid solution resulted in a high silicon surface roughness. In this work, the optimum amount of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  for reducing silicon roughness was studied. The results showed that using 5 wt% TMAH with 34 wt% silicic acid and 11.5 g/l  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  reduced the silicon surface roughness as well as the aluminum etching rate.

As shown in Fig. 4, it was found that the addition of 10.0 g/l  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  resulted in a silicon surface roughness of 343.1 nm. The silicon surface roughness first decreased and then increased with increasing amount of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  (>11.5 g/l). The increased roughness of the silicon surface after etching was due to an over-replenishing effect that reduces the oxidizing ability of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , resulting in its slower decomposition. The decomposition of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  was also observed during the wet etching process through the monotonic decrease in the Si (100) etching rate with over-etching time.<sup>(20)</sup>

The enhanced etching selectivity of TMAH/silicic acid solution in the etching of silicon can be improved by doping the solution with  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . The silicon etching rate was increased by adding  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  as shown in Fig. 4, with the etching rate changing linearly with the amount of

Table 1  
Variation of etching rate and surface roughness with etching conditions.

Case	TMAH solution	Si etching rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Al etching rate ( $\mu\text{m}/\text{h}$ )	Si roughness (nm)	Ref.
1	5 wt%	0.68	114.06	420	(7)
2	5 wt% + 34 g/l silicic acid	0.15	0.145	2730	(7)
3	5 wt% + 34 g/l silicic acid + 10 g/l $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.61	0.159	343.1	This work
4	5 wt% + 34 g/l silicic acid + 11.5 g/l $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	1.00	0.17	11.1	This work

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

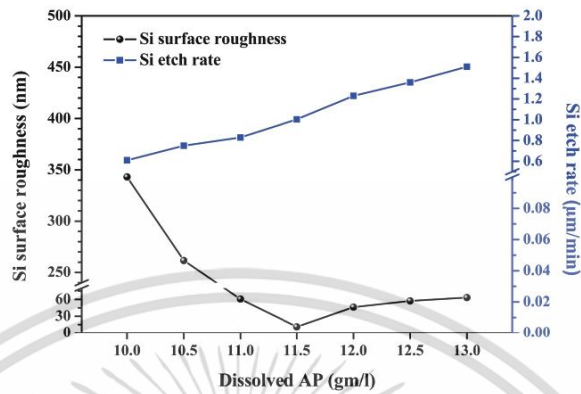


Fig. 4. (Color online) Relationship between etch rate and surface roughness of silicon (100).

dissolved  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ . The dissolved  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  concentration was increased from 10.0 to 13.0 g/l, whereas the silicon etching rate was increased from 0.61 to 1.51  $\mu\text{m}/\text{min}$ . We assumed that adding  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  to the mixture of silicic acid and TMAH solution changed the pH value of the etchant. The etchant anisotropy is affected by pH-dependent changes in the  $\text{OH}^-$  content,<sup>(21,22)</sup> and adding an oxidizing substance such as  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  enhances the silicon etching rate.<sup>(12,13,23,24)</sup> From the results of this experiment, the optimum replenishing concentration and etching conditions can be determined, i.e., the addition of 11.5 g/l  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  to TMAH (5 wt.%) with silicic acid (34 g/l) solution (also called the dual-doped TMAH) enables the fabrication of a U-grooved photodetector.

We investigated the silicon and aluminum etching rates in the dual-doped TMAH solution. The graphs obtained were approximately linear, with the silicon etching rate increasing with etching time, as shown in Fig. 5. The aluminum etching rate shows the same tendency as the silicon etching rate, with etching rates of 1.0  $\mu\text{m}/\text{min}$  and 0.17  $\mu\text{m}/\text{h}$ , respectively. The dual-doped TMAH solution was found to prevent aluminum etching due to the formation of a silicon-rich oxide (SRO) layer on the Al layer in the presence of the oxidizing agents  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  and  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ .<sup>(25)</sup>

The dual-doped TMAH solution has a lower etching rate on aluminum because the oxide layer contains amphoteric  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , which reacts in alkaline solutions to form aluminate as follows.<sup>(1)</sup>



The pH value is reduced by the addition of silicic acid, shifting the chemical equilibrium to the left side of the reaction equation. It was previously found that the aluminum etching rate may

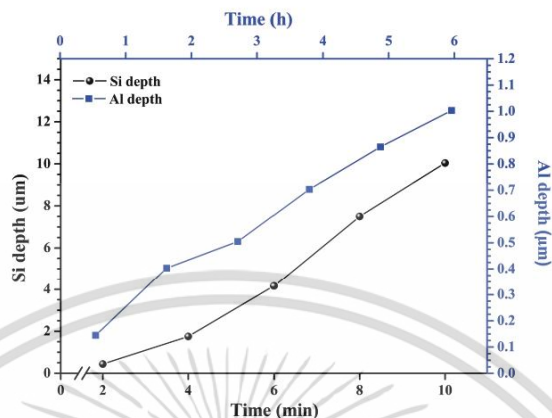


Fig. 5. (Color online) Relationship between etching depths of silicon and aluminum and etching time.

be reduced by two orders of magnitude by doping etchants with acid to lower the pH.<sup>(26)</sup> The chemical reaction rate of the aluminum layer in the TMAH solution is decreased by doping the solutions with silicic acid. This is due to the formation of a protective layer on the aluminum surface, and the silicates in the solution react with  $\text{Al}(\text{OH})_3$  to form sparingly soluble pyrophyllite-type silicates, which passivate the aluminum surface.<sup>(27–30)</sup>

We studied the characteristics of the silicon surface etched under different conditions using a SEM operated at 5.0 kV and 30000× magnification. Figure 6(a) shows that the silicon surface after etching in a 5 wt.% TMAH solution is rough with random pyramids of approximately 600 nm size. This roughness is caused by the concentration of the solution, uneven etching direction, and bubbles that develop on the etched surface. As shown in Fig. 6(b), the average width of a random pyramid of a dual-doped TMAH solution is 15 nm. When the concentration of  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  is increased, the etched surface roughness becomes less than that in the pure TMAH solution. This is because the oxygen in  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  oxidizes silicon more strongly than water, and therefore becomes the major oxidizing agent of silicon during the etching process. The oxidizing agent affects the smoothness of the silicon surface because it removes the surface. Figure 6(c) shows the photodetector cross section of the U-grooved structure with a wide distance between the electrodes, which was fabricated using a dual-doped TMAH solution. The aluminum electrodes were not damaged as a result of the etching process.

An AFM was used to analyze the nano-morphology on the silicon surface after etching. Figure 7 shows AFM images of the morphology of the Si (100) surface after etching in dual-doped TMAH for about 4 min. It was found that the silicon surface has a roughness of about 11.1 nm. For optimization, it is essential to clarify the reduction of the silicon roughness upon adding  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  to the TMAH solution with silicic acid.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  is an oxidizer used to control the problem of hillock formation in low-concentration TMAH to prevent the depletion of

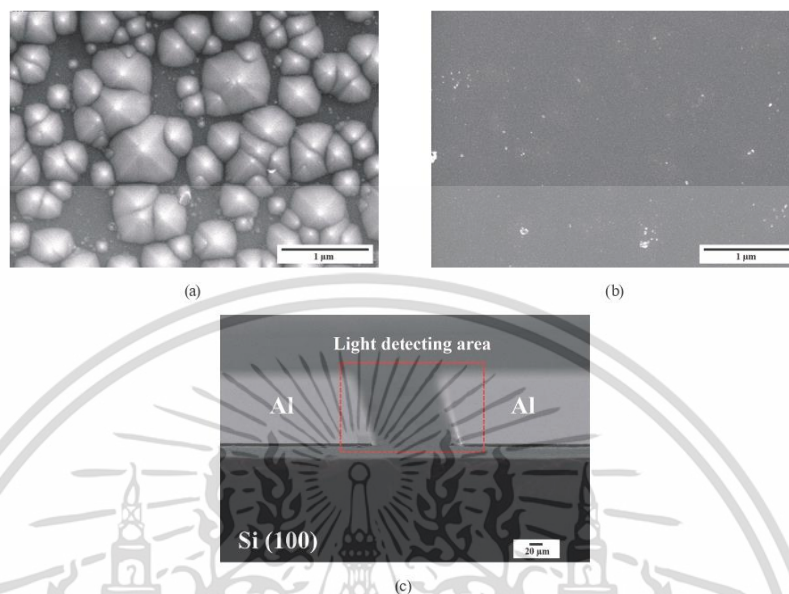


Fig. 6. (Color online) SEM images of the silicon surface after etching in (a) 5 wt.% TMAH solution and (b) dual-doped TMAH solution. (c) Cross section of a UMSM photodetector after etching in dual-doped TMAH solution.



