

การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al  
ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม  
INCREASING PHOTODIODE PHOTOCURRENT ON Al/n-Si/Al UMSM  
THAT FORMING BY RANDOM PYRAMID



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-043-051

การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการ  
สร้างพีระมิดแบบสุ่ม

INCREASING PHOTODIODE PHOTOCURRENT ON Al/n-Si/Al UMSM  
THAT FORMING BY RANDOM PYRAMID



T148269



ยูทธนา แจ็งอรุณ

YUTTHANA JANGAROON

เลขหมู่.....  
เลขทะเบียน 148269  
รับเดือน ปี 18 ต.ค. 2560

b.....  
f.....

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

KMITL-2017-EN-M-043-051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

INCREASING PHOTODIODE PHOTOCURRENT ON Al/n-Si/Al UMSM  
THAT FORMING BY RANDOM PYRAMID



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT  
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF  
MASTER OF ENGINEERING IN MICROELECTRONICS ENGINEERING  
FACULTY OF ENGINEERING  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG  
2017

KMITL-2017-EN-M-043-051

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2017

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม

Thesis Title Increasing Photodiode Photocurrent on Al/n-Si/Al UMSM that forming by Random Pyramid

นักศึกษา นายยุทธนา แจ้งอรุณ

รหัสประจำตัว 58601177

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2017-EN-M-043-051

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ดร.กอบศักดิ์	ศรีประภา	
รศ.ดร.วิสุทธิ	ฐิติรุ่งเรือง	
ดร.รังสรรค์	เมืองเทสือ	
ดร.นรินทร์	อดิวงศ์แสงทอง	
รศ.ดร.สุรศักดิ์	เนียมเจริญ	

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560 เวลา 13.00-15.00 น.  
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 1

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ขออนุญาต  
ฉบับตี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 12 กรกฎาคม พ.ศ. 2560

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม
นักศึกษา	นายยุทธนา แจ้งอรุณ
รหัสนักศึกษา	58601177
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

### บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม ในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปด้วยจะสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดโซคราสกี (CZ) ที่มีสภาพต้านทาน 5-10  $\Omega$ .cm หนา (100) ความหนา 625  $\mu$ m โดยใช้เทคนิคการออกแบบจากกระบวนการสร้าง MEM ให้เป็นร่องรูปด้วย ซึ่งจะมีพื้นที่ในการรับแสงมากกว่าแบบเชิงราบถึง 1.7 เท่า ในการกำหนดความลึกของร่องรูปด้วยจะถูกกำหนดโดย ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ในกระบวนการกัดจะใช้สารละลาย KOH กัดให้เกิดเป็นพีระมิตแบบสุ่ม โดยจะทำการศึกษาหาปัจจัยและเงื่อนไขที่ทำให้เกิดพีระมิตแบบสุ่มภายในร่องรูปด้วยให้ได้มากที่สุด เพื่อใช้พีระมิตแบบสุ่มในการเพิ่มพื้นที่รับแสง ผลการศึกษาทางกายภาพของโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยพบว่า ปัจจัยที่เหมาะสมที่สุดในการเกิดพีระมิตแบบสุ่มมีอยู่สามปัจจัยด้วยกันคือ ที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ที่ความเร็วรอบในการกววนสาร 200 รอบต่อนาที และปัจจัยสุดท้ายที่อุณหภูมิ 80  $^{\circ}$ C โดยใช้เวลาในการกัดให้ได้ความลึก 4-5  $\mu$ m ประมาณ 4 นาที ผลจากการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดเชิงราบและโฟโตไดโอดแบบร่องรูปด้วยที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม เพื่อหาค่ากระแสรั่วก่อนการซินเตอร์ริง ที่แรงดันไบอัส 10 V พบว่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปด้วยมากกว่าแบบเชิงราบ ประมาณ 10 เท่า เมื่อนำชิ้นงานผ่านกระบวนการซินเตอร์ริง พบว่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปด้วยมีค่าใกล้เคียงกับแบบเชิงราบ ผลจากการตรวจวัดแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปด้วยที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม โดยใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน พบว่าที่แรงดันไบอัส 10 V ความเข้มแสง 25,000 lux มีค่ากระแสแสงอยู่ที่ 51.3  $\mu$ A และมีค่ากระแสแสงมากกว่าแบบเชิงราบประมาณ 2.13 เท่า ส่วนการหาค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอด พบว่าค่าความจุไฟฟ้าลดลงเมื่อความลึกของร่องรูปด้วยมากขึ้น

Thesis Title	INCREASING PHOTODIODE PHOTOCURRENT ON Al/n-Si/Al UMSM THAT FORMING BY RANDOM PYRAMID
Student	Mr. Yutthana Jangaroon
Student ID	58601177
Degree	Master of Engineering
Program	Microelectronics Engineering
Year	2017
Thesis Advisor	Assoc. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

#### ABSTRACT

In this research has mentioned about the increasing photocurrent of Al/n-Si/Al UMSM forming random pyramid. Formation process of UMSM has designed on CZ silicon base with resistance 5-10  $\Omega$ .cm, plane (100) and thickness 625  $\mu$ m by using technique of MEM formation process for making U-shaped groove which has more photocurrent area than planar photodiode at 1.7 times. For specify U-shaped groove depth will be set by width value on depletion region. For etching process, KOH solution is used for forming random pyramid. This study will find factor and condition for forming lots of random pyramid on UMSM which use for increase photocurrent area. The study on physical result of UMSM found that the most appropriated factor to create random pyramid including with 3 factors which are solution concentration of KOH at 20 %wt, stirrer speed 200 round / minute and the last factor is temperature at 80  $^{\circ}$ C. In addition, etching time to get depth at 4-5  $\mu$ m is 4 minutes. The result from comparing photocurrent Characteristic of MSM and UMSM that formed random pyramid for finding leakage current before sintering with bias voltage at 10 V found that UMSM has leakage photocurrent more than MSM 10 times. After sample has passed sintering process found that leakage current of UMSM has near result with MSM. The result from photocurrent measurement of UMSM that formed random pyramid by using light source from halogen bulb found that bias voltage at 10 V and light intensity at 25,000 lux has photocurrent at 51.3  $\mu$ A and found photocurrent rate more than MSM at 2.13 times. For the capacitance of photodiode found that the capacitance will decrease follow by the increasing of U-shaped groove depth.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ||  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีโดยเฉพาะอย่างยิ่งความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานวิจัย ตลอดจนการอบรมสั่งสอนให้ความรู้ ทั้งเรื่องเรียนและบอกเล่าประสบการณ์เพื่อเป็นแนวทางในการเรียน การทำงานและการดำเนินชีวิต จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

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

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

ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาโท คุณวุฒิไกร คำอ่อน และคุณกมลวรรณ สุทธิเจริญ ที่ให้คำแนะนำเกี่ยวกับกระบวนการสร้างและการวิเคราะห์ผลการทดลองบางส่วน ขอขอบคุณนักศึกษาปริญญาตรี คุณฮัซซัน โต๊ะสัน คุณอภิสิทธิ์ แซ่หลิม คุณสมภพ อุ่ทอง และคุณวีระวุฒิ ทองดี ที่ช่วยเหลือทางด้านกรวัดผลการทดลองที่เป็นประโยชน์ต่อวิทยานิพนธ์เล่มนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ทุ่มเทร่างกายแรงใจ สนับสนุนข้าพเจ้าทั้งในด้านการเรียน และให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ รวมทั้งบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามทุกท่าน ที่ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือ จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำวิจัยจนกระทั่งจบการศึกษา

ยุทธนา แจ้งอรุณ

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VIII
สารบัญรูป.....	IX
รายการคำย่อ.....	XV
รายการสัญลักษณ์.....	XVI
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XVIII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	4
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	5
1.4 ขั้นตอนการศึกษา.....	6
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	6
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	7
2.1 กระบวนการกัด.....	7
2.1.1 การกัดแบบแห้ง.....	8
2.1.2 การกัดแบบเปียก.....	9
2.1.2.1 การกัดแบบเปียกลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก.....	10
2.1.2.2 โครงสร้างของซิลิคอน.....	11
2.1.3 ปฏิกริยาการกัดซิลิคอน.....	13
2.1.4 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก.....	14
2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงและการสร้างกับดักแสง.....	16
2.2.1 คุณสมบัติของกับดักแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ที่พื้นผิวไม่เรียบในแบบต่างๆ..	17
2.2.1.1 โครงสร้างลาดตายแบบพีระมิด.....	17
2.2.1.2 โครงสร้างลาดตายแบบเรขาคณิต.....	18

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และดัดแปลงอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.2.1.3 โครงสร้างลวดลายบนผิวทั้งสองด้าน .....	19
2.3 คุณสมบัติแสงและคุณสมบัติของแสง.....	20
2.3.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานทางแสง .....	22
2.3.2 การเป็นคลื่นของแสง.....	22
2.3.3 การเป็นอนุภาคของแสง .....	23
2.4 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	23
2.4.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง .....	23
2.4.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ.....	24
2.4.3 กลไกการดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล .....	25
2.5 รอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ .....	27
2.6 ตัวตรวจวัดแสงสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ .....	29
2.6.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ในสภาวะสมดุล .....	30
2.6.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋ขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	31
2.6.3 โครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักกี๋เมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบ.....	32
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง .....	36
3.1 เทคนิคการออกแบบโครงสร้างร่องรูปตัวยู .....	36
3.2 ลวดลายสำหรับการสร้างโฟโตไดโอด .....	38
3.3 กระบวนการสร้าง .....	39
3.3.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นผลึกซิลิคอน .....	39
3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม .....	40
3.3.3 กระบวนการ PE-CVD .....	40
3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	40
3.3.5 การเตรียมสารเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ .....	41
3.3.6 การเตรียมสารเคมีกัดชั้นอะลูมิเนียม.....	42
3.3.7 กระบวนการกัดพื้นผิวซิลิคอน .....	42
3.3.8 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดผิวซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยู....	42
3.3.9 กระบวนการซินเตอร์ริง .....	43

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.3.10 กระบวนการสร้าง .....	43
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	46
4.1 การศึกษาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างของโพโตไดโอด.....	46
4.2 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวของซิลิคอน.....	49
4.2.1 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยการเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของสารละลาย KOH .....	49
4.2.2 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย KOH .....	51
4.2.3 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย KOH .....	53
4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู .....	55
4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของโพโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al .....	55
แบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH .....	55
4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของโพโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al .....	59
แบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ ภายในร่องรูปตัวยู.....	59
โดยใช้สารละลาย TMAH .....	59
4.4 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโพโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al.....	60
แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู .....	60
4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al .....	60
แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	60
4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al .....	62
แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ .....	62
4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอด.....	66
โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้าง.....	66
พื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ภายในร่องรูปตัวยู	66

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.4.4 การทดสอบผลของอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นเตอริงที่มีผลต่อกระแสรั่ว..... ของโพโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู... ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	66
4.4.5 การเปรียบเทียบค่ากระแสแสงของโพโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al ..... แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู หลังผ่านกระบวนการขึ้นเตอริง .....	72
4.4.6 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโพโตไดโอดโครงสร้าง..... Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ และพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ภายในร่องรูปตัวยู.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	79
เอกสารอ้างอิง.....	83
ภาคผนวก ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์.....	91
ประวัติผู้เขียน.....	102

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 มุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของแต่ละนาบต่างๆ .....	11
2.2 ตารางแสดงสารละลายในกระบวนการกัดซิลิคอน และหน้ากากป้องกันในกระบวนการกัดที่เหมาะสม...	15
2.3 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ .....	15
3.1 การเตรียมสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการกัดพื้นผิวซิลิคอน ..... จนเกิดเป็นพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู.....	43
4.1 ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการกวานสารของสารละลาย KOH 20%wt ..... กับความกว้างของฐานพีระมิดแบบสุ่ม .....	52
4.2 ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจากสารละลาย KOH 20%wt กับความกว้างของ..... ฐานพีระมิดแบบสุ่ม .....	54
4.3 แสดงค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัส 10 V ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al ..... แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่..... ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นเตอริง 500°C.....	71
4.4 แสดงค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม .....	75
โดยใช้อุณหภูมิในการขึ้นเตอริง 500°C .....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดที่ทำการแพรร่อะตอมสารเจือแพลทินัมและไม่ได้ทำการแพรร่อะตอมสารเจือแพลทินัม (ก) ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ (ข) ในขณะที่ได้รับแสงที่ความเข้มต่างๆ ตกกระทบ.....	2
1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดของโพโตไดโอดที่ทำการแพรร่อะตอมสารเจือแพลทินัมและไม่ได้ทำการแพรร่อะตอมสารเจือแพลทินัมและทำการฉายหลังสีเอกซ์หลังจากแพรร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลทินัม (ก) ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ (ข) ในขณะที่ได้รับแสงที่ความเข้มต่างๆ ตกกระทบ.....	3
1.3 อัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยทำการเปลี่ยนแปลงการเติมผงซิลิคอนลงไปในสารละลาย TMAH.....	3
1.4 กระแสรั่วของโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการเติมผงของซิลิคอนลงไปในสารละลาย TMAH.....	4
2.1 ภาพตัวอย่างแสดงปฏิกิริยาในกระบวนการกัดแบบแห้ง.....	9
2.2 ภาพภาคตัดขวางของการเกิดการเซาะ (Under Cut).....	10
2.3 ภาพภาคตัดขวางของลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก.....	10
2.4 ซิลิคอนมีลักษณะโครงสร้างเป็น FCC (face-centered cubic) พันธะในอะตอมซิลิคอน ระบาย (100), ระบาย (111) และระบาย (110).....	12
2.5 แผนผังของพันธะซิลิคอน (ก) ระบาย (100) และ (ข) ระบาย (111).....	12
2.6 ภาพแสดงตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดแบบเปียก.....	14
2.7 ลวดลายพีระมิดที่มีการจัดเรียงตัวแบบสม่ำเสมอ (ก) ภาพตัดขวางของโครงสร้างลวดลายพีระมิด (ข) ภาพถ่ายด้านบน.....	17
2.8 ลวดลายพีระมิดแบบสุ่มบนผิวซิลิคอน.....	18
2.9 ลวดลายพีระมิดแบบเรขาคณิตทรงกรวย.....	18
2.10 ลวดลายพีระมิดแบบผิวทั้งสองด้าน.....	19
2.11 ภาพตัวอย่างลักษณะการสะท้อนแสงบนวัตถุ.....	20
2.13 ภาพตัวอย่างลักษณะการหักเหของแสง.....	21

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตเห็นาไปใช้ขอขานการคำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.14 ภาพตัวอย่างการกระจายแสงที่ตกกระทบปริซึม.....	21
2.15 กราฟความสัมพันธ์ E- k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ	
(ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง.....	24
2.16 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค.....	25
2.17 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน – โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทรีนซิค	
(ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี.....	26
2.18 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อตติย.....	28
2.19 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อตติย.....	29
2.20 โฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติยในสภาวะสมดุลความร้อน.....	30
2.21 โฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติยในสภาวะสมดุลความร้อน	
(ก) ภาพภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบเรียงราบ	
(ข) แถบพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อน.....	30
2.22 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติยเมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	31
2.23 ภาพโฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบบ....	32
2.24 ภาพโฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบบ	
(ก) ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดขณะเมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบบ	
(ข) ภาพแถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย	
เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบบ.....	32
2.25 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบ.....	34
2.26 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า – แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติย.....	35
2.27 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตติยเมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	36
3.1 ภาพภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al.....	37
3.2 ภาพการออกแบบลวดลายกระเจกต้นแบบของโฟโตไดโอด.....	38
3.3 ภาพภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ ชนิด Al/n-Si/Al.....	39
3.4 ภาพตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด.....	42
3.5 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al.....	43
3.6 ภาพตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด.....	42