Fig. 7. (Color online) AFM images of Si (100) surface after etching in dual-doped TMAH solution.

the oxidizer during the etching process.  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  appears to reduce the size of the bubbles that form, therefore reducing their dwell time on the silicon surface, resulting in a micromasking effect.<sup>(12,31–33)</sup> The dual-doped TMAH solution has potential use for developing photodetectors with a larger exposure area.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2 Optical and electrical characteristics of photodetector

The electrical characteristics of photodetectors with a U-grooved structure made of aluminum/n-Si/aluminum, as well as those with a wide distance between the electrodes (wide electrode gap), were investigated. We fabricated a UMSM photodetector using the anisotropic etching process. The electrical properties of the photodetector were measured under dark and illuminated conditions using halogen lamps as a light source, and the bias voltage was varied from  $-5$  to  $5$  V. A block diagram of the experimental setup is shown in Fig. 8.

The photodetector structure can be described by two back-to-back Schottky contacts. Figure 9 shows the current–voltage ( $I$ – $V$ ) characteristics of the metal–semiconductor–metal (MSM) and UMSM photodetectors. According to the results, the UMSM photodetector fabricated using a dual-doped TMAH solution had a dark current of  $0.14$   $\mu$ A, which was slightly higher than that of  $0.10$   $\mu$ A for the MSM photodetector. The photodetectors were evaluated using a halogen lamp at an illumination of  $25000$  lux. In a typical test, when a bias voltage was applied at both electrodes of the photodetector, a depletion region was formed, and at a constant voltage of  $5$  V, the depletion region extended to about  $4$   $\mu$ m. When the light-detecting area of the MSM

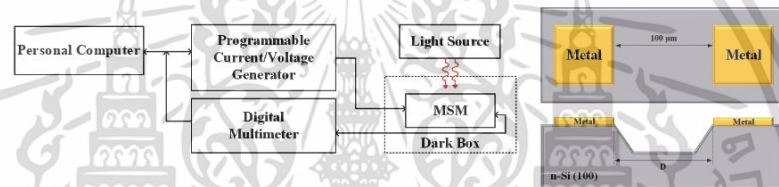


Fig. 8. (Color online) Block diagram of the experimental setup used to measure the electrical properties of the photodetector.

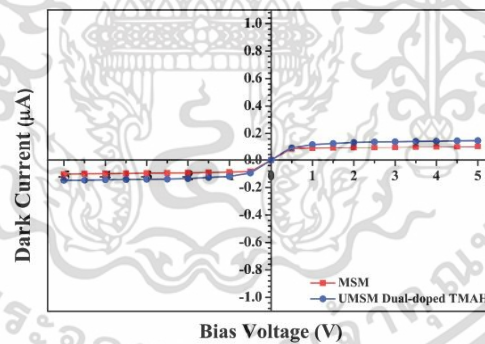


Fig. 9. (Color online) Electrical characteristics of MSM and UMSM photodetectors under non-illuminated condition.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

photodetector was exposed to light, the photocurrent was 21.51  $\mu\text{A}$  (Fig. 10). The UMSM photodetector fabricated in the dual-doped TMAH exhibited a photocurrent of 49.43  $\mu\text{A}$ , approximately twice that of the MSM photodetector. Increasing the light-detecting area in the U-grooved structure resulted in a significant increase in the photocurrent.<sup>(34)</sup>

Figure 11 shows  $I$ - $V$  plots obtained with a laser diode (wavelength 635 nm). It can be seen that the UMSM photodetector is capable of responding to direct current (DC). The dark current ( $\sim 0.14$   $\mu\text{A}$ ) is very low. The photocurrent increases with increasing incident optical power, and the photo-to-dark current ratio is approximately 500 at an incident optical power of 6 mW. The high photocurrent of the UMSM photodetector is mainly due to the large light-detecting area

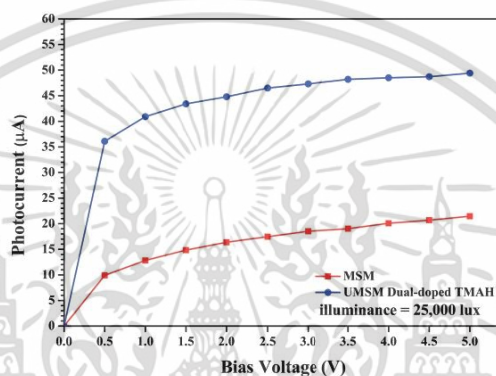


Fig. 10. (Color online) Electrical characteristics of MSM and UMSM photodetectors illuminated with light of 25000 lux.

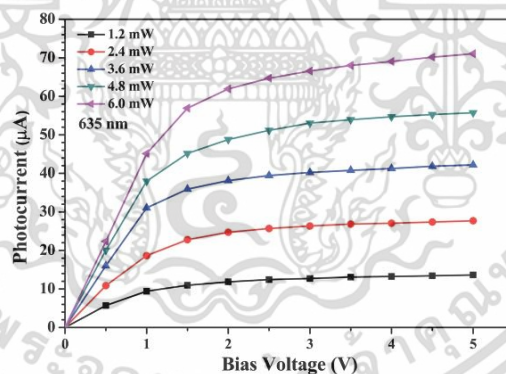


Fig. 11. (Color online)  $I$ - $V$  characteristics of UMSM photodetector fabricated in dual-doped TMAH under various incident optical powers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

resulting from the etched U-grooved structure and because the photodetector is operated under reverse bias. As previously mentioned, the U-grooved photodetector characteristics can be used as a measurement of light intensity, even when little light is incident on the photodetector.

The capacitance–voltage ( $C$ – $V$ ) curves of aluminum/n-Si/aluminum photodetectors are symmetrical, with the capacitance decreasing with increased bias voltage (Fig. 12). The total capacitance ( $C_T$ ) is equal to the sum of the capacitances of two contacts, i.e., the cathode capacitance ( $C_C$ ) under reverse bias voltage and the anode capacitance ( $C_A$ ) under forward bias voltage. At a frequency of 100 kHz and 5 V bias, the capacitance of the photodetector with the U-grooved structure was 6.76 pF, compared with 13.52 pF for the planar structure. The area lost to etching relative to the capacitance of the U-grooved photodetector is low. The capacitance is directly proportional to the diffused area and inversely proportional to the width of the depletion region. The capacitance is dependent on the reverse bias as follows:

$$C = \frac{\epsilon_s A}{\sqrt{2\epsilon_s \mu \rho (V_{bi} + V_A)}} = \frac{\epsilon_s A}{W_d}, \quad (2)$$

where  $\epsilon_s$  is the semiconductor permittivity ( $1.054 \times 10^{-12}$  F/cm),  $A$  is the photodetector area,  $\rho$  is the resistivity of silicon,  $\mu$  is the mobility of the electrons at 300 K ( $1400$  cm<sup>2</sup>/Vs),  $V_A$  is the applied bias,  $V_{bi}$  is the built-in voltage, and  $W_d$  is the width of the depletion region. The depletion width determines the capacitance of the photodetector according to this equation. The capacitance of the UMSM photodetector is decreased when the depth of the U-grooved structure is substantially eliminated after etching, which has the benefits of lower capacitance and enhanced frequency response of the UMSM photodetector.

The two photodetectors were measured at an incident optical power of 6 mW. The photocurrent corresponds to the responsivity of the photodetector  $R = (I_{photo} - I_{dark})/P_{in}$ , where  $R$  is the responsivity,  $I_{photo}$  and  $I_{dark}$  are photocurrents, and  $P_{in}$  is the incident optical power.

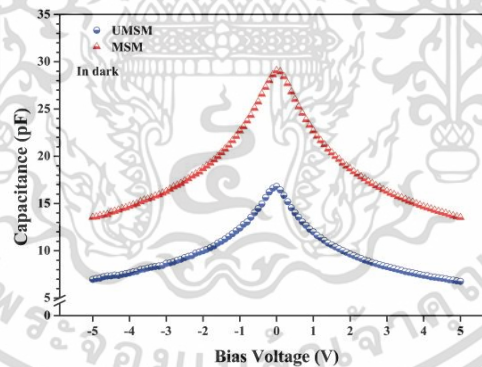


Fig. 12. (Color online)  $C$ – $V$  characteristics of MSM and UMSM photodetectors.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Figure 13 shows that the responsivity increases with increasing applied bias. The U-grooved photodetector fabricated by wet etching in dual-doped TMAH has a higher responsivity, 11.84 mA/W, at a wavelength of 635 nm than that of the MSM photodetector. The external quantum efficiency (EQE) of the two photodetectors has the same tendency as the responsivity. The EQE of the MSM photodetector was found to be 0.94% for the 635 nm incident laser. In contrast, that of the UMSM photodetector under the dual-doped TMAH condition was 2.31%, almost 2.5 times that of the MSM photodetector. The U-grooved structure photodetector exhibits a much higher performance because the large light-detecting surface area increases the number of photogenerated carriers at the surface of the U-grooved structure, preventing charge-carrier recombination.<sup>(30,35,36)</sup> Table 2 shows a comparison of the important parameters of the MSM and UMSM photodetectors. It was found that the electrical and optical properties of the UMSM photodetector were superior to those of the MSM photodetector of the same size: at an incident optical power of 6 mW, the UMSM photodetector had a photocurrent of 71.05  $\mu\text{A}$ , approximately 2.5 times more than that of the MSM photodetector (28.92  $\mu\text{A}$ ). The key advantages of UMSM photodetectors include higher photocurrent and responsivity, lower capacitance, and greater light-detecting area than those of a conventional MSM photodetector. These results suggest that this new U-grooved photodetector has potential use in optical electronics.

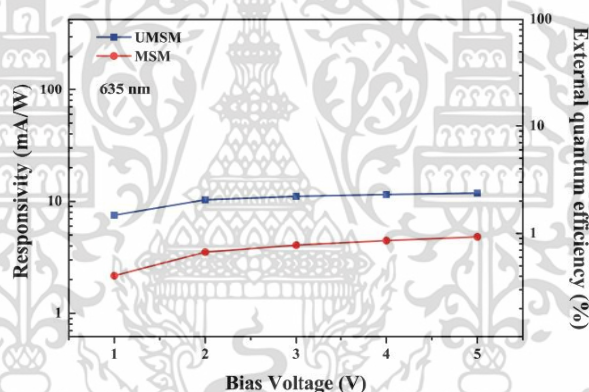


Fig. 13. (Color online) Dependence of maximum responsivity and EQE of MSM and UMSM photodetectors on external bias.

Table 2  
Characteristics of MSM and UMSM photodetectors at bias voltage of 5 V.

Structure of photodetector	Dark current ( $\mu\text{A}$ )	Photocurrent ( $\mu\text{A}$ )	Capacitance (pF)	Responsivity (mA/W)	EQE (%)
MSM	0.10	28.92	13.52	4.82	0.94
UMSM	0.14	71.05	6.76	11.84	2.31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4. Conclusions

An experimental study on silicon surface etching by an anisotropic wet chemical process in TMAH etchant was carried out. The nanostructure in a U-grooved photodetector based on Si (100) was successfully fabricated with a smoothness of about 11.1 nm in a mixture of TMAH solution and silicic acid with 11.5 g/l  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  added (dual-doped TMAH), without the etching of the aluminum electrodes. In terms of electric properties, the photocurrent of the UMMSM photodetector was 59% (~2.5 times) more than that of the MSM photodetector under 635 nm laser illumination. The capacitance of the U-grooved structure etched with a dual-doped TMAH solution was about twice that of the planar structure. The structural design inside the light-detecting area has the potential to further improve the optical response of the photodetector by creating the U-grooved interdigitated structure.

#### Acknowledgments

This work was supported by King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang under Scholarship Number KDS 2019/017. We would like to thank the Thai Microelectronics Center (TMEC) for the silicon wafer fabrication and the Electronics Research Center (ERC) for providing the laboratory for this research.

#### References

- 1 J. A. Dziuban and R. Walczak: *Sens. Mater.* **13** (2001) 41.
- 2 H. H. Lee, S.-H. Jo, M. Bae, B.-S. Choi, J. Kim, H.-K. Lyu, and J.-K. Shin: *Sens. Mater.* **27** (2015) 135.
- 3 H. Chen, M. Xue, Z. Mei, S. B. Oetomo, and W. Chen: *Sensors* **16** (2016) 1. <https://doi.org/10.3390/s16122134>
- 4 J.-J. Tsaur, S.-I. Yang, C.-H. Du, Z. Lin, C.-T. Huang, and C.-K. Lee: *J. Micromech. Microeng.* **4174** (2000) 142. <https://doi.org/10.1117/12.396424>
- 5 K. Biswas, S. Das, D. K. Maurya, S. Kal, and S. K. Lahiri: *Microelectron. J.* **37** (2006) 321. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2005.05.013>
- 6 S.-H. Seo, K.-D. Kim, M.-W. Seo, J.-S. Kong, J.-K. Shin, and P. Choi: *Sens. Mater.* **19** (2007) 435.
- 7 K. Suttijalern, J. Prabket, R. Muanghlua, and S. Niemcharoen: *Proc. 7th Int. Electrical Engineering Congr. (IEECON, 2019)*. 61. <https://doi.org/10.1109/IEECON45304.2019.8939006>
- 8 V. Karanassios and G. Mew: *Sens. Mater.* **9** (1997) 395.
- 9 S. D. Hutagalung and K. C. Lew: *Proc. 2010 IEEE Int. Conf. Semiconductor Electronics (IEEE, 2010)* 358. <https://doi.org/10.1109/SMELEC.2010.5549507>
- 10 O. Tabata, R. Asahi, H. Funabashi, K. Shimaoka, and S. Sugiyama: *Sens. Actuators, A* **34** (1992) 51. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(92\)80139-f](https://doi.org/10.1016/0924-4247(92)80139-f)
- 11 U. Schakenberg, W. Benecke, and P. Lange: *Proc. 1991 Int. Conf. Solid-State Sensors and Actuators. Digest of Technical Papers (1991)* 815. <https://doi.org/10.1109/SENSOR.1991.149008>
- 12 K. Biswas, S. Das, D. K. Maurya, S. Kal, and S. K. Lahiri: *Microelectron. J.* **37** (2006) 321. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2005.05.013>
- 13 J. T. L. Thong, W. K. Choi, and C. W. Chong: *Sens. Actuators, A* **63** (1997) 243. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(97\)80511-0](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(97)80511-0)
- 14 K. Suttijalern, J. Prabket and S. Niemcharoen: *Proc. The 2018 IAENG Int. Conf. Engineering Physics (2018)* 76.
- 15 D. Cheng, M. A. Gosálvez, T. Hori, K. Sato, and M. Shikida: *Sens. Actuators, A* **125** (2006) 415. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sna.2005.08.022>
- 16 G.-S. Chung, W.-J. Lee, and J.-S. Song: *Sens. Mater.* **12** (2000) 221.
- 17 K. Biswas and S. Kal: *Microelectron. J.* **37** (2006) 519. <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2005.07.012>
- 18 S. B. Lee and D. Babić: *J. Electrochem. Soc.* **146** (1999) 4213. <https://doi.org/10.1149/1.1392616>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 19 M. Sasaki, T. Fujii, and K. Hane: *Sens. Mater.* **15** (2003) 083.
- 20 J.-H. Kim, Y.-M. Jung, Y.-J. Cho, J.-W. Kim, Y.-C. Kim, H.-I. Seo, K.-H. Kim, and M. Ishida: *Sens. Mater.* **18** (2006) 125.
- 21 B. K. Sivertsex and H. Serrum: *J. Micromech. Microeng.* **130** (1969) 449. <https://doi.org/10.1524/zkri.1969.130.1-6.449>
- 22 M. A. Gosalvez, A. S. Foster, and R. M. Nieminen: *Sens. Mater.* **15** (2003) 053.
- 23 O. Tabata: *Sens. Actuators, A* **53** (1996) 335. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(96\)80157-9](https://doi.org/10.1016/0924-4247(96)80157-9)
- 24 J.-J. Tsaur, C.-H. Du, and C. Lee: *Sens. Actuators, A* **92** (2001) 375. [https://doi.org/10.1016/S0924-4247\(01\)00575-1](https://doi.org/10.1016/S0924-4247(01)00575-1)
- 25 K. Suttijalern and S. Niemcharoen: *J. Micromech. Microeng.* **31** (2021) 085007. <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ac0e7e>
- 26 N. Fujitsuka, K. Hamaguchi, H. Funabashi, E. Kawasaki, and T. Fukada: *R&D Review of Toyota CRDL* **39** (2004) 34.
- 27 D. Chen, S. Liu, J. Liang, X. W. Hou, B. Guo, S. L. Yang, and H. Lv: *J. Nanoeng. Nanosyst.* **229** (2015) 136. <https://doi.org/10.1177/1740349914528689>
- 28 E. H. Klaassen: *Micromachined Instrumentation Systems* (Stanford University, California, 1996) Chap. 2.
- 29 U. Schnakenberg, W. Benecke, and B. Löchel: *Sens. Actuators, A* **23** (1990) 1031. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(90\)87084-V](https://doi.org/10.1016/0924-4247(90)87084-V)
- 30 J.P. Kar, G. Bose, S. Tuli, A. Dangwal, and S. Mukherjee: *J. Mater. Eng. Perform.* **18** (2009) 1046. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9350-1>
- 31 D. Resnik, D. Vrtacnik, U. Aljancic, and S. Amon: *J. Micromech. Microeng.* **13** (2003) 26. <https://doi.org/10.1088/0960-1317/13/1/304>
- 32 K. Suttijalern, J. Prabket, and S. Niemcharoen: *Proc. Int. MultiConf. Engineers and Computer Scientists* (2019) 330.
- 33 J. Garra, S. Brida, L. Ferrario, and M. Paranjape: *Sens. Mater.* **13** (2001) 351.
- 34 W.-R. Lee, H. Ko, D.-I. "Dan" Cho, K.-I. Koo, and J.-M. Seo: *Sens. Mater.* **27** (2015) 465. <https://doi.org/10.18494/SAM.2015.1084>
- 35 J.-S. Huang, K.-W. Lee, C.-Y. Huang, and S.-F. Wang: *Sens. Mater.* **30** (2018) 925. <https://doi.org/10.18494/SAM.2018.1795>
- 36 K.-T. Liu, S.-J. Chang, and S. Wu: *Sens. Mater.* **29** (2017) 363. <https://doi.org/10.1007/s11665-008-9350-1>