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไบอัสกับค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ .....	47
4.2 ตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ชนิด Al/n-Si/Al .....	48
4.3 ภาพถ่ายจากกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงให้เห็นพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ (ก) สารละลาย KOH 10 %wt (ข) สารละลาย KOH 15 %wt (ค) สารละลาย KOH 20 %wt (ง) สารละลาย KOH 25 %wt (จ) สารละลาย KOH 30 %wt (ฉ) สารละลาย KOH 40 %wt.....	50
4.4 ภาพถ่ายจากกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงให้เห็นพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ที่อุณหภูมิ 80°C (ก) ความเร็วในการกวนสารที่ 100 rpm (ข) ความเร็วในการกวนสารที่ 200 rpm (ค) ความเร็วในการกวนสารที่ 300 rpm (ง) ความเร็วในการกวนสารที่ 400 rpm.....	52
4.5 ภาพถ่ายจากกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงให้เห็นพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20%wt (ก) อุณหภูมิ 50 °C (ข) อุณหภูมิ 60 °C (ค) อุณหภูมิ 70 °C (ง) อุณหภูมิ 80 °C (จ) อุณหภูมิ 90 °C .....	54
4.6 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์หาความลึกและความขรุขระของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) (ก) เครื่อง Surface profilometer model TENCOR P10 (ข) กราฟแสดงความลึกของโฟโตไดโอดแบบ UMSM (ค) กราฟแสดงความขรุขระ (หรือพีระมิตแบบสุ่ม) ของโฟโตไดโอดแบบ UMSM.....	55
4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับระยะเวลาที่ใช้ในการกัดด้วยความเข้มข้นสารละลาย KOH 15%wt และ 20 %wt .....	56
4.8 ภาพพื้นผิวและภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า (ก) ภาพพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt (ข) ภาพตัดขวางของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 15 %wt (ค) พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt (ง) ภาพตัดขวางของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt.....	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.9 ภาพถ่ายเปรียบเทียบการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มบนพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย KOH 20 %wt ในการกัด (ก) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 4 นาที (ข) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 10 นาที.....	58
4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวและภาคตัดขวางของซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt + IPA ในกระบวนการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000เท่าและ 5,000 เท่า.....	59
4.11 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบโพโตไดโอด เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (ก) ระบบเครื่องมือวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (ข) เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station ซึ่งอยู่ภายในกล่องป้องกันแสง.....	60
4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) และโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวสองลักษณะคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH.....	61
4.13 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ของโพโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบ (MSM) และแบบร่องรูปตัวยู (UMSM).....	62
4.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบ.....	63
4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย KOH 15 %wt ขณะรับแสงตกกระทบ.....	64
4.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ขณะรับแสงตกกระทบ.....	64

## สารบัญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt + IPA ขณะรับแสงตกกระทบบ	65
4.18 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของซีตทียีไดโอดด้านแคโทด	67
4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ	68
4.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt + IAP ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ	69
4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 15 %wt ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ	69
4.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 20 %wt ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ	70
4.23 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวสองลักษณะคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH	70
4.24 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบบ	73
4.25 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt + IAP ขณะได้รับแสงตกกระทบบ	73
4.25 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 15 %wt ขณะได้รับแสงตกกระทบบ	74

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญญรูป(ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.27 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพลีไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 20 %wt ขณะได้รับแสงตกกระทบ.....	74
4.28 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพลีไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) และโพลีไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH.....	75
4.29 แถบพลังงานของโพลีไดโอด เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับและมีแสงตกกระทบ .....	76
4.30 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโพลีไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) และโพลีไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH.....	78

## รายการคำย่อ

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$A$	คือ	พื้นที่รอยสัมผัส
$A^*$	คือ	ค่าคงตัวริชาร์ดสัน
$C$	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	กระแสคอนดัคเตอร์
$I_d$	คือ	กระแสโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$J$	คือ	ความหนาแน่นกระแส
$k$	คือ	ค่าคงที่โบสต์มันน์
$kV$	คือ	พลังงานรังสีเอกซ์
$n$	คือ	แฟคเตอร์อุคมคติ
$N_A$	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
$\chi$	คือ	อิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
$\phi_{bn}$	คือ	ความสูงกำแพงศักย์ข้อต่อตัก
$\phi_M$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_S$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$h$	คือ	ความลึกในการกัด
$f$	คือ	พื้นที่รับแสงแบบเชิงราบ
$g$	คือ	พื้นที่รับแสงของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู
$\theta$	คือ	มุมในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก
$S$	คือ	ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

## รายการคำศัพท์เทคนิค

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
การกัด	Etching
การกัดแบบเปียก	Wet etching
การกัดแบบแห้ง	Dry etching
การกัดแบบพลาสมา	Plasma etching
การกัดด้วยสารเคมีแบบแห้ง	Chemical dry etching
การกัดด้วยไอออนที่ ไรต์ต่อปฏิกิริยา	Reactive ion etching
การเกิดส่วนไวต่อปฏิกิริยา	Active species generation
การดูดซับ	Absorption
การแพร่กระจาย	Diffusion
การโยกย้าย	Migration
กรดไฮโดรฟลูออริก	Hydrofluoric acid
กรดไนตริก	Nitric acid
กรดปรีนยา	Piranha
กลไกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก	Mechanism of anisotropic etching
กระบวนการดูดกลืนแสง	Absorption process
กระบวนการสปัตเตอริง	RF sputtering
กระแสมืด	Dark current
กระแสรั่วไหล	Leakage current
กระแสแสง	Photocurrent
การไบอัสตรง	Forward bias
การไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
ขั้วแคโทด	Cathode
ขั้วแอโนด	Anode
ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ	Depletion width
ช่องว่างแถบพลังงาน	Energy gap
ไดโอดพี-เอ็น	P-N diode
ตัวตรวจจับแสง	Photodetectors
ไตรโคลโรเอทิลีน	Trichloroethylene

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

ภาษาไทย	ภาษาอังกฤษ
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band
แถบวาเลนซ์	Valence band
เนื้อสารกึ่งตัวนำ	Bulk
น้ำยาขึ้นลวดลาย	Developer
น้ำยาไวแสง	Photoresist
เบ้าหลอมสาร	Crucible
โปรตอน	Proton
พลังงานยึดเหนี่ยว	Binding energy
พาหะส่วนมาก	Majority carrier
พาหะส่วนน้อย	Minority carrier
ฟังก์ชันงาน	Work function
โฟโตมาร์ก	Photo mask
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ภาคตัดขวางการจับยึด	Capture cross section
ระดับพลังงานระดับลึก	Deep level energy
ระดับพลังงานดักจับ	Energy trap
เรกติไฟร์	Rectifier
แรงดันพังทลาย	Breakdown voltage
รอยสัมผัสขั้วต่อตักกี	Schottky contact
รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำ	Metal-semiconductor contact
รอยสัมผัสโอห์มิก	Ohmic contact
ระดับพลังงานผู้รับแบบลึก	Deep acceptor level
ระดับพลังงานผู้ให้แบบลึก	Deep donor level
ระดับพลังงานเฟอร์มิ	Fermi energy
ระบบระเหยสารด้วยลำอิเล็กตรอน	Electron-beam evaporation
สิ่งปนเปื้อน	Contamination

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

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

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

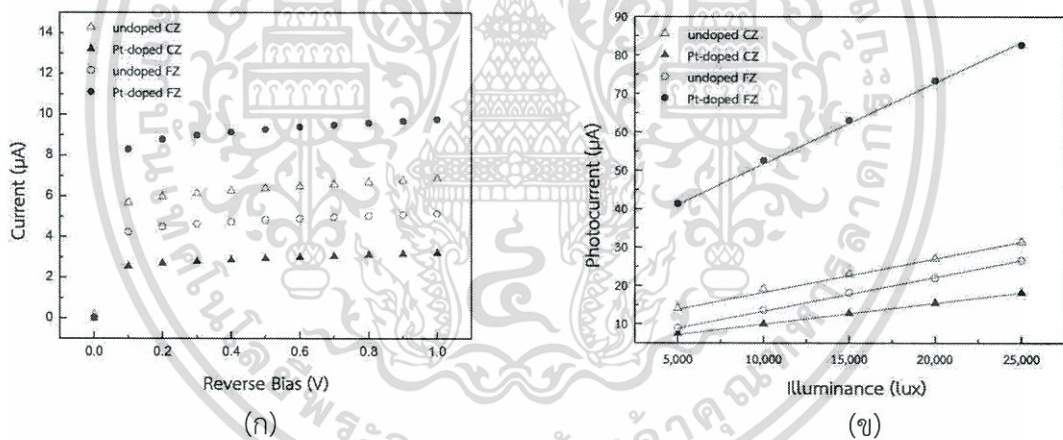
เซ็นเซอร์แสง (Light sensor) เป็นอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างหนึ่งที่เปลี่ยนแปลงค่าความต้านทานหรือการนำไฟฟ้าที่ไหลผ่านตัวมันได้เมื่อมีแสงมาตกกระทบ ในปัจจุบันเซ็นเซอร์แสงได้ถูกนำมาพัฒนาและถูกนำไปประยุกต์ในการใช้งานอย่างแพร่หลาย ทางด้านการแข่งขันทางอุตสาหกรรม อิเล็กทรอนิกส์มีการแข่งขันที่สูงมากเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค เซ็นเซอร์แสงที่ถูกนำมาประยุกต์ในการใช้งานในชีวิตประจำวันมีหลากหลายเป็นอย่างมาก ยกตัวอย่างเช่น ตัวต้านทานแปรค่าตามแสง หรือ (LDR) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ตรวจจับแสง เมื่อมีความเข้มแสงมากตกกระทบที่อุปกรณ์จะทำให้เกิดความต้านทานที่ค่อนข้างสูง ในการใช้งานจะนำไปประยุกต์ใช้ในการเปิดปิดไฟภายในบ้านอัตโนมัติและเซ็นเซอร์ตัวนี้จะถูกควบคุมโดยแสงจากดวงอาทิตย์ IR sensor คืออุปกรณ์ที่นำโฟโตไดโอดหรือโฟโตทรานซิสเตอร์มารวมเข้ากับวงจรควบคุมภายในเพื่อใช้สำหรับตรวจวัดความถี่สูงโดยเฉพาะ ในการใช้งานเซ็นเซอร์แสงตัวนี้จะต้องเข้ากับแสงย่านอินฟราเรดเท่านั้น และในการใช้งานจะใช้งานร่วมกับ LED อินฟราเรด นิยมใช้ส่งข้อมูลระยะไกล และเซ็นเซอร์แสงอีกอย่างหนึ่งคือโฟโตไดโอด ซึ่งจะถูกแบ่งออกเป็นสองชนิดด้วยกันคือ ตอบสนองต่อแสงที่สามารถมองเห็นได้และตอบสนองต่อแสงความถี่สูง เช่น ย่านอินฟราเรด การนำโฟโตไดโอดไปประยุกต์การใช้งาน ยกตัวอย่างเช่นในฟังก์ชันในการปรับค่าความสว่างบนหน้าจอของสมาร์ตโฟนและระบบล็อกหน้าจ้อัตโนมัติ เมื่อนำหน้าจอของสมาร์ตโฟนมาแนบกับใบหู ระบบนี้จะทำการติดตั้งเซ็นเซอร์แสงไว้ที่หน้าจอเพื่อใช้ในการตรวจวัดความเข้มแสง ซึ่งจะทำหน้าที่เปลี่ยนแปลงความสว่างของหน้าจอตามความเข้มแสงที่เข้ามาตกกระทบและโฟโตไดโอด หน้าที่ในการทำงานของมันจะทำการแปลงสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า

โฟโตไดโอดหรือโฟโตดีเทคเตอร์โครงสร้าง MSM จัดอยู่ในกลุ่มของโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ เป็นอุปกรณ์ที่สามารถทำการสร้างได้ง่าย เพราะว่ามีชั้นโลหะเพียงชั้นเดียวเท่านั้นที่ถูกสร้างบนสารกึ่งตัวนำ ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งเป็นภาพถ่ายด้านบนของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM แสดงให้เห็นขั้วโลหะสองข้างทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้าและมีพื้นที่ที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทำหน้าที่ในการรับแสง โฟโตไดโอดชนิดนี้เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาใช้งานทางด้านการตรวจวัดแสง ซึ่งมีคุณสมบัติเด่นหลายประการ คือ มีกระแสมีดต่ำ [1] มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดี [2] มีการทำงานด้วยความเร็วสูง [3] สัญญาณการรบกวนต่ำ และมีเสถียรภาพที่ดี ที่สำคัญคือสามารถนำมาสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย [4] เนื่องจากมีโครงสร้างแบบเชิงราบ และกระบวนการสร้างยังสอดคล้องกับการสร้างเฟตจึงเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการศึกษาในทางทฤษฎีและทางปฏิบัติที่ผ่านมาของห้องปฏิบัติการไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ทำการพัฒนาโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) มาเป็นระยะเวลาานาน จึงทำให้การสร้างโฟโตไดโอดชนิดนี้มีกระบวนการสร้างที่ง่ายและไม่ยุ่งยากซับซ้อน จึงเหมาะสมที่จะถูกนำไปพัฒนาและต่อยอดทางการศึกษา

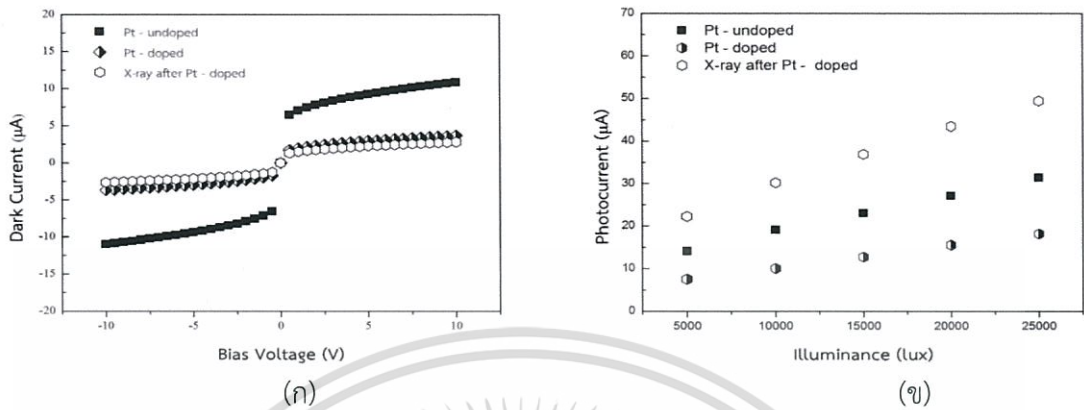
ในปี พ.ศ. 2556 ได้มีบทความที่ทำการศึกษาและพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ โดยทำการแพร่อะตอมสารเจือของแพลทินัมเข้าไปในฐานรองซิลิคอนชนิด CZ และ FZ เพื่อลดค่ากระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสง พบว่าการแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัมในกรณีของฐานรองซิลิคอนชนิด CZ นั้นสามารถช่วยทำให้ค่ากระแสรั่วลดลงได้จริงมีสาเหตุเนื่องมาจากอะตอมสารเจือของแพลทินัมที่แพร่เข้าไปจะเข้าไปสร้างระดับพลังงานในสารกึ่งตัวนำ ซึ่งระดับพลังงานนี้จะอยู่ต่ำกว่าแถบนำไฟฟ้า โดยจะมีหน้าที่ดักจับอิเล็กตรอน ส่งผลทำให้อิเล็กตรอนในแถบนำไฟฟารวมตัวได้มากยิ่งขึ้น อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจึงลดลงทำให้ค่ากระแสรั่วมีค่าลดลงดังแสดงในรูปที่ 1.1 แต่การแพร่อะตอมสารเจือของแพลทินัมกลับมีผลเสียตรงที่ค่ากระแสแสงที่ลดลงจากการทำหน้าที่ในการดักจับอิเล็กตรอนของแพลทินัม [5]



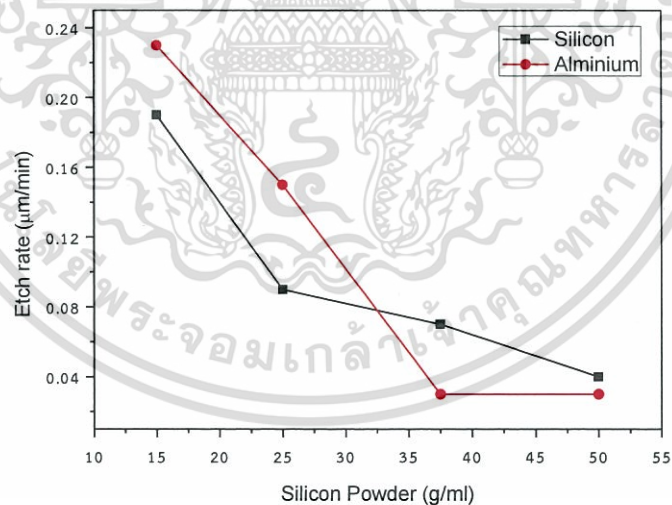
รูปที่ 1.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ทำการแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัมและไม่ได้ทำการแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัม (ก) ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ (ข) ในขณะที่ได้รับแสงที่มีความเข้มต่างๆ ตกกระทบ [6]