#### About the Authors



**Kamonwan Suttijalern** received her B.S. and M.S. degrees from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 2016 and 2018, respectively. Since 2018, she has been studying toward a Ph.D. degree at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. Her research interests are silicon photodetectors and semiconductor fabrication processes. (ksuttijalern@gmail.com)



**Surasak Niemcharoen** received his B.S. degree from Chiang Mai University, Thailand, in 1985 and his M.S. and Ph.D. degrees from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand, in 1992 and 2004, respectively. Since 2015, he has been an associate professor at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. His research interests are in sensors, MEMS, CMOS technology, and MSM photodetector fabrication processes. (surasuk.ni@kmitl.ac.th)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**EEAAT**

**M**

# *i*EECON2019

The 7<sup>th</sup> International Electrical Engineering Congress  
6 - 8 March 2019, **Cha-am, Thailand**

Conference Program and Abstract Book

Power & Energy  
Communications  
Electronics & Control  
Digital Signal Processing  
Computer & IT

Organized by

**M** **EEAAT**

Technical Sponsored by

**IEEE**  
THAILAND SECTION

Supported by

**NBTC**

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Tetramethyl Ammonium Hydroxide Etchant Improvement for Aluminum Passivation and Smooth of Silicon Surface

Kamonwan Suttijalern  
Department of Electronics  
Engineering, Faculty of  
engineering  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang Bangkok  
Thailand  
ksuttijalern@gmail.com

Jirawat Prabket  
Thai Microelectronics Center  
(TMEC)  
Wangtakien District, Amphur  
Muang, Chachoengsao, Thailand  
praket@necac.or.th

Rangson Muanghlua  
Department of Electronics  
Engineering, Faculty of  
engineering  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang Bangkok  
Thailand  
rangson.mu@kmitl.ac.th

Surasak Niemcharoen  
Department of Electronics  
Engineering, Faculty of  
engineering  
King Mongkut's Institute of  
Technology Ladkrabang Bangkok  
Thailand  
surasak.ni@kmitl.ac.th

**Abstract**— This paper purpose to the structural design and improvement of etchant solution for U-shaped Metal-Semiconductor-Metal (UMSM) photodetector fabrication on Al/n-Si/Al with anisotropic wet etching technique, the etchant solutions include tetramethylammonium hydroxide (TMAH), ammonium persulfate (AP) and silicic acid with different concentrations. Experimental design of photodetector structure to optimize the photodetector and improvement conditions of the etching solution by adding AP and silicic acid into the TMAH solution to increase the silicon surface roughness and reduce the rate of etching aluminum as electrodes. For structural design experiments, increasing the exposure area on the U-shaped groove up to 1.73 times. The results from the addition of AP to TMAH solution showed that the silicon surface is smoothness. It has a highest silicon etching rate and the addition of silicic acid to TMAH solution can reduce aluminum and silicon dioxide etching rate. Therefore, this research has the effective condition is 5 wt% TMAH with 7 g/l AP and 34 g/l silicic acid added. The results show the silicon surface has smooth about 5 nm and high silicon etch rate including etching aluminum equal to 0.26  $\mu\text{m/hr}$  that suitable for design photodetector in further research.

**Keywords**— photodetector, anisotropic etching, aluminum passivation, oxidizing agent, smoothness surface

## I. INTRODUCTION

In present, the semiconductor technology has come to the important role in the industrial fields such as the chemical industry, the electronics industry and the energy industry. The photodetector is an electronic device, which acts as the signal receiver by converting the light signal to the electrical signal and also sending the signal to processing. This device is interesting because it has a complicated structure, compatible with the integrated circuit, low capacitance also highly stable and high-speed photosensitivity. The photocurrent mechanism in the depletion region on the cathode as shown in figure 1, when the light detecting area, there is more photon energy than energy gap will stimulate electron-hole pair in the depletion region and the electric field activated the carrier to provide the photocurrent.

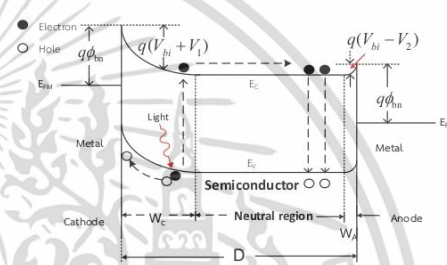


Fig. 1. Schematic energy level diagram for the Al/n-Si/Al photodetector.

This device has been developed continuously with

the design structure of U-shaped metal-semiconductor-metal (UMSM) photodetector [1]. This structure can increase

the optical performance without changing the depletion region and the distance between the electrodes by the anisotropic wet etching process. The commonly used silicon etchants such as ethylene diamine pyrocatechol (EDP) is a diamine based silicon etchant, which has moderate silicon etching rate and partly CMOS compatible but EDP was hazardous and require special safety, potassium hydroxide (KOH) is a non-toxic and provides high silicon etch rate also high degree of anisotropy. KOH is not compatible with CMOS because of the presence of alkali metal ions [2,3]. Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) is popularity but, it has a high cost and complex setup because it is a non-toxic and compatible with CMOS process also organic solution, which has a moderately high silicon etch rate. This research presents about the addition of ammonium persulfate and silicic acid into TMAH solution to reduce the surface roughness and reduce aluminum and silicon dioxide etching rate respectively improve passivation quality of the aluminum electrode and optimized performance of the photodetector.

II. EXPERIMENTAL

On the fabrication of UMSSM photodetector with Al/n-Si/Al on 5-10 Ω-cm, 625 μm thickness and (100) n-type silicon wafer. The fabrication consists of 6 main processes as cleaning process to eliminate organic and metal ions around silicon wafer surface. Deposition the aluminum layer with 1.5 μm of thickness by radio frequency sputtering (RF-Sputtering) and growing the silicon dioxide layer with 20,000 Å of thickness by plasma enhanced chemical vapor deposition (PECVD) process to make passivation for aluminum layer. After that, the photodetectors structure pattern has exposed with a photolithography process and removed the native oxide with 5 wt% HF solution and then, the silicon chip was washed with de-ionized water to remove out the particles.

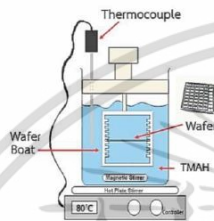


Fig. 2. The sample of equipment used in the etching process.

The etching process as shown in figure 2, etching the wafer on 5 wt% TMAH by adding 5, 6, 7 and 8 g/l also add 30, 34 and 38 g/l silicic acid by magnetic stirrer with 200 rpm on heating with 80 degrees Celsius. The depth of silicon dioxide and aluminum layers had measured by using a surface profilometer. The surface of silicon chip had observed by a scanning electron microscope (SEM).

III. RESULT AND DISCUSSION

A. Study of structural design of U-shaped photodetector

The photodetector is a device, which used to measure the intensity of light by converting light energy into electrical energy with stimulation the carrier from absorbing photon energy causing the electrical conductivity [4]. The design and fabrication of U-shaped photodetector should focus on depletion region's width because all electric field almost all electric fields across the depletion region's width, this results in photocurrent according to the bias voltage is increased. As shown in equation (1).

$$W_D = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (1)$$

Where  $\epsilon_s$  is permittivity value of semiconductor  
 $q$  is electron charge ( $1.602 \times 10^{-19}$  C)  
 $N_D$  is concentration of donor atom  
 $V_{bi}$  is built-in voltage  
 $V_A$  is bias voltage

From equation (1), when giving bias voltage at 5 V the expansion of depletion region equal to 4 μm. This value determines the depth of the U-shaped about 4 μm.

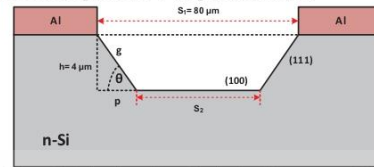


Fig. 3. The method for determining the depth of the structure U-shaped photodetector.

In figure 3, the increase of light detection could determine by a simple trigonometric equation as  $h/g = \sin\theta$  and  $p/g = \cos\theta$ . Where  $p$  is light detecting area on a planar structure,  $g$  is light detecting area on a U-shaped structure,  $h$  is a depth of etch and  $\theta$  is silicon etching angle (54.7 degrees) [5]. From the result an area of light detecting area on a U-shaped structure bigger than planar structure 1.73 times.

B. Oxidizing agent additional

The study of the etching rate and surface roughness of silicon surfaces plane (100) by using various concentration of ammonium persulfate (AP) with TMAH concentration of 5 wt% at temperature 80 degrees Celsius.

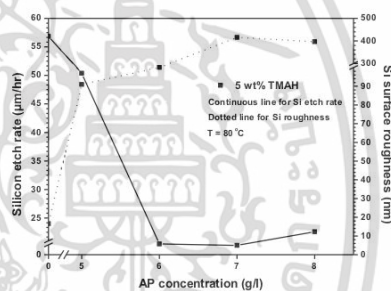


Fig. 4. Relationship between the silicon etch rate and surface roughness on planar (100) with AP concentration.

From figure 4, the mixture of 5 wt% TMAH and 7 g/l AP has highest silicon etch rate because of an increase of AP concentration on TMAH provided more of the decomposition reaction between hydrogen ion and a molecule of water and make hydrogen ion capture with the silicon atom and rise up the silicon etch rate [6]. As well as the roughness of silicon surface was lowest on 5 wt% TMAH about 5 nm. From observation shown the increasing of TMAH solution would take more roughness on the surface of silicon as the AP acted like the oxidizing agent [7]. AP will reduce the roughness on the surface after it had added more volume into etchants solution.

C. Aluminum layer protection method

The study of aluminum and silicon dioxide etch rate at pure 5 wt% TMAH with various of silicic acid (30, 34, 38 g/l) at 80 °C as shown in figure 5, the addition of silicic acid reduced the aluminum and silicon dioxide etch rate of TMAH solution. The mixture of 5 wt% TMAH and 34 g/l silicic acid gave aluminum and silicon dioxide etch rate at 0.15 μm/hr and 0.46 μm/hr respectively by compared to a pure 5 wt% TMAH the etching rate falling about 1000 times. Therefore, additional of silicic acid on appropriate volume could cover the aluminum passivation layer because the ion of hydrogen on solution do react with silicic acid more than passivation layer [8].

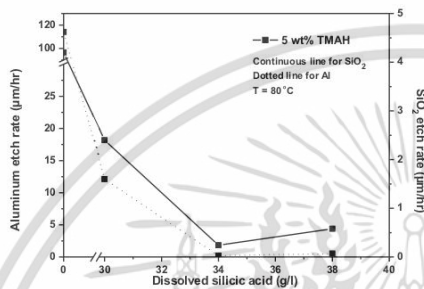


Fig. 5. Relationship between aluminum etch rate, silicon dioxide etch rate and silicic acid concentration.

The study of the depth of silicon wafer from the etching rate of silicon that varies on etching time. The pure 5 wt% TMAH has added with 34 g/l silicic acid. Figure 6, the depth of silicon and etching time have directly risen. This result showed the additional silicic acid could reduce the etching rate because the hydroxide ion reacted with silicic acid that might give from bonding of silicic acid lower than a silicon wafer. Therefore, the hydroxide ion possible to capturing with silicic acid than silicon wafer [9] and reduce the silicon etch rate.

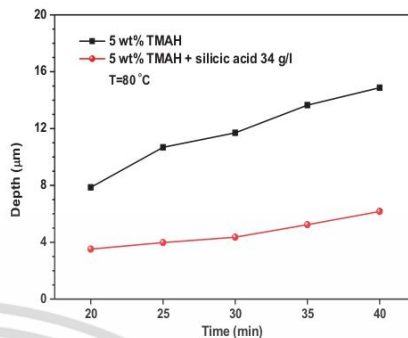


Fig. 6. Relationship between depth of silicon surface and time.

D. The effect of dual doped TMAH solution

The study about the effect of dual doped TMAH (Addition with AP and silicic acid) consists of 5 wt% TMAH with 34 g/l silicic acid and 7 g/l AP for observing silicon surface, the silicon and aluminum layer etch rate. From the result found the silicon wafer after etched with all conditions and observed with SEM. The silicon surface on dual doped TMAH etch giving highest sharpness about 7 times by compared with single doped with silicic acid as shown in figure 7.

The roughness of silicon surface coming with the rising of pyramid structure aka. Hillock that provided from hydrogen bubble as micro-masking on the silicon surface [10-12] and made etched silicon surface turn into a random pyramid structure. From table 1 shown the surface roughness and etching rate of various condition, the roughness of dual doped TMAH higher than AP single doped about 17.9 nm and lower than silicic acid single doped 7 times and obtained silicon etch rate at 8.40 μm/hr. The dual doped TMAH giving etching rate about 5 times (43.8 μm/hr).