ในปี พ.ศ. 2558 ได้มีบทความที่ทำการปรับปรุงการตอบสนองทางแสงทั้งกระแสรั่วและกระแสแสงที่ทำการตรวจวัดได้ของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบที่ทำการแพร่อะตอมสารเจือของแพลทินัม ในบทความนี้ได้ทำการฉายรังสีเอกซ์ลงไปในแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนชนิด CZ ด้วยพลังงาน 85 KeV เป็นเวลา 5 วินาที พบว่าการฉายรังสีเอกซ์หลังจากการแพร่อะตอมสารเจือของแพลทินัมเมื่อทำการทดสอบหาค่ากระแสรั่วมีค่าลดต่ำลงอีกเล็กน้อยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1.2 เนื่องจากรังสีเอกซ์สามารถจัดเรียงตัวของอะตอมแปลกปลอมในฐานรองซิลิคอนให้เป็นระเบียบมากขึ้นและในการไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จัดเรียงตัวของผลึกในซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้ค่ากระแสแสงที่ตรวจวัดได้เพิ่มสูงขึ้นอีก เช่นเดียวกัน [7]



รูปที่ 1.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดของโฟโตไดโอดที่ทำการแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัมและไม่ได้ทำการแพร่อะตอมสารเจือแพลทินัมและทำการฉายรังสีเอกซ์หลังจากแพร่ด้วยอะตอมสารเจือแพลทินัม (ก) ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ (ข) ในขณะที่ได้รับแสงที่มีความเข้มต่างๆ ตกกระทบ [8]

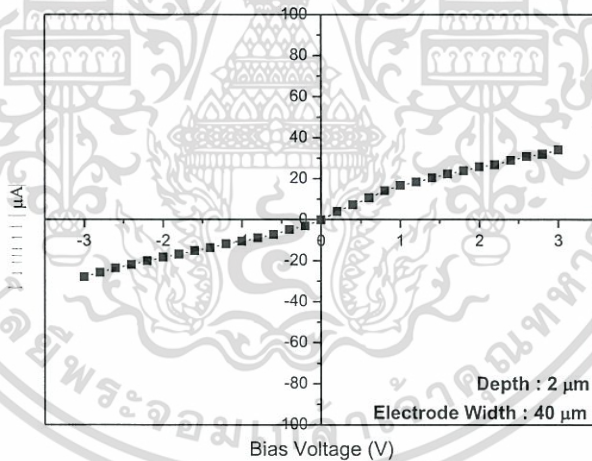


รูปที่ 1.3 อัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอน โดยทำการเปลี่ยนแปลงการเติมผงซิลิคอนลงในสารละลาย TMAH [10]

ในปี พ.ศ. 2559 ได้มีบทความในการสร้างโฟโตไดโอดอีกชนิดหนึ่งนั่นคือโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ในบทความนี้ได้นำเสนอเทคนิคการลดอัตราการกัดชั้นอะลูมิเนียมของสารละลาย TMAH เอาไว้ เนื่องจากในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดของบทความนี้ได้ทำการสร้างขั้วโลหะอะลูมิเนียมไว้ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บนฐานรองซิลิคอนชนิด CZ ไว้อยู่แล้ว ซึ่งจากการเติมผงของซิลิคอนลงไปในการละลาย TMAH พบว่าอัตราการกัดของอะลูมิเนียมลดลงได้จริงแต่การเติมผงของซิลิคอนกลับทำให้อัตราการกัดของซิลิคอนลดลงไปด้วยดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1.3 ในบทความนี้จึงต้องใช้ระยะเวลาพอสมควรในการกัดให้พื้นผิวของซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยู [9]

และในปีเดียวกันนี้เองได้มีบทความในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ใช้สารละลาย TMAH ในกระบวนการกัด เมื่อทำการทดสอบหาค่ากระแสรั่วของอุปกรณ์กลับพบว่าค่ากระแสรั่วอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 1.4 และที่สาเหตุของกระแสรั่วอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงนี้อาจมีสาเหตุมาจากในกระบวนการกัดของสารละลาย TMAH จะทำการกัดเนื้อของอะลูมิเนียมออกมาด้วย ซึ่งอะลูมิเนียมที่ถูกกัดออกมานี้จะรวมตัวกับสารละลายกลายเป็นสารประกอบตัวหนึ่งและสารประกอบตัวนี้อาจจะตกค้างและทิ้งประจุไว้บนผิวหน้าของชิ้นงานจนทำให้เกิดกระแสรั่วที่อยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงได้และอีกสาเหตุหนึ่งอาจจะมาจากการเติมผงของซิลิคอนลงไปในการละลายเพื่อลดอัตราการกัดอะลูมิเนียม ซึ่งผงของซิลิคอนที่ทำการเติมลงไปอาจจะตกตะกอนอยู่ในสารละลายและตะกอนนี้อาจตกค้างอยู่บนผิวหน้าของชิ้นงานจึงอาจจะส่งผลทำให้กระแสรั่วที่ทำการทดสอบอยู่ในเกณฑ์ที่ค่อนข้างสูงก็เป็นไปได้ [11]



รูปที่ 1.4 กระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการเติมผงของซิลิคอนลงไปในการละลาย TMAH [12]

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จึงได้ทำการพัฒนากระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูใหม่ โดยจะทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ปิดทั้งบริเวณขั้วอะลูมิเนียมของชิ้นงานให้มีความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 15,000 Å เพื่อใช้เป็นหน้ากักป้องกันในการกัดของสารละลาย ซึ่งสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดนี้จะกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ประมาณ 1-10 nm/min และในความหมายของพีระมิด คือ พีระมิดที่มีฐานเป็นรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีด้านข้างเป็นรูปสามเหลี่ยม ซึ่งในกระบวนการสร้างนี้จะเกิดจากการใช้สารละลายในกระบวนการกัดที่มีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ไม่สามารถนำออกเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากมหาวิทยาลัยได้  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยูเพื่อใช้เพิ่มกระแสแสง

## 1.2 วัตถุประสงค์ในการศึกษา

วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่มีพื้นผิวสองลักษณะคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยมีวัตถุประสงค์ของการศึกษาดังต่อไปนี้

- 1 ศึกษาเทคนิคการออกแบบโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู
- 2 ศึกษาปัจจัยและเงื่อนไขที่ส่งผลต่อกระบวนการกัดผิวของซิลิคอนจนเกิดเป็นพีระมิดแบบสุ่ม ภายในร่องรูปตัวยู
- 3 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบ
- 4 ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู เมื่อได้รับแสงตกกระทบ
- 5 ศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (UMSM)

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

เพื่อให้บรรลุในวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ จึงทำการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู โดยทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู เพื่อศึกษาผลของลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงจากการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยได้มาจากการวางขอบเขตงานวิจัยดังนี้

ทำการศึกษาโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู โดยทำการเลือกแผ่นฐานรองซิลิคอนที่มีสภาพต้านทาน 5-10  $\Omega$ .cm และทำการหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจากการคำนวณ เพื่อใช้ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เหมาะสมในการกำหนดความลึกของร่องรูปตัวยู จากนั้นทำการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้โครงสร้างแบบเชิงราบในการเปรียบเทียบว่า โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่จะทำการสร้างมีพื้นที่ในการรับแสงมากกว่าหรือน้อยกว่าเพียงไร

ทำการศึกษาคุณสมบัติของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด เนื่องจากการกัดให้เป็นแบบร่องรูปตัวยูมีความจำเป็นต้องใช้สารละลายในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก หรือสารละลายที่มีการกัดระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) ในการศึกษาจะทำการหาปัจจัยหรือเงื่อนไขที่สามารถควบคุมค่า

ได้ง่ายที่สุดในการบวนการกัด เนื่องจากในการบวนการกัดเป็นการแบบเปียกหรือกล่าวคือใช้สารละลายในการบวนการกัดและในปัจจัยและเงื่อนไขเหล่านี้ยังเป็นสิ่งสำคัญในการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู ในการควบคุมปัจจัยต่างๆ จึงเป็นเรื่องที่ยุ่งยากซับซ้อน ซึ่งงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ทำการควบคุมปัจจัยหรือเงื่อนไขอยู่สามอย่างด้วยกัน โดยปัจจัยแรกความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในการบวนการกัด ปัจจัยสองความเร็วรอบในการกวนสาร และปัจจัยสุดท้ายคืออุณหภูมิที่ใช้ในการเร่งปฏิกิริยาในการกระบวนการกัด

ทำการศึกษาคูสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงต่างๆ ของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยทำการเปรียบเทียบจากโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่มีพื้นผิวแบบเรียบ

#### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการการทำงานของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM)
2. ศึกษาโครงสร้างที่เหมาะสมในการใช้เพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด
3. ศึกษาทฤษฎีในการใช้สารละลายที่มีคุณสมบัติแบบแอนไอโซทรอปิกในการกระบวนการกัด
4. ศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมในการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู
5. ศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพีระมิดแบบส้อม ภายในร่องรูปตัวยู

#### 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ประกอบไปด้วยเนื้อหาการศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีของโฟโตไดโอด กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยูเพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสง โดยแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

**บทที่ 1** บทนำ เป็นการกล่าวถึงความจำเป็นและความสำคัญของโฟโตไดโอดที่มีโครงสร้างเป็นแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู และเหตุผลสนับสนุนต่องานวิจัยนี้ วัตถุประสงค์ ขอบเขตของการศึกษา ขั้นตอนของการศึกษาของงานวิจัยในครั้งนี้

**บทที่ 2** เป็นการกล่าวถึงทฤษฎีในการกระบวนการกัดด้วยสารละลายที่ใช้ ลักษณะของสร้างพีระมิดแบบต่างๆ เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่มีพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู และยังกล่าวถึงกระบวนการทางแสงของสารกึ่งตัวนำ ทฤษฎีของโฟโตไดโอดภายใต้แรงดันไบอัส

**บทที่ 3** กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ในส่วนนี้จะกล่าวถึงเทคนิคในการออกแบบโครงสร้างของร่องรูปตัวยูและกระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอน การเตรียมสารละลายที่ใช้

ในกระบวนการก่อกำเนิดเป็นร่องรูปด้วยรวมถึงการเกิดพีระมิดแบบสุมภายในร่องรูปด้วย จากนั้นนำไปทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงตามเงื่อนไขที่ต้องการ

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง จะกล่าวถึง เทคนิคที่ใช้ในการออกแบบโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย ผลจากการศึกษาปัจจัยที่ทำให้เกิดพีระมิดแบบสุม ผลการวิเคราะห์โครงสร้างแบบร่องรูปด้วยทั้งพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุม ผลการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโพโตไดโอดทั้งสามโครงสร้างคือโพโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) โพโตไดโอดแบบร่องรูปด้วย (UMSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและโพโตไดโอดแบบร่องรูปด้วย (UMSM) ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุมภายในร่องรูปด้วย

บทที่ 5 จะกล่าวถึงผลการทดลองและการวิเคราะห์รวมถึงข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัยที่ได้ทำ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อไป



## ทฤษฎี

เนื่องจากงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพทางแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิตแบบสุ่มบนผิวของซิลิคอนหรือภายในร่องตัวยู ซึ่งทำการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากเดิมที่เป็นแบบเชิงราบ และการสร้างพีระมิตแบบสุ่มบนผิวของซิลิคอนจะช่วยให้การเพิ่มพื้นที่รับแสงให้ได้มากยิ่งขึ้น โดยจะทำการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวสองลักษณะในการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า และทางแสงนั่นคือ พื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม กับพื้นผิวแบบเรียบ ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง ทฤษฎี และหลักการที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้แก่ ทฤษฎีกระบวนการและปฏิกิริยาในกระบวนการกัด การสร้างกับดักทางแสงและโครงสร้างของพีระมิต ทฤษฎีการเกิดรอยสัมผัสภายในโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบเมื่อได้รับแรงดันไบอัสและแสงตกกระทบ เพื่อเป็นพื้นฐานในการอธิบายถึงลักษณะในการกักรวมถึงกลไกการทำงาน และกลไกการเกิดกระแสแสงของโฟโตไดโอดชนิดนี้

### 2.1 กระบวนการกัด

ในกระบวนการกัด (Etching Process) เพื่อสร้างลวดลายวงจรร เป็นการทำเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของอุปกรณ์ หรือการลอกวัสดุที่ไม่ต้องการออกจากแผ่นฐานรอง (Substrate) หรือชิ้นงาน (Sample) เช่น ชั้นฟิล์มบาง ชั้นออกไซด์ และชั้นโลหะ เป็นต้น ในกระบวนการกัดจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การกัดแบบแห้ง (Dry Etching) กัดทุกทิศทางอย่างสม่ำเสมอโดยใช้ Plasma หรือก๊าซ ในการกัด เราจะเรียกกระบวนการกัดอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทางนี้ว่า ไอโซทรอปิก (isotropic) [13] และ การกัดแบบเปียก (Wet etching) จะกัดแต่ละระนาบไม่เท่ากัน หรือกล่าวคือในกระบวนการกัดแบบเปียกจะมีการเลือกระนาบในการกัด ซึ่งจะขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัด ยกตัวอย่างเช่น สารเคมีบางประเภทจะมีการกัดนาบ 111 มากกว่าระนาบ 100 แต่สารเคมีบางประเภท จะกัดระนาบ 100 มากกว่าระนาบ 111 เราจะเรียกการกัดในลักษณะแบบนี้ว่า แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) [14] ซึ่งความแตกต่างในระนาบระหว่างกระบวนการกัดจะขึ้นอยู่กับระนาบของผลึก และเทคนิคหรือเครื่องมือที่ใช้ในการกัดผิวหน้าของวัสดุ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการกัดแบบเปียกที่มีคุณสมบัติการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมาใช้ในการกัดผิวหน้าของซิลิคอนให้เกิดการกักตัวของพีระมิตแบบสุ่มอย่างไม่สม่ำเสมอและแบบผิวเรียบ ในกระบวนการกัดแบบเปียกมักจะมียัตราการกัดมากกว่าแบบแห้งและการเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดยังขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและความเข้มข้นของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดอีกด้วย [15]

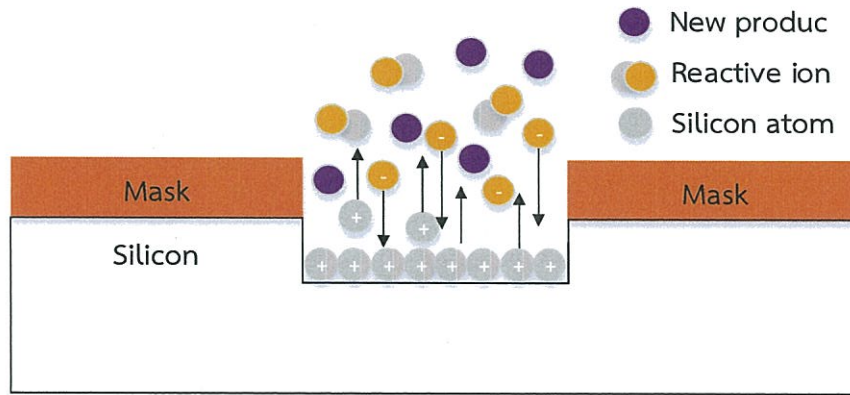
### 2.1.1 การกัดแบบแห้ง

การกัดแบบแห้ง (Dry Etching) คือ การใช้ไอออนของก๊าซในการกัดส่วนที่ไม่ต้องการออก ซึ่งไอออนของก๊าซสามารถถูกสร้างจากการนำก๊าซมาผสมกันในห้องสุญญากาศ และใช้พลังงานไฟฟ้าเป็นตัวกระตุ้นให้ก๊าซบางส่วนแตกตัวให้ได้ไอออนออกมา ซึ่งเราจะเรียกว่า “พลาสมา (Plasma)” เมื่อพลาสมาที่มีพลังงานสูงไปกระทบที่ผิวของชิ้นงาน ไอออนของก๊าซจะเป็นตัวทำปฏิกิริยาโดยจะจับตัวกับอะตอมในส่วนที่ไม่ต้องการแล้วจะถูกดึงออกไป เราเรียกปฏิกิริยาการกัดนี้ว่า “การกัดด้วยปฏิกิริยาไอออน (Reactive Ion Etching)” [16] แสดงดังรูปที่ 2.1