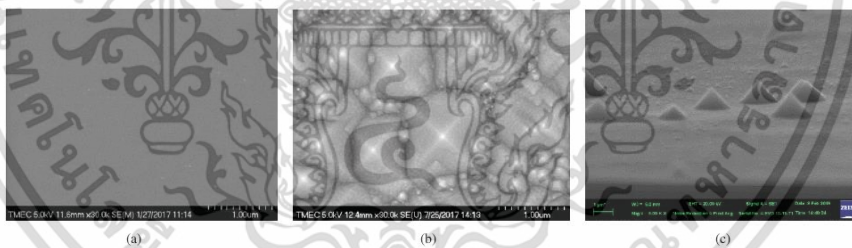


Fig. 7. SEM of (100) silicon surface at 80 degrees Celsius.

- (a) 5 wt% TMAH with 7 g/l AP doped
- (b) 5 wt% TMAH with 34 g/l silicic acid doped
- (c) 5 wt% TMAH with dual doped (7 g/l AP and 34 g/l silicic acid)

TABLE I. SILICON, SILICON DIOXIDE, ALUMINUM ETCH RATE AND SURFACE ROUGHNESS ON VARIOUS CONDITIONS

Parameters	Conditions		
	5 wt% TMAH doped 7g/l AP	5 wt% TMAH doped 3g/l silicic acid	Dual doped TMAH
Silicon etch rate ( $\mu\text{m/hr}$ )	56.65	8.40	43.80
SiO <sub>2</sub> etch rate ( $\mu\text{m/hr}$ )	4.89	0.46	0.57
Aluminum etch rate ( $\mu\text{m/hr}$ )	91.20	0.15	0.26
Silicon surface roughness (nm)	5.00	161.30	22.90

From the study on a dual doped TMAH solution with aluminum and silicon dioxide found a bit increasing of etching rate by compared to the single doped with silicic acid and giving highest increase etching rate of single doped with AP about two orders of the aluminum etch rate and one order of silicon dioxide etch rate.

#### IV. CONCLUSION

An experimental study of structural design found the U-shaped structure could increase the light detecting area about 1.73 times. The study of improving the solution found the mixture of TMAH and AP giving the smooth surface of silicon and highest silicon etch rate also the aluminum electrode and the addition with silicic acid found the reduction of etch rate but obtain the highest roughness with a random pyramid structure. On dual doped TMAH, the silicon etch rate not decrease but provided the smooth surface than silicic acid. Therefore, the dual doped TMAH appropriate to use on photodetector fabrication or improve method in the future.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge Thai Microelectronics Center (TMEC) and the Department of Microelectronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (Bangkok, Thailand) for the laboratory to carry out this research.

#### REFERENCES

- [1] K. Suttijaler, "Photocurrent Enhancement of UMSM Photodetector by Increase Random Pyramid Size with TMAH Doped Silicic Acid," Dept. Elect. Eng., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (in Thai), 2018.
- [2] K. Biswas and S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon", *Microelectronics Journal*, Vol. 37, 519-525 (2006).
- [3] K. Biswas, S. Das, et al., "Bulk micromachining of Silicon in TMAH-Based Etchants for Aluminum Passivation and Smooth Surface", *Microelectronics Journal*, Vol. 37, 321-327 (2006).
- [4] S. Niumcharoen, "Metal and Semiconductor Contacts", 1st Edition, Faculty of Engineering KMUTT (in Thai), 19-39 (2015).
- [5] 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.
- [6] T. Jarpn, K. Sutticharoen and S. Niumcharoen "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.
- [7] Dong Chen, ShiBin Liu, et al., "Research on increasing Silicon Etch Rate in Deep Wet Etching with Tetramethyl Ammonium Hydroxide Etchant", *Nanoengineering and Nanosystems*, Vol. 229(3), 136-140 (2015).
- [8] K. Suttijaler, 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.
- [9] Nestor Gabriel Gonzalez-Pereyra, "Anisotropic Etching of Monocrystalline Silicon Under Subcritical Conditions", *Clemson University*, April 2015.
- [10] 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.
- [11] G. Westwood and C-P. S. Hsu, "Reduced Anisotropy in Tetramethylammonium Hydroxide Based Silicon Etchants", *The Electrochemical Society*, Vol.2, pp. 243-247 (2017).
- [12] 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.

**Lecture Notes in Engineering and Computer Science**

**IMECS 2019**

International MultiConference of  
**Engineers and Computer  
 Scientists 2019**

Volume II

**Hong Kong  
 14-16 March, 2019**

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

# The U-Shaped Photodetector Structure Optimization by Increase Random Pyramid Size

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

**Abstract**—This paper purpose the fabrication method of U-shape metal-semiconductor-metal structure photodetector with Al/n-Si/Al materials on anisotropic wet etching. In this paper studied on 20 wt% of potassium hydroxide (KOH) and 5 wt% of Tetramethylammonium hydroxide (TMAH:  $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ ) and mixed with 34 g/l silicic acid also heating with 80 degrees Celsius. From the experiment found the best condition for fabricating the photodetector is the experiment, which uses the mixture of TMAH solution and silicic acid because it obtained the lowest aluminum layer etch rate and no alkaline ion or contaminant on a surface that able to apply with the integrated circuit. Moreover, this mixture gave a large amount of random pyramid structure on the surface also more than fabricate with KOH solution and made the light responsibility on 25,000 lux more than KOH model about 1.3 times. This result shown the big pyramid provide the light reflection lower than small pyramid that takes many effects to light absorption and photocurrent and controls the transducing performance of a photodetector.

**Keywords** — Random pyramid, Aluminum passivation, Wet anisotropic, Silicic acid, U-shaped photodetector

## I. INTRODUCTION

THE evolution of the electronics technology is advanced and continuous development from past to present. The semiconductor device has an influence on the daily life of human such as the communication equipment like cell phone also the computer and many of communication device. Therefore, the development has focused on the fastest data communication media. The device that can be the fastest media is a photodetector. This device has good light responsibility, fast switching and low noise on operating also compatible with the integrated circuit. The photodetector has any type such as p-n photodetector, p-i-n photodetector (PIN Diode), Avalanche photodetector and M-S photodetector. The author interested in MSM photodetector that obtains good responsibility with low light intensity.

Manuscript received January 08, 2019; revised January 16, 2019.

Kamonwan Suttijalem 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: ksuttijalem@gmail.com).

Jirawat Prabket was with Thai Microelectronics Center (TMEC), Wangtakhien District, Amphur Muang, Chachoengsao, Thailand (e-mail: jirawat.prabket@nectec.or.th).

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

ISBN: 978-988-14048-5-5

ISSN: 2078-0958 (Print); ISSN: 2078-0966 (Online)

IMECS 2019

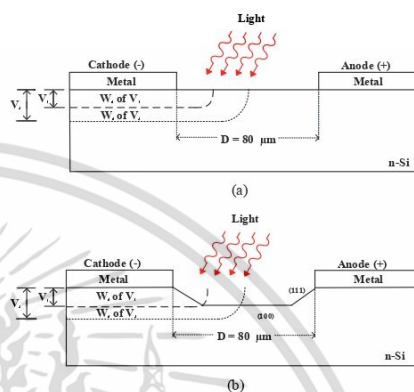


Fig. 1. The photodetectors on unilluminated and bias voltage:

- (a) The planar photodetector.  
(b) The U-shape metal-semiconductor-metal (UMSM) photodetector.

Normally, the MSM photodetector (planar structure) has the same process to the CMOS fabrication as shown in Fig. 1(a). However, the study found another structure that is light performance improvable, a device has a U-shape structure as shown in Fig 1(b). In this paper purpose The photodetector structure improvement by using anisotropic wet etching method to provide a U-shape structure that always uses in electrical mechanical or MEMS [3]. This method used KOH and TMAH to etching the surface of silicon and make random pyramid structure also reduce reflection on the surface and increase the light effect and the silicic acid also used because it was reduced aluminum etch rate [4] without effect to silicon etch rate on other planes. This ability uniformed a surface of silicon to be a random pyramid structure.