หลักการการทำงานของกระบวนการกัดด้วยเครื่องกัดปฏิกิริยาไอออน อาศัยหลักแยกสลายก๊าซตั้งต้นให้เป็นพลาสมา (Plasma Ion Bombardment) ด้วยคลื่นสัญญาณความถี่วิทยุ (Radio frequency : RF) ที่บริเวณขั้วแอโนด (Anode) และขั้วคาโทด (Cathode) ซึ่งขั้วแอโนดจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นบวกและขั้วคาโทดจะมีศักย์ไฟฟ้าเป็นลบ พลาสมาที่เกิดขึ้นจะประกอบไปด้วยไอออนที่มีประจุเป็นลบ และไอออนของก๊าซตั้งต้นจะมีประจุเป็นบวก ไอออนของก๊าซตั้งต้นที่แตกตัวจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าที่มีทิศทางแน่นอนให้เคลื่อนที่ไปชนกับแผ่นฐานรองหรือชิ้นงาน ส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซตั้งต้นกับแผ่นฐานรอง โดยสามารถกัดบริเวณที่ไม่ต้องการได้ นอกจากปฏิกิริยานี้จะทำให้เกิดสารประกอบตัวใหม่ขึ้นมา ซึ่งจะถูกปั๊มสุญญากาศดูดออกจากห้องกัดสุญญากาศ

ก๊าซที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบแห้ง

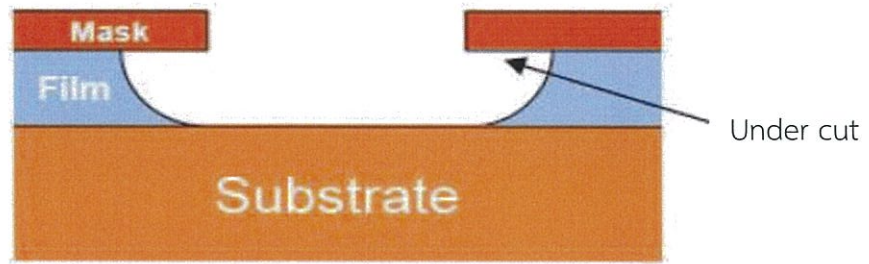
การกัดด้วยกระบวนการกัดแบบแห้งนั้นจะไม่ใช้สารเคมีที่เป็นของเหลว กระบวนการนี้จะเกี่ยวข้องกับระหว่างปฏิกิริยาทางเคมีกับการกัดด้วยก๊าซบนพื้นผิวหน้าของวัสดุ หรือที่เรียกว่า vapor phase etching กระบวนการกัดแบบแห้งนั้นมักจะเกิดเป็นลักษณะของไอโซทรอปิกและเป็นในกระบวนการกัดจะต้องใช้เทคโนโลยีขั้นสูง การกัดแบบแห้งสามารถกัดได้ความละเอียดค่อนข้างมากและมีความแม่นยำในการกัดมากกว่ากัดแบบเปียก เนื่องจากการกัดแบบแห้งสามารถหลีกเลี่ยงการเซาะในร่องได้ ก๊าซใช้ในการกัดแบบแห้ง คือ เตตระฟลูออโรมีเทน (Tetrafluoromethane :  $\text{CH}_4$ ), ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (Sulfur Hexafluoride :  $\text{SF}_6$ ), ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์ (Nitrogen Trifluoride :  $\text{NF}_3$ ), ก๊าซคลอรีน (Chlorine gas :  $\text{Cl}_2$ ) หรือ ฟลูออรีน (Fluorine :  $\text{F}_2$ ) เป็นต้น [17]



รูปที่ 2.1 ภาพตัวอย่างแสดงปฏิกิริยาในกระบวนการกัดแบบแห้ง

### 2.1.2 การกัดแบบเปียก

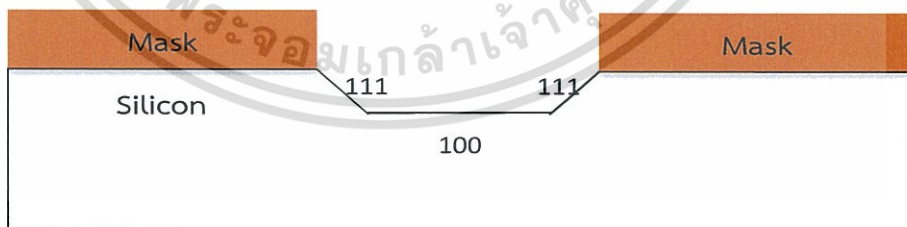
ในการใช้กระบวนการกัดแบบเปียก (Wet Etching) คือ การสกัดพื้นผิวของชิ้นงานหรือวัสดุที่ใช้สารละลายในกระบวนการกัด เพื่อสกัดชั้นที่ไม่ต้องการออกสามารถกัด ชั้นฟิล์มบาง ชั้นซิลิคอนออกไซด์ และกระจกหรือแก้ว การเลือกชนิดของสารเคมีที่ใช้ในการกัดขึ้นอยู่กับชนิดของชิ้นงานที่นำมาใช้หรือชั้นป้องกันในการกัดที่สามารถทนการสกัดได้หรือไม่ เนื่องจากอัตราการกัดของแต่ละสารละลายไม่เท่ากัน เมื่อสารละลายทำปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction) กับแผ่นฐานรองหรือชิ้นงาน หากไม่มีการสร้างชั้นป้องกันในการกัด (Hard Mask) [18] ชิ้นงานจะถูกสกัดออกไปในทุกทิศทางหรือที่เรียกว่าลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิก ขณะบริเวณที่มีชั้นป้องกันจะไม่ถูกสกัด จากงานวิจัยที่ผ่านมาเราพบว่าหากต้องการป้องกันชั้นอะลูมิเนียมในการสกัดด้วยสารละลายให้ยังคงอยู่ต้องทำการเติมผงของซิลิคอน [10] ซึ่งการเติมผงของซิลิคอนสามารถช่วยลดอัตราการกัดของสารละลายลงได้แต่ก็ทำให้เกิดปัญหาอย่างอื่นตามมาด้วยเช่นกันยกตัวอย่างเช่น อัตราการกัดซิลิคอนที่ลดลงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถใช้การกัดแบบเปียกให้มีลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกหรือการกัดแต่ละระนาบไม่เท่ากัน ได้เป็นอย่างดีโดยการออกแบบลวดลายบนชิ้นงานเป็นการบังคับทิศทางในการสกัดและใช้หน้ากปกป้องกันในการกัด คือ ซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) ด้วยกระบวนการ PECVD ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ ทำให้สามารถควบคุมสารละลายที่ใช้กัดได้ แต่ถ้าทำการออกแบบลวดลายของชิ้นงานหรือสร้างชั้นป้องกันในการกัดไม่ดีอาจจะเกิดปฏิกิริยาการกัดใต้หน้ากปกป้องกันในการกัด (Under cut) [19] ดังแสดงในรูปที่ 2.2 อาจส่งผลทำให้เกิดโครงสร้างหรือการกัดที่ไม่สมบูรณ์ ซึ่งในการศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จะอธิบายเฉพาะการกัดแบบเปียกที่มีลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเท่านั้น



รูปที่ 2.2 ภาพภาคตัดขวางของการเกิดการเซาะ (Under Cut) [19]

### 2.1.2.1 การกัดแบบเป็ยกลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) นั้นเป็นการเลือกกัดในแต่ละระนาบไม่เท่ากัน ดังนั้นร่องรอยที่เหลือจากการกัดจึงเป็นภาพทรงเรขาคณิตแน่นอน ในตารางที่ 2.1 เป็นความสัมพันธ์ของมุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl} ซึ่งเป็นตารางที่ใช้ตรวจสอบว่าระนาบที่เลือกกัดควรเป็นระนาบใดบ้างสารละลายที่ทำกรกัดบนผิวหน้าของฐานรองหรือวัสดุ จะขึ้นอยู่กับชั้นป้องกันในการกัด [18] ซึ่งจะมีอัตราการกัดที่ต่างแตกต่างกันและยังขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกของหรือระนาบของผลึกในวัสดุ เช่น ซิลิคอนจะเกิดการกัดในลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกสูงมากและจะมีสารละลายบางตัวเท่านั้นที่จะทำให้เกิดการกัดเป็ยกลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกได้ ยกตัวอย่างเช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) [20], เอติลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิคอล (EDP) [21] และเตตระเมทิล แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) [22] การกัดซิลิคอนระนาบ (100) จะมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูดังในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ภาพภาคตัดขวางของลักษณะการกัดเป็ยกลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2.1 มุมระหว่างระนาบ {HKL} และ {hkl} และความอัดแน่นของอะตอมของแต่ละระนาบต่างๆ [23]

{HKL}	{hkl}	มุมระหว่างระนาบ	{HKL}และ{hkl}	
100	100	0.00	90.00	
	110	45.00	90.00	
	111	54.74		
	210	26.56	63.43	90.00
	211	35.26	65.90	
	221	48.19	70.53	
	310	18.43	71.56	90.00
	311	25.24	72.45	

### 2.1.2.2 โครงสร้างของซิลิคอน

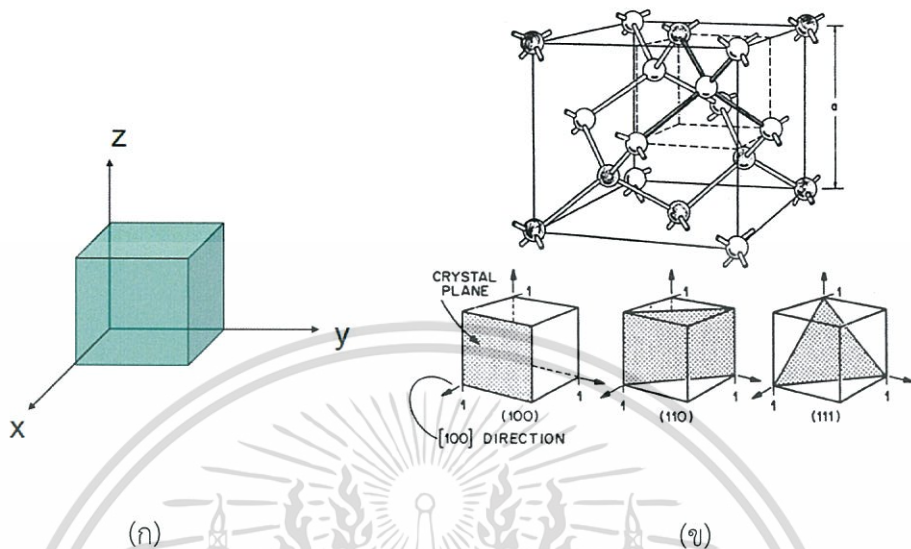
ระบบผลึกในซิลิคอน หรือ โอเรียนเตชันของผลึกซิลิคอน โครงสร้างผลึกมีอยู่หลายแบบ สามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มตามภาพร่างของหน่วยเซลล์ โดยให้ จุดกำเนิดของแกน xyz อยู่ที่มุมใดมุมหนึ่งของหน่วยเซลล์ แกน x, y และ z ระนาบของผลึกซิลิคอน เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมาก สำหรับงานการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำโดยเฉพาะผลึกซิลิคอน ระนาบ (100) ซึ่งวิธีการแสดงระนาบของผลึก คือ โดยการแสดงด้วยค่า “ดัชนีมิลเลอร์ (Miller Indices)” ซึ่ง ดัชนีมิลเลอร์ ของระนาบของซิลิคอนจะถูกกำหนดโดยตำแหน่งจุดที่ระนาบนั้นตัดแกน x, y และ z

วิธีการหาดัชนีมิลเลอร์ สำหรับระนาบผลึกสี่เหลี่ยมลูกบาศก์

1. เลือกระนาบที่ไม่ผ่านจุด (0, 0, 0)
2. หาจุดตัดแกน x, y, z
3. ทำจุดตัดให้เป็นส่วนกลับ (1/x 1/y 1/z)
4. ทำให้ผลหารเป็นเลขจำนวนเต็มที่สุดตัวน้อยๆ
5. ใส่ใน ( ) โดยไม่มีจุลภาค (,) กั้น
6. ถ้าติดลบให้ใส่ขีดเส้นไว้เหนือตัวเลขนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

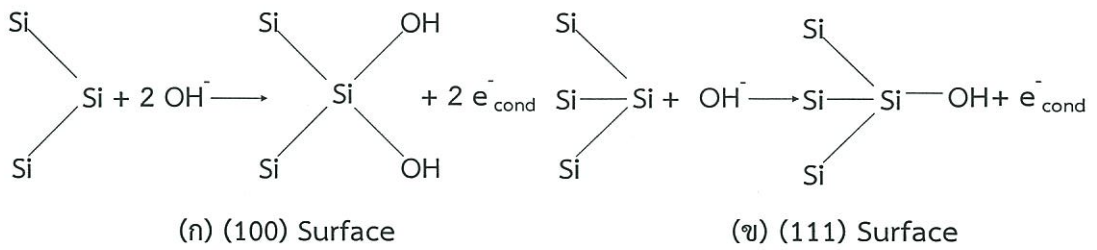
ดังนั้น ดัชนีมิลเลอร์ของระนาบ (100) ซึ่งตัดแกน  $x = 1$ ,  $y = \infty$ ,  $z = \infty$  เขียนได้แสดงดังรูปที่ 2.4 (ข)



รูปที่ 2.4 (ก) แสดงหน่วยเซลล์ในระบบ  $x y z$  (ข) แสดงหน่วยเซลล์ระนาบ (100), (110), (111) [23]

ในโครงสร้างอะตอมซิลิคอนจะมีระนาบต่างๆ กัน เช่น ระนาบ (100) ระนาบ (111) จะมีจำนวนพันธะที่ถูกตัดออกไปก่อน และจำนวนพันธะที่จะถูกดึงออกสู่สารละลาย ไม่เท่ากัน ดังจะกล่าวต่อไปนี้

1. ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกตัดออกจะมี 2 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวระนาบและมี 2 อะตอมที่ถูกตัดออก ก่อน ดังนั้นการที่จะดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึง 2 พันธะ
2. ระนาบ (111) จะมี 3 อะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมี 1 อะตอม ที่ถูกตัดออกไปก่อนหน้านี้ จึงเป็น ระนาบที่แข็งแรงที่สุด
3. ระนาบ (110) จะมี 3 อะตอมอยู่ที่ผิวหน้า 1 อะตอมอยู่ใต้ผิวหน้า และ 1 อะตอมที่ถูกตัดไปก่อน หน้านี้ แม้ว่าจะมี 2 อะตอมที่มีพันธะร่วมกับอะตอมตรงกลางที่บนผิวหน้า แต่ก็ล้วนเป็นอะตอมที่ ผิวหน้าด้วยกันจึงจะถูกตัดไปพร้อมกันกับ ระนาบ (100) จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงน้อยกว่าระนาบ (100) และระนาบ (111) ดังที่แสดงให้เห็นในแผนผังของพันธะซิลิคอนในรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แผนผังของพันธะซิลิคอน (ก) ระนาบ (100) และ (ข) ระนาบ (111) [24]

### 2.1.3 ปฏิกริยาการกัดซิลิคอน

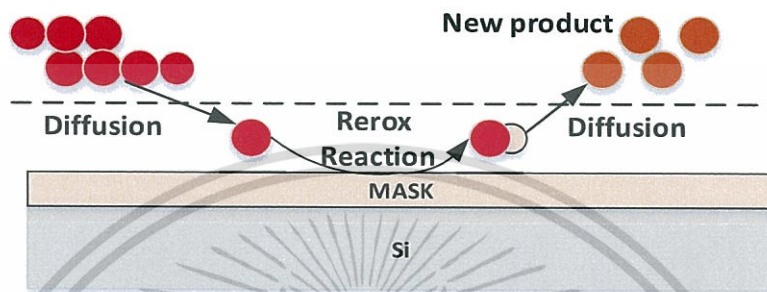
การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกได้กลายมาเป็นเทคโนโลยีส่วนสำคัญในกระบวนการผลิตสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำประเภท เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro Electro Mechanical Systems : MEMS) จากซิลิคอน กระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก คือ กระบวนการที่สารละลาย (Etchant) กัดเนื้อซิลิคอนในแต่ละระนาบไม่เท่ากัน หรือกล่าวได้ว่าอัตราการกัดของสารละลายแปรตามระนาบของซิลิคอน

การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการกัดแบบเปียกที่ผิวหน้าของจะอธิบายได้คร่าวๆ 3 ขั้นตอนดังนี้

- (1) เกิดปฏิกิริยาในการแพร่กระจายของสารละลายบนผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการหรือลวดลายที่ถูกเปิดขึ้นป้องกันออก
- (2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายและผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ จะเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์-ออกซิเดชัน (Reduction-Oxidation) หรือที่เรียกว่า “ปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox reaction)” ปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้ออกซิเดชันของวัสดุที่ละลายแล้วเกิดออกซิไดซ์อธิบายให้ง่ายขึ้น คือ ผิวหน้าของวัสดุจับตัวกับสารละลายและถูกดึงออกไปยังระบบของสารละลาย
- (3) เกิดการแพร่กระจายของผิวหน้าของวัสดุที่จับตัวอยู่กับสารละลายสารละลาย ซึ่งจะทำให้การเกิดปฏิกิริยาช้าลง [25]

โดยทั่วไปปฏิกิริยาในการกัดผิวของชิ้นงานจะมีอยู่ด้วยกันอย่างคร่าวๆ ประมาณ 3 ส่วน ซึ่งจะมีรูปแบบของการจ่ายตัวของประจุพาหะนั้นคืออิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ และชนิดของสารเคมีที่มีผลต่อพื้นผิวของวัสดุสารกึ่งตัวนำ เช่น  $\text{OH}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  และ  $\text{H}_2\text{O}$  ซึ่งจะทำให้ปฏิกิริยาหรือจับตัวกับอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวและถูกกำจัดออกหรือเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สกัดออก การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัด คือ กระบวนการที่เกิดจากการที่สารเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วส่งผลให้เกิดสารใหม่ขึ้นมา ซึ่งมีคุณสมบัติต่างไปจากเดิม โดยมีสารเริ่มต้นปฏิกิริยา เรียกว่า “สารตั้งต้น (Reactant)” ซึ่งจะมีเพียงตัวเดียวหรือมากกว่า 1 ตัวก็ได้ มาเกิดปฏิกิริยากัน และทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งก่อตัวขึ้นมาใหม่ที่เรียกว่า “ผลิตภัณฑ์ (Product)” [26] แสดงดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ภาพแสดงตัวอย่างปฏิกิริยาในกระบวนการกัดแบบเปียก [26]

#### 2.1.4 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก

สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อซิลิคอนส่วนใหญ่จะผสมกับน้ำ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) ไฮดราซีน (Hydrazine) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นต้น สารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดที่กล่าวมานี้ต่างมีทั้งคุณสมบัติ แอนไอโซทรอปิก (Anisotropic Etching)

อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด สารละลายเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกหน้ากากป้องกันการกัดให้เหมาะสมกับสารละลายที่ใช้ในการกัดจึงมีความจำเป็นด้วย แสดงดังตารางที่ 2.2

สารละลาย เอทิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine) เป็นสารละลายที่ใช้กัดประเภท แอนไอโซทรอปิก ที่เลือกกระนาบในการกัดได้อย่างเด่นชัดที่สุด สามารถใช้หน้ากากป้องกันการกัดได้หลายชนิด ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารละลายที่เลือกใช้

สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid) + กรดไนตริก (Nitric acid) + กรดอะซิติก (Acetic acid) หรือที่เรียกกันว่า HNA นั้นเป็นสารละลายที่มีลักษณะการกัดแบบไอโซทรอปิก ซึ่งอัตราการกัดแปรผันกันอย่างมากระหว่างอัตราการกัดยังขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของอะตอมสารเจือ อัตราส่วนผสมที่ต่างกันจะทำให้อัตราการกัดเปลี่ยนแปลงไปมาก และหน้ากากสำหรับกรด HNA มีทั้ง  $\text{SiO}_2$  และ  $\text{Si}_3\text{N}_4$  แต่ไม่สามารถป้องกันการกัดในระยะเวลานานได้

ซึ่งในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอการกัดในลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิก โดยใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อทำการสกัดพื้นผิวของซิลิคอนให้เป็นพีระมิดแบบสุ่ม และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เพื่อทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนให้เป็นพื้นผิวเรียบ ซึ่งเป็นสารละลายที่มีการกัดที่ขึ้นกับทิศทางและระนาบและมีอัตราการกัดของการกัดระนาบ (100) และ ระนาบ (111) สูงที่สุด และเกิดบริเวณ undercutting ใต้ชั้นออกไซด์ต่ำที่สุด และมีอัตราการกัดชั้นป้องกันซิลิคอนไดออกไซด์ที่ต่ำ

ตารางที่ 2.2 ตารางแสดงสารละลายในกระบวนการกัดซิลิคอน และหน้ากักป้องกันในกระบวนการกัดที่เหมาะสม [27]

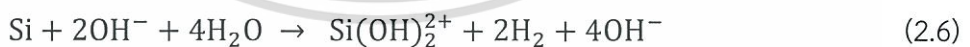
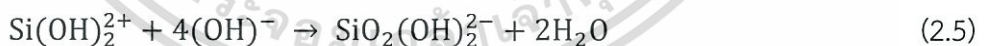
สารละลายกัด	ส่วนผสม	อุณหภูมิ	อัตราการกัด (/min)	อัตรากัดแอนไอโซทรอปิก (100)/(111)	หน้ากักป้องกันการกัด
HF +HNO <sub>3</sub> + Water + CH <sub>3</sub> COOH (HNA)	10 ml 20 ml 80 ml	22	0.7-3.0	1:1	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Ethylene diamine Pyro catechol	750 ml 120 ml 100 ml	115	0.75	35:1	SiO <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Au, Cu, Ag, Cr, Ta
KOH + H <sub>2</sub> O	44 g 100 ml	85	1.4	400:1	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub>
	55 g 100	85	1.0	400:1	
TMAH 22 %wt	-	90	0.9	200:1	Au, Cu, Ag, Cr, Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> SiO <sub>2</sub>
TMAH 10 %wt + H <sub>2</sub> O	- -	80	0.72	200:1	
TMAH 5 %wt + H <sub>2</sub> O	- -	80	0.87	200:1	

ในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัดสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ซึ่งสารละลายทั้งสองมีส่วนประกอบของน้ำว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) อยู่ เมื่อทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะทำให้อะตอมหรืออนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) เกิดการแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ซึ่งการแตกตัวของอนุมูลไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) นี้เปรียบเสมือนการฉีดโซลหรือการถ่ายเทอิเล็กตรอนเข้าสู่เนื้อของซิลิคอน ทำให้ยกระดับสถานะออกซิเดชันของซิลิคอนได้เป็น Si<sup>+</sup> และจับตัวกันทำให้ได้ Si(OH)<sup>+</sup><sub>2</sub> หรือ “SiOH<sup>+</sup>” เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์” และยังมีปฏิกิริยาหนึ่งที่เกิดขึ้นจากการแตกตัวของน้ำ คือ ปฏิกิริยาแตกตัว (decomposition reaction) เกิดเป็นอะตอมของไฮโดรเจนไอออน (H<sup>+</sup>) และอนุมูลอิสระของไฮดรอกไซด์ (OH<sup>-</sup>) จะไปทำปฏิกิริยาการรวมตัว (combination reaction) กับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งก่อตัวขึ้นให้เกิดผลิตภัณฑ์ เรียกว่ากรดออร์โธซิลิก (Orthosilic acid) ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย [28] แสดงดังสมการที่ 2.1-2.6 แสดงการเกิดปฏิกิริยาของสารละลาย KOH และสารละลาย TMAH



สมการที่ 2.1-2.2 แสดงปฏิกิริยาการแตกตัวของของสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ตามลำดับ



## 2.2 การศึกษาคุณสมบัติทางแสงและการสร้างกับดักแสง

การพัฒนาเซลล์แสงอาทิตย์ในปัจจุบันโดยส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นและให้ความสำคัญเกี่ยวกับการศึกษาถึงปัญหาข้อจำกัดของเซลล์ รวมถึงการคิดค้นเทคนิคใหม่ๆ ที่จะช่วยลดต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรม และเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ [29] สำหรับวิทยานิพนธ์นี้ได้เน้นถึงการศึกษาเทคนิคการสร้างกับดักแสง เพื่อลดการสูญเสียเนื่องจากการสะท้อนกลับของแสง และเพิ่มโอกาสการเกิดลำแสงตกกระทบบนผิวเซลล์มากขึ้น หรืออาจเรียกว่าการเพิ่มขึ้นของทางเดินแสง (Path length enhancement) [30] คล้ายกับงานวิจัยที่ใช้พัฒนาในโซลาร์เซลล์ทำให้โฟโตไดโอด เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถดูดกลืนแสงได้มากขึ้น และส่งผลทำให้โฟโตโอดมีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมากขึ้น การสร้างผิวขรุขระ หรือผิวไม่เรียบด้วยโครงสร้างพีระมิดแบบสุ่มขนาดเล็ก ๆ ที่ไม่เท่ากันบนผิวของผลึกซิลิคอนระนาบ (100) โดยการใช้สารละลายเคมีซึ่งเป็นหนึ่งในขั้นตอนที่สำคัญสำหรับการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ให้ได้ประสิทธิภาพสูง ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้ทำการศึกษาหาเงื่อนไข และความสัมพันธ์ของตัวแปรต่าง ๆ ที่มีผลกระทบต่อการเกิดกระบวนการกัดผิวซิลิคอนระนาบ (100)

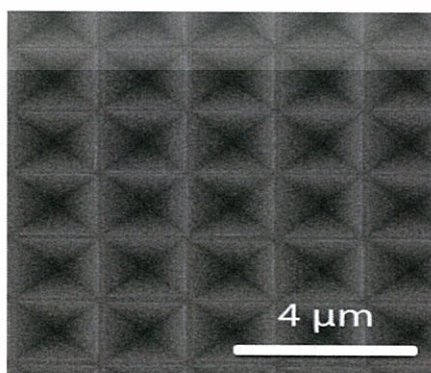
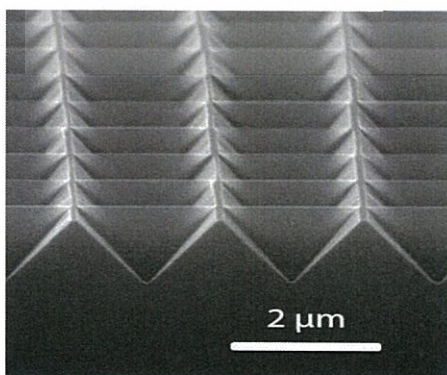
### 2.2.1 คุณสมบัติของกับดักแสงที่พื้นผิวไม่เรียบในแบบต่างๆ

การทำให้เซลล์แสงอาทิตย์มีประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากพลังงานแสง เป็นพลังงานไฟฟ้าได้สูงขึ้น เซลล์ก็จำเป็นที่จะต้องทำการสร้างแผ่นฐานที่มีผิวน้ำขรุขระ (หรือไม่เรียบ) ซึ่งมีผลต่อคุณสมบัติการสะท้อนแสง โดยทำให้การสะท้อนแสงไม่เป็นระเบียบ เรียกว่า ตัวสะท้อนแสงแบบแลมเบิร์ตเทียน (Lambertian reflectors) หรือการทำพื้นผิวเซลล์ไม่เรียบ คือการทำกับดักแสงให้กับเซลล์แสงอาทิตย์ โดยมีจุดประสงค์เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดการรั่วไหลของแสง และการสะท้อนกลับของแสง ทำให้ได้จำนวนการผ่านของแสงภายในเซลล์มากที่สุด [31] ดังนั้นจึงทำให้เซลล์สามารถดูดกลืนแสง หรือพลังงานโฟตอนมาใช้ประโยชน์ได้มากยิ่งขึ้น โดยโครงสร้างของกับดักแสงที่ถูกรวบรวมจากงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีลักษณะโครงสร้างของลวดลายที่นิยมในปัจจุบัน หลัก ๆ ดังต่อไปนี้

#### 2.2.1.1 โครงสร้างลวดลายแบบพีระมิด

ถูกแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

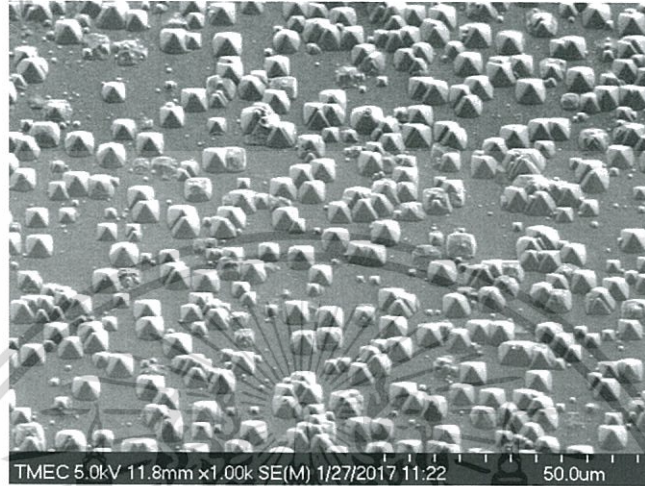
- 1) ลวดลายพีระมิดแบบสม่ำเสมอ (Regular pyramid layout) คือ โครงสร้างอย่างง่ายในปัจจุบันที่มีลวดลายเป็นแบบพีระมิดขนาดเท่ากัน และมีการจัดเรียงตัวกันอย่างสม่ำเสมอ แสดงดังรูปที่ 2.7 ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยการใช้เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง (Photolithography) หรือการใช้เลเซอร์ (laser) สร้างลวดลายเปิดช่อง



รูปที่ 2.7 ลวดลายพีระมิดที่มีการจัดเรียงตัวแบบสม่ำเสมอ [31]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ลวดลายพีระมิดแบบสุ่ม (Random pyramid layout) คือ โครงสร้างที่มีลวดลายเป็นแบบพีระมิดขนาดไม่เท่ากัน และมีการจัดเรียงตัวแบบสุ่ม (ไม่สม่ำเสมอ) ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยการใช้เทคนิคการกัด (Etching) ด้วยกระบวนการทางเคมี แสดงดังรูปที่ 2.8

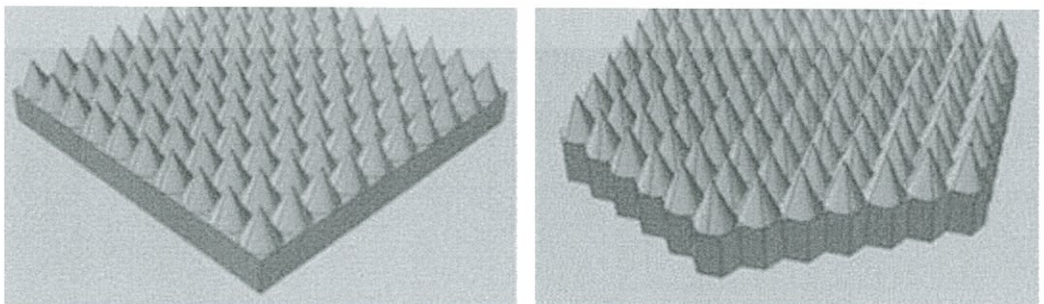


รูปที่ 2.8 ลวดลายพีระมิดแบบสุ่มบนผิวซิลิคอน [32]

จากแนวคิดเรื่องการพัฒนาโซลาร์เซลล์ที่กล่าวไว้ข้างต้นนี้ทำให้ได้ความคิดที่จะนำไปพัฒนาการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มเพราะเป็นการสร้างที่ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อนและสามารถสร้างได้ง่ายที่สุด ซึ่งจะกล่าวถึงในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ต่อไป