## II. EXPERIMENTAL

The (100) single crystalline n-silicon substrate with 5-10  $\Omega \cdot \text{cm}$  and 625  $\mu\text{m}$  of thickness have used to study on various anisotropic wet etching methods. On preparation process growing an aluminum layer with 1.5  $\mu\text{m}$  of thickness by using RF-sputtering technic then growing 2  $\mu\text{m}$  thickness of the silicon dioxide layer with plasma-enhance chemical vapor deposition (PE-CVD) process after that make the texture of photodetector on a surface with photolithography process and the last step cleaning the native oxide on a surface with etching process on 5 wt% hydrofluoric acid and washing with de-ionized water (DI water).

The silicon surface etching process with 20 wt% KOH, pure 5 wt% TMAH and mixture of 5 wt% TMAH and 34 g/l silicic acid with 80 degrees Celsius heating. On etching process should be stirring continuously with a magnetic stirrer with 200 rpm in the enclosure such as beaker that makes temperature steady.

In the measurement process measuring a depth of roughness on a surface of silicon with Tencor P-10 surface profilometer then analysis with scanning electron microscope (SEM) and testing the electrical and photo characteristics of a photodetector structure.

### III. RESULT AND DISCUSSION

#### A. Random Pyramid Structure On Silicon Surface Analysis

In this topic, a study of the silicon surface after etched by the anisotropic wet etching process to observe pyramid structure on the surface of silicon also observe distribution pattern of the pyramid structure. The sample silicon dies has 4  $\mu\text{m}$  depth from a surface by etching on 30 minutes with 20 wt% KOH, pure 5 wt% TMAH and mixture of 5 wt% TMAH and 34 g/l silicic acid. The result of this study show in figure 2 by used SEM with 10,000 times magnify.

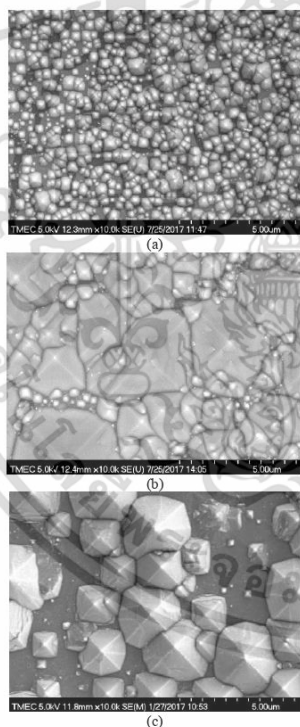


Fig. 2. The surface of (100) silicon photodetector at 80 °C SEM photograph.  
(a) Pure TMAH solution  
(b) Mixture of TMAH and silicic acid  
(c) KOH solution

From the analysis with SEM in Fig 2(a) found size of pyramid base area, pure TMAH equal to 0.60  $\mu\text{m}$ , the mixture of TMAH and silicic acid equal to 3.88  $\mu\text{m}$  (54.7 degrees of angle) and KOH equal to 4.60  $\mu\text{m}$  (45 degrees of angle) as shown in figure 2(c) from these result can calculate with equation (1).

$$h = \left(\frac{w}{2}\right) \tan \theta_1 \quad (1)$$

Where h is a pyramid height

W is base of a pyramid

$\theta_1$  is angle from anisotropic etching

From calculated found a mixture of TMAH and silicic acid provided a height of pyramid about 2.73  $\mu\text{m}$  that more than KOH about 1 time. This result showed an addition of silicic acid increased the roughness on a surface of silicon also raised the density of the pyramid caused by hydrogen bubble, which produced by the dissociation of water [5].

#### B. Silicon Etch Rate

The analysis on the surface profilometer found the result as shown in figure 3. The pure TMAH condition provided etch rate more than the mixture of TMAH and silicic acid. In figure 4 shown the etch rate of 20 wt% KOH, which higher than TMAH solution because the silicic acid will decrease the etch rate on silicon by lowering the hydroxide ion on the solution [6] including the bond strength of silicon that makes a silicon structure difficult to separate.

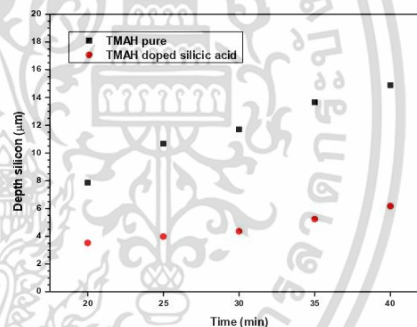


Fig. 3. The relationship between a depth of silicon and time after etch by 5 wt% TMAH and mixture.

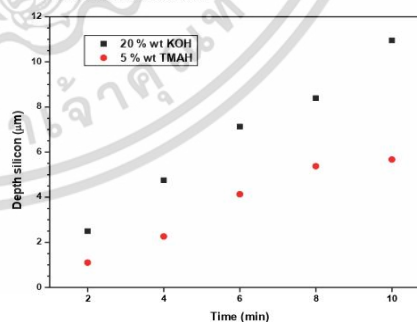


Fig. 4. The relationship between a depth of silicon and time after etch by 20 wt% KOH and 5 wt% TMAH.

### C. Aluminum Etching Analysis

From considered in figure 5 found the aluminum layer that etched with KOH and pure TMAH in 30 minutes and the mixture of TMAH and silicic acid in 1 hour, provided the aluminum etch rate 2.6  $\mu\text{m}/\text{min}$ , 1.9  $\mu\text{m}/\text{min}$  and 0.0023  $\mu\text{m}/\text{min}$  respectively.

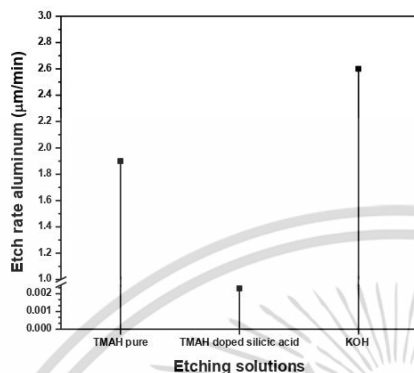


Fig. 5. The relationship between aluminum etch rate and etchant.

From the experiment found the mixture has the lowest etch rate than pure TMAH about 800 times because of the silicic acid, in case of a combine with hydroxide of TMAH, there would be decrease hydroxide ion and lowering alkaline in TMAH and falling the aluminum etch rate to less than pure TMAH and KOH that has  $\text{pH} > 13$  [7,8].

TABLE I  
THE COMPARISON OF PHYSICALS AND CONDITIONS

Etchant	Silicon etch rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Aluminum etch rate ( $\mu\text{m}/\text{min}$ )	Silicon roughness ( $\mu\text{m}$ )	CMOS Comp.
TMAH pure	0.68	1.9	0.42	Yes
TMAH doped silicic acid	0.15	0.0023	2.73	Yes
KOH	1.18	2.6	2.34	No

In table 1 found the pure TMAH was not left alkaline ion or contaminate that different to KOH, this solution left the potassium ion (positive ion) [9] on the surface on material even though it has no effect to etching but the ion of potassium decrease the electrical performance that no need on the integrated circuit fabrication process.

### D. I-V characteristics of photodetectors during non-illuminated

This experiment has biased the photodetector with -10 V to 10 V (DC) to provide the I-V characteristics of photodetectors. From the results found the planar (MSM) structure and UMSM structure with 10 V biased as shown in

figure 6. The lowest dark current was (MSM) and UMSM etched with KOH gave highest, which more than etched by mixture (TMAH+silicic acid) about 1.1 times. The dark current of KOH came with the potassium ion on the surface of silicon after done etch process.

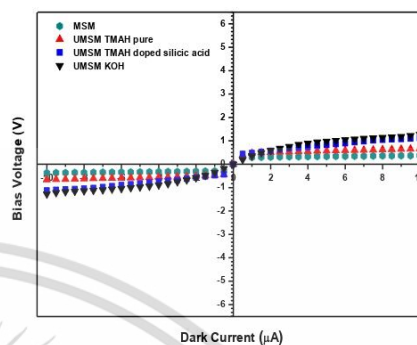


Fig. 6. The electrical characteristics of planar and UMSM photodetectors on non-illuminated.