### 2.2.1.2 โครงสร้างลวดลายแบบเรขาคณิต

โครงสร้างที่มีลวดลายเป็นแบบรูปทรงเรขาคณิต (Geometrically layout) ในลักษณะต่าง ๆ เช่น รูปทรงตัววี (V-Groove) รูปทรงปริซึม, รูปทรงกรวย เป็นต้น และมีการจัดเรียงตัวแบบสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถสร้างขึ้นโดยการใช้เทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสง หรือการใช้เลเซอร์ แสดงดังรูปที่ 2.9

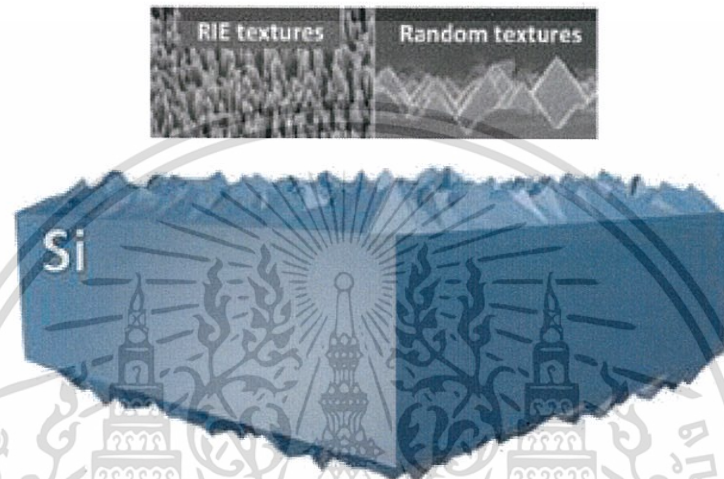


รูปที่ 2.9 ลวดลายพีระมิดแบบเรขาคณิตทรงกรวย [33]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.1.3 โครงสร้างลวดลายบนผิวทั้งสองด้าน

โครงสร้างที่มีลวดลายเป็นแบบข้อ (1) และ (2) บนผิวเซลล์ทั้งสองด้านซึ่งมีลักษณะพิเศษช่วยในการป้องกัน และลดอัตราการรั่วไหล และการสะท้อนของแสง ออกสู่ภายนอกเซลล์ จะเห็นว่าโครงสร้างที่มีลวดลายบนผิวทั้งสองด้านทั้งหมด จะช่วยลดอัตราการรั่วไหลของแสงออกสู่ภายนอกเซลล์ได้ดีกว่าโครงสร้างที่มีลวดลายบนผิวด้านเดียว แสดงดังรูปที่ 2.10



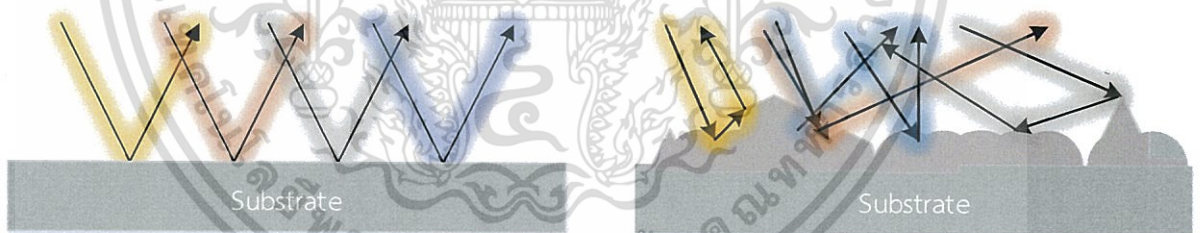
รูปที่ 2.10 ลวดลายพีระมิดแบบผิวทั้งสองด้าน [34]

การทำกับดักแสงด้วยการสร้างลวดลายพีระมิดแบบสุ่มนั้นจะใช้เทคนิคการกัดแบบทุกทิศทาง (Anisotropic etching) ด้วยสารเคมีที่เรียกว่า สารประกอบอัลคาไลน์ (Alkaline solution) ซึ่งเทคนิคนี้มีกระบวนการผลิตที่ง่าย และมีต้นทุนต่ำกว่าเทคนิคการสร้างลวดลายด้วยแสงอีกด้วย โดยสารประกอบอัลคาไลน์นั้นก็มีด้วยกันหลายสูตร (Solution) เช่น สารประกอบเตตระเมทิลไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl hydroxide solution, TMAH) [35], สารประกอบโซเดียมคาร์บอเนต (Sodium carbonate solution,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) [36] และสารประกอบโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium hydroxide solution, KOH) [37] เป็นต้น ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ใช้สารละลาย KOH ในการสร้างลวดลายพีระมิดแบบสุ่ม เนื่องจากเป็นสูตรการกัดพื้นฐานที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในงานวิจัย และในโรงงานอุตสาหกรรม อีกทั้งยังมีต้นทุนต่ำด้วย

### 2.3 คุณสมบัติแสงและคุณสมบัติของแสง

แสงส่วนใหญ่ที่เราได้รับมาจากดวงอาทิตย์เป็นแหล่งกำเนิดแสงที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ ส่วนแสงจากดวงจันทร์ที่เราเห็นในเวลาค่ำคืนเป็นแสงจากดวงอาทิตย์ตกกระทบผิวดวงจันทร์แล้วสะท้อนมายังโลก นอกจากนี้แหล่งกำเนิดแสงในธรรมชาติแล้วยังมีแหล่งกำเนิดแสงที่มนุษย์สร้างขึ้นเช่น หลอดไฟ ตะเกียง เทียนไข เป็นต้น แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น (Wave) และอนุภาค (Practical) [38] และมีคุณสมบัติที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวันเช่น การสะท้อนแสง การหักเหของแสง การกระจายแสง การทะลุผ่าน การดูดกลืน การแทรกสอด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแสงมีคุณสมบัติเป็นคลื่น ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาคได้แก่ การส่องแสงเข้าสู่ผิวโลหะและทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกสู่อวกาศ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (External Photoelectric Effect) [39]

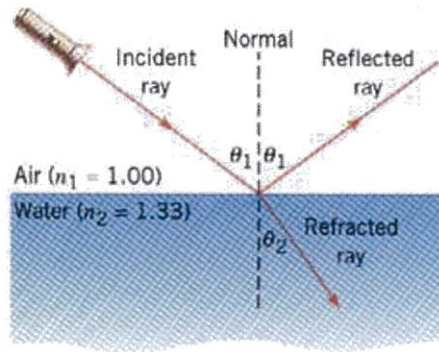
การสะท้อนแสง หมายถึง การที่แสงไปกระทบกับ ตัวกลางแล้วสะท้อนไปในทิศทางอื่นหรือสะท้อนกลับมาทิศทางเดิมการสะท้อนของแสงนั้นขึ้นอยู่กับพื้นผิวของวัตถุด้วยว่าเรียบหรือหยาบ โดยทั่วไปพื้นผิวที่เรียบและมันจะทำให้มุมของแสงที่ตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนบนตำแหน่งที่แสงตกกระทบกับแสงสะท้อนบนพื้นผิวจะเป็นตำแหน่งเดียวกัน ดังแสดงรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ภาพตัวอย่างลักษณะการสะท้อนแสงบนวัตถุ

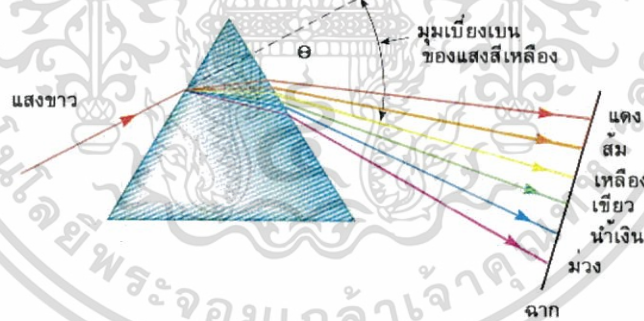
การหักเห หมายถึง การที่แสงเคลื่อนที่ผ่านตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งทำให้แนวลำแสงเกิด

การเบี่ยงเบนไปจากแนวเดิม เช่น แสงผ่านจากอากาศไปยังน้ำ ดังแสดงดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ภาพตัวอย่างลักษณะการหักเหของแสง [40]

การกระจายแสง หมายถึง แสงขาวซึ่งประกอบด้วยแสงหลายความถี่ตกกระทบปริซึมแล้วทำให้เกิดการหักเหของแสง 2 ครั้ง (ที่ผิวรอยต่อของปริซึม ทั้งขาเข้า และขาออก) ทำให้แสงสีต่าง ๆ แยกออกจากกันอย่างเป็นระเบียบเรียงตามความยาวคลื่นและความถี่ ที่เราเรียกว่า สเปกตรัม (Spectrum) แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพตัวอย่างการกระจายแสงที่ตกกระทบปริซึม [41]

การทะลุผ่าน หมายถึง การที่แสงพุ่งชนตัวกลางแล้วทะลุผ่านมันออกไปอีกด้านหนึ่ง โดยที่ความถี่ไม่เปลี่ยนแปลงวัตถุที่มีคุณสมบัติการทะลุผ่านได้ เช่น กระจก ผลึกคริสตัล พลาสติกใส น้ำ และของเหลวต่าง ๆ

การดูดกลืน หมายถึง การที่แสงถูกดูดกลืนหายไปในตัวกลางทั่วไปเมื่อมีพลังงานแสงถูกดูดกลืนหายไปในตัวใด ๆ เช่น เตอบพลังงานแสงอาทิตย์ เครื่องต้มน้ำ พลังงานแสง และยงนา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คุณสมบัติของการดูดกลืนแสงมาใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น การเลือกสวมใส่เสื้อผ้าสีขาวจะดูดแสงน้อยกว่าสีดำ จะเห็นได้ว่าเวลาใส่เสื้อผ้าสีดำ อยู่กลางแจ้งจะทำให้ร้อนมากกว่าสีขาว

การแทรกสอด หมายถึง การที่แนวแสงจำนวน 2 เส้นรวมตัวกันในทิศทางเดียวกัน หรือหักล้างกัน หากเป็นการรวมกัน ของแสงที่มีทิศทางเดียวกัน ก็จะทำให้แสงมีความสว่างมากขึ้น แต่ในทางตรงกันข้ามถ้าหักล้างกัน แสงก็จะสว่างน้อยลง การใช้ประโยชน์จากการสอดแทรกของแสง เช่น กล้องถ่ายภาพเครื่องฉายภาพต่าง ๆ และการลดแสงจากการสะท้อน ส่วนในงานการส่องสว่าง จะใช้ในการสะท้อนจากแผ่นสะท้อนแสง

### 2.3.1 ลักษณะสมบัติพื้นฐานทางแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่มีความยาวคลื่นแสงแตกต่างกันไป แสงที่ตามนุษย์สามารถมองเห็นได้เรียกว่า แสงมองเห็น (visible light) ซึ่งมีความยาวอยู่ในช่วงประมาณ 390 – 700 nm [42] โดยที่แสงมีทั้งคุณสมบัติที่เป็นทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” [38] โดยปรากฏการณ์ที่แสงแสดงลักษณะสมบัติเป็นคลื่นก็คือ การสะท้อน การหักเห และการแทรกสอด เป็นต้น แต่ในฟิสิกส์ควอนตัม คลื่นแสงถูกพิจารณาว่ามีลักษณะสมบัติเป็นอนุภาค โดยที่อนุภาคของแสงนี้ถูกเรียกว่าเป็น โฟตอน (photon) และพลังงานของโฟตอนแปรกับความถี่ของคลื่นแสง ดังสมการที่ 2.7 และ 2.8

$$E_{\text{photon}} = hv = \frac{hc}{\lambda} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{\lambda} \quad (J) \quad (2.7)$$

หรือ

$$E_{\text{photon}} = \frac{1.99 \times 10^{-19}}{q\lambda} = \frac{1.24}{\lambda} \quad (eV) \quad (2.8)$$

โดยที่	$\nu$	คือ	ความถี่ (Hz)
	$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่นแสง ( $\mu\text{m}$ )
	$h$	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ $6.626 \times 10^{-34}$ J-sec
	$c$	คือ	ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ $3 \times 10^8$ m/sec
	$q$	คือ	ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19}$ C

เมื่อพลังงานโฟตอนของแสงมีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างพลังงาน (Energy gap :  $E_g$ ) ของสารกึ่งตัวนำ ( $E_{\text{photon}} \geq E_{g(\text{semi})}$ ) สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสงทำให้เกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ ความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจึงเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.2 การเป็นคลื่นของแสง

แสงเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าชนิดหนึ่ง ถ้าให้  $\lambda$  คือความยาวคลื่นของแสง,  $\nu$  คือความถี่ และ  $c_0$  คือความเร็วของแสงที่เดินทางในสุญญากาศ  $c_0 = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$  (จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 2.9

$$\lambda = \frac{c_0}{\nu} \quad (2.9)$$

### 2.3.3 การเป็นอนุภาคของแสง

แสงนอกจากมีคุณสมบัติเป็นคลื่นแล้วยังมีคุณสมบัติเป็นอนุภาคอีกด้วย เราเรียกอนุภาคแสงว่า โฟตอน (Photon) (อนุภาคแสงมีพลังงานอยู่ภายใน และถ้าแสงมีความถี่เท่ากับ  $\nu$  อนุภาคแสงหนึ่งตัวจะมีพลังงานเท่ากับ  $h\nu$  โดยที่  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ  $6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{sec}$

ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric effect) ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ที่เกิดจากการส่องแสงลงบนผิวโลหะที่วางอยู่ในสุญญากาศแล้วทำให้อิเล็กตรอนที่หลุดออกจากโลหะ  $E$  มีค่าเท่ากับพลังงานของแสงที่ฉายลงบนผิวโลหะ  $h\nu$  ลบด้วยพลังงานที่จำเป็นในการดึงอิเล็กตรอนในโลหะให้หลุดออกมาข้างนอก  $q\phi$  ดังแสดงในสมการที่ 2.10

$$E = h\nu - q\phi \quad (2.10)$$

โดยที่  $\phi$  คือค่าฟังก์ชันงาน (Work function)