### E. I-V characteristics of photodetectors during illuminated

In this experiment present the light responsibility of photodetectors by illuminate the structure with 25,000 lux and biased with 0 V to 10 V (DC) as shown in figure 7. The results found the planar (MSM) provide a photocurrent equal to 23.9  $\mu\text{A}$  and UMSM structure, which etched by pure TMAH, KOH and mixture obtained 42.5  $\mu\text{A}$ , 50.8  $\mu\text{A}$  and 64.1  $\mu\text{A}$  respectively. The photocurrent of photodetector that etched with mixture more than etched with KOH because the density of random pyramid and surface roughness of silicon improve the light detecting area of a photodetector. This result shown the big pyramid provide the light reflection lower than small pyramid that takes many effects to light absorption and photocurrent and controls the transducing performance of a photodetector.

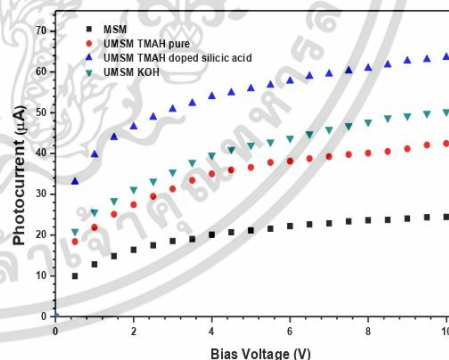


Fig. 7. I-V of planar and UMSM photodetector on illuminated with 25,000 lux.

#### IV. CONCLUSION

This paper purpose the silicon surface etching to provide the biggest random pyramid structure and studies on the aluminum layer etching also silicon etch rate to fabricate the UMSM photodetector on Al/n-Si/Al by using potassium hydroxide (KOH) Tetramethylammonium hydroxide (TMAH) with additional of silicic acid. The results found on 5 wt% TMAH with 34 g/l silicic acid obtained the roughness height about 2.73  $\mu\text{m}$  and aluminum etch rate about 0.0023  $\mu\text{m}/\text{min}$ . The highest silicon etch rate about 1.18  $\mu\text{m}/\text{min}$  by etched with 20 wt% KOH. From the results of electrical characteristics on unilluminated, the dark current was high and illuminated the photocurrent varied with the light intensity that shown the fabricated photodetector can response the light. This paper was the starting point for research and development also optimized performance of the photodetector in the future.



**Kamonwan Suttijalerl** received the master's degree in microelectronics engineering from King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok in 2018. Currently, she studies the Ph.D. degree in electrical engineering at King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok. Her current interests include Photodetector structures design, improve and technology of semiconductor fabrication process.



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

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge Thai Microelectronics Center (TMEC) and the Department of Microelectronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (Bangkok, Thailand) for the laboratory to carry out this research.

#### REFERENCES

- [1] S. Numcharoen, "Metal and Semiconductor Contacts," 1<sup>st</sup> Edition, Faculty of Engineering KMUTL (in Thai), 19-39 (2015).
- [2] K. Suttijalerl, "Photocurrent Enhancement of UMSM Photodetector by Increase Random Pyramid Size with TMAH Doped Silicic Acid," Dept. Elect. Eng., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang (in Thai), 2018.
- [3] T. Jampen, K. Sutticharoen and S. Niemcharoen "Enhancement Efficiency of UMSM Photodetectors by Doping AP and IPA in TMAH Solutions for Fabrication Process," *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Vol. 2, March 2018, pp. 727-730 [26<sup>th</sup> Hong Kong].
- [4] K. Suttijalerl, J. Prabket and S. Niemcharoen "Study of UMSM Photodetectors Fabrication Technique by Silicic Acid Added in TMAH Solution," *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists*, Vol. 2, March 2018, pp. 761-764 [26<sup>th</sup> Hong Kong].
- [5] 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.
- [6] Dong Chen, ShiBin Liu, et al., "Research on increasing Silicon Etch Rate in Deep Wet Etching with Tetramethyl Ammonium Hydroxide Etchant," *Nanoengineering and Nanosystems*, Vol. 229(3), pp. 136-140 (2015).
- [7] K. Biswas, S. Das, et al., "Bulk micromachining of Silicon in TMAH-Based Etchants for Aluminum Passivation and Smooth Surface," *Microelectronics Journal*, Vol. 37, pp. 321-327 (2006).
- [8] K. Biswas and S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon," *Microelectronics Journal*, Vol. 37, pp. 519-525 (2006).
- [9] 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.

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ
วัน เดือน ปีเกิด	30 มีนาคม 2536
ที่อยู่	28 หมู่ 9 ตำบลหนองกรด อำเภอเมืองนครสวรรค์ จังหวัดนครสวรรค์ 60240
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง พ.ศ. 2561 วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรม- ไมโครอิเล็กทรอนิกส์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1. เทคโนโลยีสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2. ตัวตรวจจับแสง (Photodetector)
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	1. ทุนการศึกษาจากกองทุนวิจัยและกองทุนสนับสนุนการ บริหารงานบุคคลของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง (KMITL Doctoral Scholarships)

### ผลงานทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] **Kamonwan Suttijalern**, and Surasak Niemcharoen, “ Anisotropic wet etching of a novel micro- texture structure for an Al/n- Si/ Al metal- semiconductor- metal photodetector fabrication,” Journal of Micromechanics and Microengineering, vol. 31, 2021, 085007 (12pp).
- [2] **Kamonwan Suttijalern**, and Surasak Niemcharoen, “ Smooth Surface with U- grooved Structures for Light- detecting Area of Photodetectors Using Dual- doped Tetramethyl Ammonium Hydroxide,” Sensors and Materials, Vol. 33, No. 12 (2021) 4297–4309.
- [3] **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, March, 2018, Hong Kong. Volume 2. pp. 761-764.
- [4] **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket, Rangsan Muanglue, Yutthana Jangarun and Surasak Niemcharoen “ Fabrication of UMSM Photodetectors by adding Ammonium Peroxodisulphate in TMAH solution” Proceedings of the 9th

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017), 2-4 May, 2017, pp. 532-535 (in Thai).
- [5] 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, March, 2018, Hong Kong. Volume 2. pp. 727-730.
- [6] Yutthana Jangarun, **Kamonwan Suttijalern**, Yothin Wongprasert, Jirawat Prabket and Surasak Niemcharoen “The increasing photodiode light current on UMSM structure that forming by random pyramid” Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017), 2-4 May, 2017, pp. 512-515 (in Thai).
- [7] Yutthana Jangarun, **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket, Apichada Thongrak, Rangsan Muanglue and Surasak Niemcharoen “ Structure design technique for increasing photocurrent of UMSM” Proceedings of the 9th Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017), 2-4 May, 2017, pp. 540-543 (in Thai).
- [8] **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket and Surasak Niemcharoen “The U-Shaped Photodetector Structure Optimization by Increase Random Pyramid Size” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2019, March, 2019, Hong Kong, pp. 330-333.
- [9] **Kamonwan Suttijalern**, Jirawat Prabket, Rangson Muanghlua and Surasak Niemcharoen “ Tetramethyl Ammonium Hydroxide Etchant Improvement for Aluminum Passivation and Smooth of Silicon Surface” Proceedings of IEEE 2019 7th International Electrical Engineering Congress (iEECON), Mar. 6-8, 2019, pp. 35-38.
- [10] Jidapa Vijafun, **Kamonwan Suttijalern**, Nutthaphat Thornyanadacha and Surasak Niemcharoen, “ Dark Current Reduction of MSM Photodetector by Sintering,” Proceedings of The 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST 2021), APR. 1-3, 2021, pp. 132-135.
- [11] Jidapa Vijafun, **Kamonwan Suttijalern**, Nutthaphat Thornyanadacha and Surasak Niemcharoen, “ Efficiency Increasing for MSM Photodetector by Fabrication of Random Pyramid on U-Shape and Sintering,” Proceedings of The 42nd Electrical Engineering Conference (EECON), 2019, pp. 341-344 (in Thai).