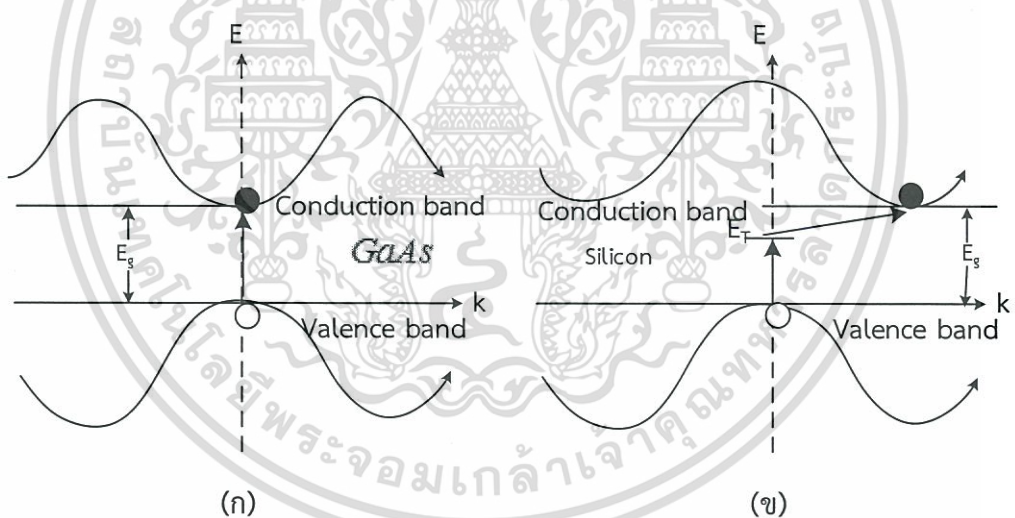
## 2.4 กระบวนการทางแสงในสารกึ่งตัวนำ

### 2.4.1 สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและช่องแถบไม่ตรง

ลักษณะของโครงสร้างแถบพลังงานแบ่งออกเป็นสองประเภทคือ สารกึ่งตัวนำช่องแถบตรง (direct band gap semiconductor) คือ เมื่ออิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน อิเล็กตรอนจะดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจึงย้ายสถานะพลังงาน จากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้เป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงผลึก คือไม่ต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้คือ แกลเลียมอาเซไนด์ (GaAs), อินเดียมแกลเลียมอาเซไนด์ (InGaAs), อินเดียมฟอสไฟด์ (InP) สารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้สามารถดูดกลืนหรือปล่อยพลังงานแสงได้เป็นอย่างดี จึงมักถูกนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านแสง (optical devices) เช่น ตัวตรวจจับแสง ไดโอดเปล่งแสง เลเซอร์ไดโอด เป็นต้น และสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง (indirect band gap semiconductor) คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่ไปใช้โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ หากมีข้อผิดพลาดประการใดขออภัยเป็นอย่างสูง และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โครงสร้างแถบพลังงานที่มีจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์อยู่ไม่ตรงตำแหน่งเวกเตอร์คลื่นค่าเดียวกันหรืออยู่ที่ตำแหน่งโมเมนตัมของคลื่นไม่เท่ากับจุดต่ำสุดของแถบนำ ดังนั้นอิเล็กตรอนต้องได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน จึงย้ายสถานะพลังงานจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำได้เป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระโดยจะต้องมีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัมก่อน ซึ่งก็คือการเปลี่ยนแปลงโมเมนตัมเพื่อให้อยู่ที่จุดพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ก่อน แล้วจึงลดลงมายังแถบวาเลนซ์ได้ในที่สุด และพลังงานที่เปลี่ยนแปลงดังกล่าวมักแสดงออกมาในรูปของความร้อน จึงไม่มีโฟตอนเกิดขึ้น ในทำนองเดียวกันพลังงานโฟตอนจากแสงก็ไม่สามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากจุดสูงสุดในแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังจุดต่ำสุดในแถบนำได้โดยง่าย ถึงแม้ว่าพลังงานโฟตอนจะมีค่ามากก็ตาม แต่อิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมสำหรับการเปลี่ยนสถานะ ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้คือ ซิลิคอน (Si) และ เยอรมันเนียม (Ge) การดูดกลืนหรือคายพลังงานแสงของสารกึ่งตัวนำกลุ่มนี้เกิดขึ้นได้ยากและไม่ดีนัก จึงไม่นิยมนำไปสร้างเป็นอุปกรณ์ทางด้านแสง แต่ตัวตรวจวัดแสงยังคงมีการใช้งานอยู่โดยเฉพาะซิลิคอน เนื่องจากมีราคาถูก และวัสดุมีจำนวนมาก โครงสร้างแถบพลังงานของผลึกสารกึ่งตัวนำที่สามารถอธิบายถึงสารกึ่งตัวนำช่องแถบตรงและสารกึ่งตัวนำช่องแถบไม่ตรง ได้เป็นอย่างดีคือกราฟ E-k diagram ดังแสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 กราฟความสัมพันธ์ E-k ของสารกึ่งตัวนำแบบต่างๆ (ก) ช่องแถบตรง (ข) ช่องแถบไม่ตรง

#### 2.4.2 การดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ

การทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับแสงเกือบทุกชนิดขึ้นอยู่กับพื้นฐานของการเกิดและหายไปของคู่อิเล็กตรอน-โฮล กลไกการเกิดจะนำไปสู่กระบวนการให้พลังงานแก่อิเล็กตรอนที่แถบวาเลนซ์ แล้วทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้า ในขณะเดียวกันจะเหลือโฮลไว้ในแถบวาเลนซ์ วิธีการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่ง่ายที่สุดคือ การให้พลังงานแก่สารกึ่งตัวนำได้แก่ แสงหรือโฟตอนที่มีพลังงานมากพอ เมื่อพลังแสงตกกระทบที่พื้นผิวของสารกึ่งตัวนำพลังงานนี้จะถูก

เอกสารดูดกลืนเข้าไปภายในสารกึ่งตัวนำ จากนั้นจะมีการถ่ายเทพลังงานให้อิเล็กตรอนจนสามารถกระโดดข้ามช่องว่างแถบนำได้ และถ้าพลังงานที่ได้รับมีค่ามากกว่าพลังงานช่องว่างแถบนำ อิเล็กตรอนจะหลุดจากพันธะและกลายเป็นอิสระ เรียกว่าการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลอิสระ

ขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ กระบวนการนี้จึงถูกเรียกว่า กระบวนการดูดกลืนแสง (absorption process) ในทางกลับกันถ้าอิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าเกิดการสูญเสียพลังงานไป แล้วตกกลับมาที่แถบวาเลนซ์ ทำให้คู่อิเล็กตรอน-โฮลหายไป

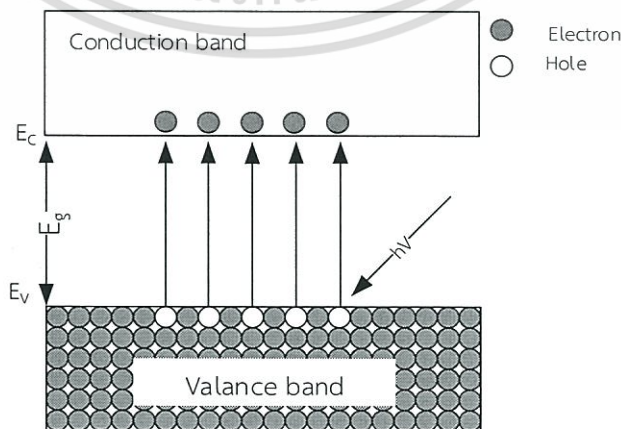
### 2.4.3 กลไกการดูดกลืนแสงและการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล

การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิด ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเพียง 2 ชนิดหลักๆคือ การดูดกลืนแสงแบบอินทรีนซิกและการดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรีนซิก ดังมีรายละเอียดดังนี้

(1) การดูดกลืนแสงแบบอินทรีนซิก จะเกิดขึ้นเมื่อให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ( $> E_g$ ) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ( $h\nu \geq E_g$ ) ที่มีพลังงานมากพอ ที่จะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้ กลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้นที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดอิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ ดังแสดงในรูปที่ 2.15 การดูดกลืนแสงแบบนี้จะพบกันมากในตัวตรวจวัดแสงทุกชนิด เนื่องจากพลังงานโฟตอนต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งสามารถหาได้ในเทอมของ  $h\nu \geq E_g$  หรือ  $hc/\lambda \geq E_g$  และถ้าจัดให้อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นสูงสุด ( $\lambda_{max}$ ) ที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลจะได้เป็นดังสมการที่ 2.15

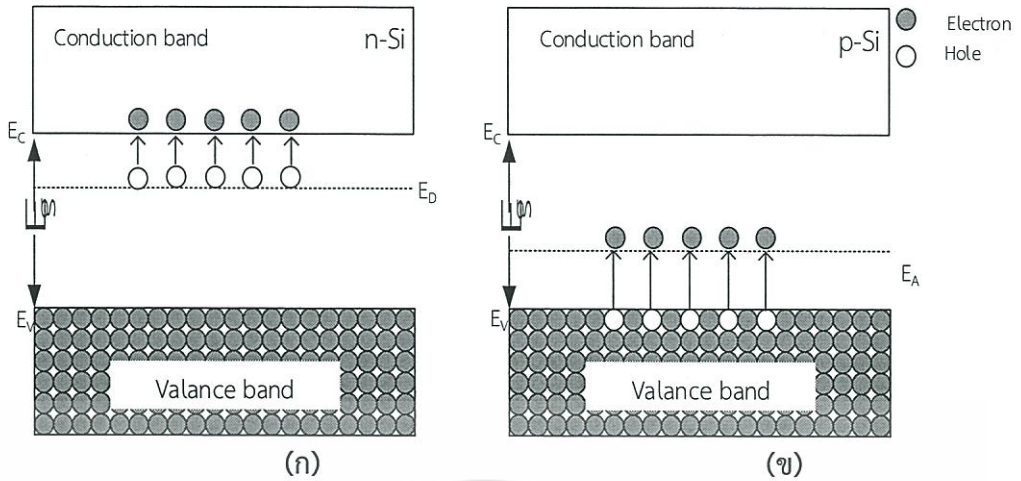
$$\lambda_{max} = \frac{hc}{E_g} \tag{2.15}$$

โดยที่  $h$  คือ ค่าคงที่ของพลังค์ (J.s)  
 $c$  คือ ความเร็วแสง (m/s)



รูปที่ 2.15 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.16 การเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำเอ็กทริกซิค (ก) ชนิดเอ็น (ข) ชนิดพี

ในกรณีของซิลิคอนแสงจะต้องมีพลังงานอย่างน้อยเท่ากับ 1.12 eV ดังนั้นจากสมการที่ 2.15 ความยาวคลื่นแสงจะต้องมีค่าน้อยกว่า 1110 nm ดังตารางที่ 2.3 และความยาวคลื่นสูงสุดที่ทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล เรียกว่า ความยาวคลื่นคัทออฟ (long wavelength cutoff :  $\lambda_{max}$ )

ตารางที่ 2.3 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ

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

(2) ในกรณีของสารกึ่งตัวนำเอ็กทริกซิค (extrinsic semiconductor) ซึ่งมีการแพร่อะตอมสารเจือเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ เช่น สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่มีระดับผู้ให้ (donor level:  $E_D$ ) เกิดขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงาน ( $E_{g_{Si}} = 1.12 \text{ eV}$ ) อะตอมสารเจือดังกล่าวจะสามารถให้อิออนซ์เป็นไอออนบวกโดยการให้อิเล็กตรอนแก่แถบนำไฟฟ้า

ในส่วนของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดพี (p-Si) จะเกิดระดับผู้รับ (acceptor level :  $E_A$ ) ขึ้นในช่องว่างพลังงานจากการเติมอะตอมสารเจือ และเมื่ออิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นด้วยพลังงานภายนอกเพียงเล็กน้อยสามารถขึ้นไปอยู่ที่ระดับ  $E_A$  ได้ ส่งผลให้อะตอมสารเจือเกิดการให้อิออนซ์เป็นไอออนบวกจากการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16(ข) ระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารนี้เป็นไอออนบวกจากการรับอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.16(ข) ระเบียบขั้นตอนการคำนวณว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5 รอยสัมผัสชนิดช็อตต์กี

โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่ทำการศึกษาในวิทยานิพนธ์ครั้งนี้ เป็นโครงสร้างที่เกิดจากสองรอยสัมผัสชนิดช็อตต์กี (Double Schottky contact photodetector) ประกอบด้วยรอยสัมผัสจากโลหะและสารกึ่งตัวนำ จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจเกี่ยวกับรอยสัมผัสชนิดช็อตต์กีเพื่อเป็นพื้นฐานในค้นคว้าวิจัยเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงต่อไป

รอยสัมผัสที่เกิดระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิดคือ รอยสัมผัสชนิดช็อตต์กี (Schottky contact) หรือ เรคตีไฟร์ และรอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) ที่ทำหน้าที่เชื่อมต่อระหว่างตัวอุปกรณ์ภายใน และอุปกรณ์ภายนอกต่างๆ ซึ่งจะต้องมีความต้านทานไฟฟ้าที่ต่ำมากๆ ซึ่งรอยสัมผัสโอห์มิกเป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ส่วนรอยสัมผัสชนิดช็อตต์กีเป็นรอยสัมผัสที่แสดงคุณสมบัติเรคตีไฟร์คล้ายกับไดโอด โดยยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทิศทางเดียว ซึ่งในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นที่เป็นรอยสัมผัสแบบช็อตต์กีเท่านั้น

### 2.5.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสชนิดช็อตต์กี

แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสแสดงในรูปที่ 2.17 ระดับสุญญากาศ (Vacuum level :  $E_0$ ) ใช้เป็นระดับอ้างอิงเพื่อการเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างสารต่างชนิดกัน ซึ่งระดับสุญญากาศนี้นิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือ ระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระจากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ

ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มิ (fermi level :  $E_{FM}$ ) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ เขียนแทนด้วย  $\phi_M$  มีค่าดังสมการที่ 2.16 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติประจำตัวของสารแต่ละชนิด มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

$$q\phi_M = E_0 - E_{FM} \quad (2.16)$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ซึ่งฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำเขียนแทนด้วย  $\phi_S$  มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มิดังสมการที่ 2.17

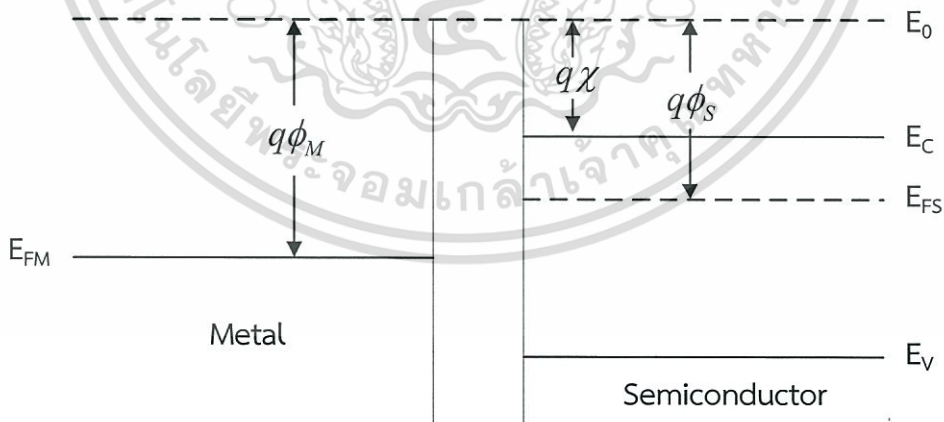
$$q\phi_S = E_0 - E_{FS} \quad (2.17)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

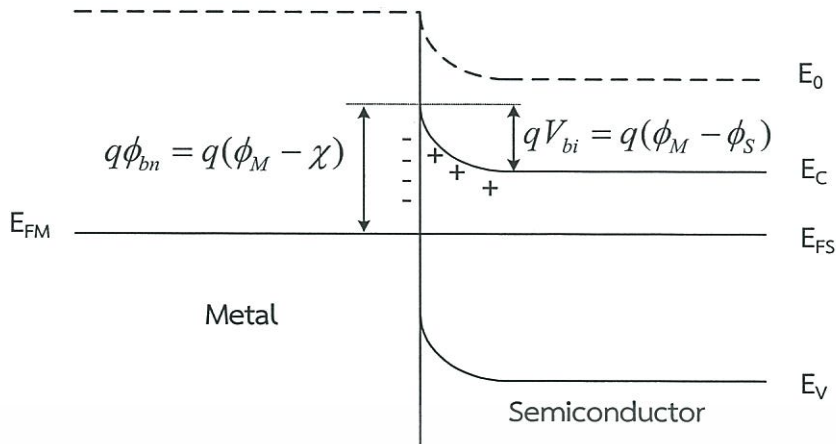
ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสัญญาณและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity :  $\chi$ ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.05 V

การเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่งระหว่างโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $q\phi_M > q\phi_S$ ) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดมีการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวสัมผัสเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อนดังรูปที่ 2.18

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของสารทั้งสองจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (potential barrier :  $qV_{bi}$ ) ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.18



รูปที่ 2.17 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสชนิดกึ่ง



รูปที่ 2.18 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสชนิดซีดตี๋

$$qV_{bi} = q(\phi_M - \phi_S) \quad (2.18)$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่จะเคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ซีดตี๋ (Schottky barrier :  $q\phi_{bn}$ ) มีค่าดังสมการที่ 2.19 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะ และสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ซีดตี๋ต่างๆกัน

$$q\phi_{bn} = q(\phi_M - \chi) \quad (2.19)$$

## 2.6 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสซีดตี๋

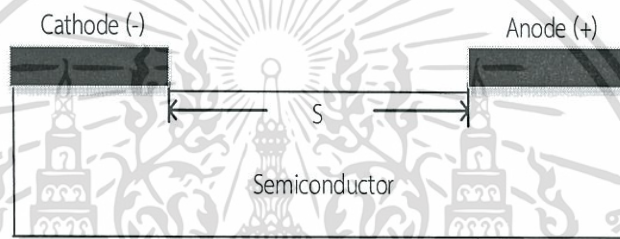
ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจจับแสง ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในด้านภาพและแสงอย่างกว้างขวาง มักเป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันต่างๆ เช่น คอมพิวเตอร์ กล้องถ่ายรูป โทรศัพท์ เครื่องฉาย (Projector) รวมไปถึงระบบสัมผัสต่างๆ นอกจากนี้ยังนำไปประยุกต์ใช้งานเป็นตัวตรวจจับความร้อน (Thermal detector) โดยอาศัยการเปลี่ยนแสงที่มีความยาวคลื่นอินฟราเรดให้กลายเป็นภาพความร้อน (Thermal picture) [42] หรือภาพที่แสดงอุณหภูมิของวัสดุต่างๆ

โดยในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสซีดตี๋ซึ่งประกอบไปด้วยสองรอยสัมผัสซีดตี๋นั้นมีคุณสมบัติเด่นคือ มีเสถียรภาพที่ดี กระแสมืดต่ำ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาเนอร์ กระบวนการสร้างง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถนำไปใช้ทางด้านงานภาพและแสงได้อย่างกว้างขวาง จึงทำให้ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงโครงสร้าง หลักการทำงาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสซีดตี๋

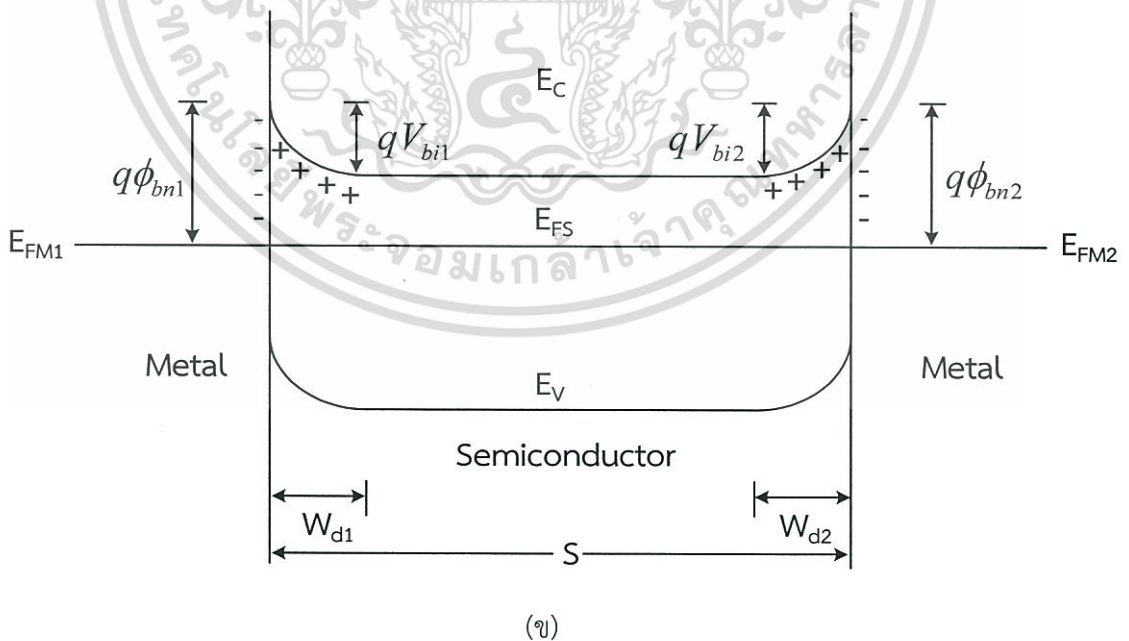
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งในสภาวะสมดุล

แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งในสภาวะสมดุลความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.20 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสชนิดกึ่งดังที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ชนิดกึ่งของขั้วแคโทด ( $\phi_{bn1}$ ) และขั้วแอโนด ( $\phi_{bn2}$ ) มีขนาดเท่ากันหรือ  $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$  กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด ( $V_{bi1}$ ) และขั้วแอโนด ( $V_{bi2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$  และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_{d1}$ ) และด้านแอโนด ( $W_{d2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $W_{d1} = W_{d2} = W_d$  ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร



รูปที่ 2.19 โฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งในสภาวะสมดุลความร้อน



รูปที่ 2.20 โฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดกึ่งในสภาวะสมดุลความร้อน

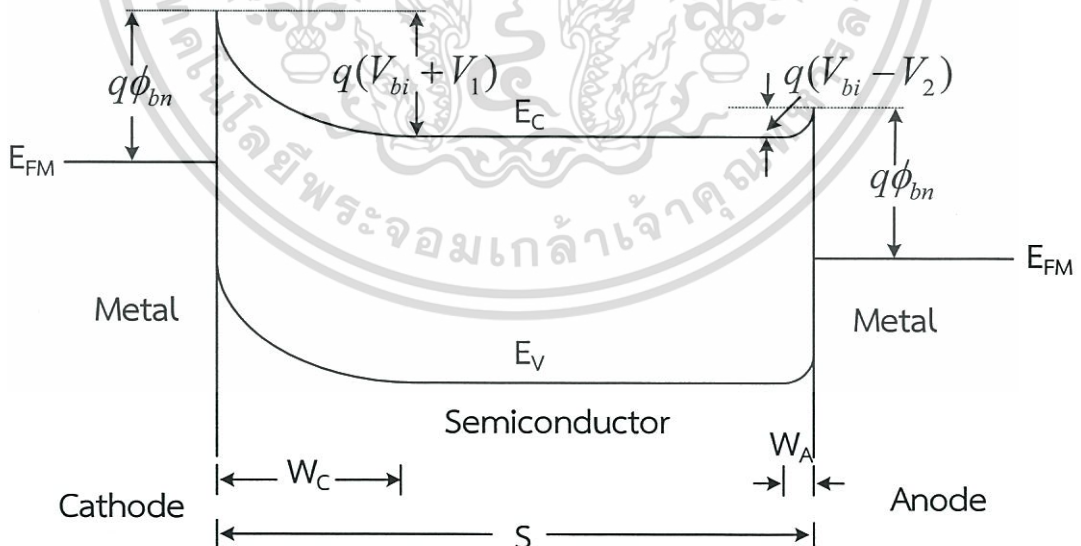
(ก) ภาพภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบเรีงราบ

(ข) แถบพลังงานในสภาวะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6.2 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.21 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น  $V_{bi} + V_1$  อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ชนิดซีดตีก็ยไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ( $I_{SM}$ ) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ย ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ  $V_{bi} - V_2$  ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า ( $I_{MS}$ ) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current :  $I_{dark}$ ) ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ย โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ย จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก



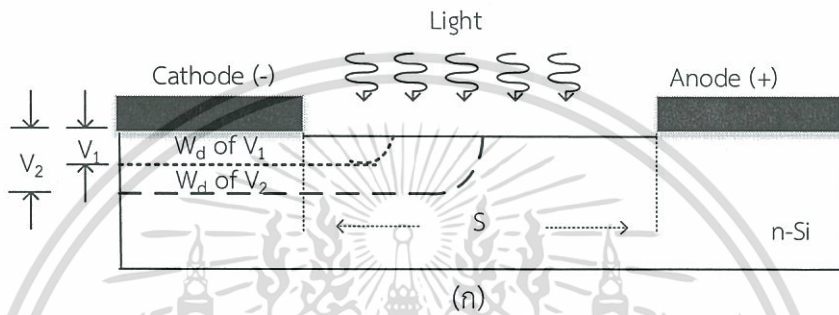
รูปที่ 2.21 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ยเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

ซึ่งความกว้างบริเวณหลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดตีก็ย กรณีที่ระยะห่าง  
 เอกสาร ระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้มีความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณหลอดพาหะที่เกิดทางด้าน  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

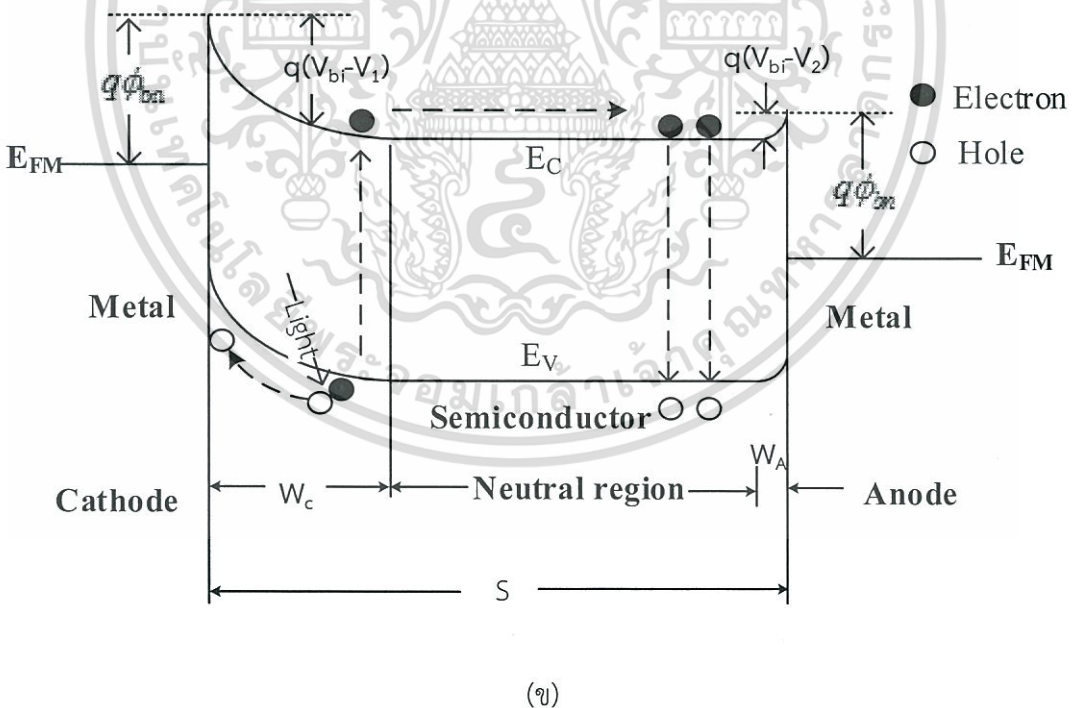
แคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นที่บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

2.6.3 โครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตักก็ยเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบ

เมื่อโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตักก็ย ได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.22 และรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.22 ภาพโฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตักก็ย เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ



รูปที่ 2.23 ภาพโฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตักก็ย เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ

(ก) ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดขณะเมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบ

(ข) ภาพแถบพลังงานของโฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตักก็ยเมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

โดยที่ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม ( $W_T$ ) ของตัวตรวจวัดแสงจะเป็นผลรวมของบริเวณปลอดพาหะทางด้านคาโทด ( $W_C$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และบริเวณปลอดพาหะทางด้านแอโนด ( $W_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.20

$$W_T = W_C + W_A \quad (2.20)$$

โดยที่

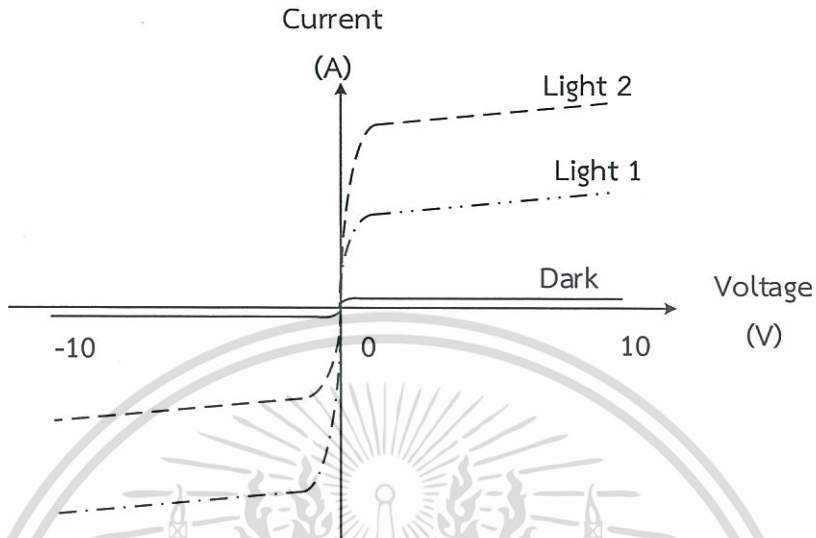
$$W_C = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.21)$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\epsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.22)$$

ลักษณะสมบัติสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มักถูกพิจารณาคือ ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

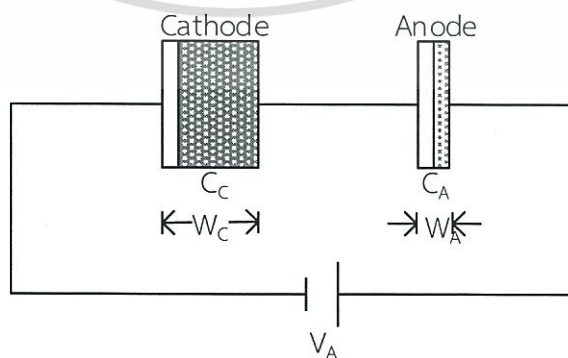
และ ลักษณะความจุไฟฟ้า-แรงดัน โดยในรูปที่ 2.24 เป็นลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดทีก็ย เมื่อได้รับความเข้มแสงตกกระทบบมีความสมมาตรกัน ทั้งด้านที่รับไปอัสตรงและไปอัสกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อได้รับค่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นด้วย



รูปที่ 2.24 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบ

ส่วนลักษณะสำคัญของค่าความจุไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดทีก็ย คือความจุไฟฟ้าที่มีความสมมาตรกัน โดยค่าความจุไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันไบแอส โดยเมื่อให้แรงดันไบแอสมากขึ้นค่าความจุไฟฟ้าจะมีคาลดลง โดยค่าความจุไฟฟ้าเมื่อได้รับแรงดันไบอัส ดังแสดงในรูปที่ 2.25 ซึ่งความจุไฟฟ้ารวม ( $C_T$ ) เกิดจากผลรวมของความจุไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ประกอบด้วยความจุไฟฟ้าทางด้านคาโทด ( $C_C$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และความจุไฟฟ้าทางด้านอโนด ( $C_A$ ) ที่ได้รับแรงดันไบอัสตรง ดังสมการที่ 2.23 นอกจากนี้ยังสามารถใช้ค่าความจุไฟฟ้าที่วัดได้เพื่อวิเคราะห์หาค่าแรงดันภายในและความหนาแน่นของอะตอมสารเจือในฐานรองซิลิคอน



รูปที่ 2.25 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดซีดทีก็ย

เมื่อได้รับแรงดันไบอัส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และความจุไฟฟ้ารวมเท่ากับ

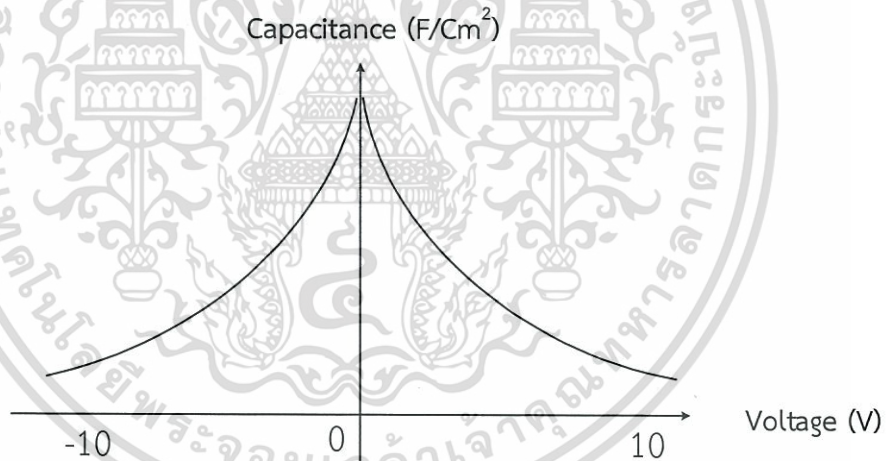
$$C_T = \frac{C_C C_A}{C_C + C_A} \quad (2.23)$$

โดยที่

$$C_C = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} - V_A)}} \quad (2.24)$$

$$C_A = \sqrt{\frac{2q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} + V_A)}} \quad (2.25)$$

และในรูปที่ 2.26 แสดงลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดที่กึ่งตัวนำที่มีลักษณะสมมาตรกันและเมื่อได้รับแรงดันไบอัสความจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลง



รูปที่ 2.26 ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า - แรงดันตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดที่กึ่งตัวนำ

## บทที่ 3

### กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดขั้นตอนของเทคนิคการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู การออกแบบลวดลาย การสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูและการทดสอบเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของโฟโตไดโอด ชนิด AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูหรือ UMSM ในการศึกษาได้ออกแบบการทดลองโดยแยกออกเป็นสามส่วนหลักๆคือ หนึ่งเทคนิคการออกแบบโครงสร้างร่องรูปตัวยูเพื่อให้มีพื้นที่รับแสงมากกว่าแบบเชิงราบ และสองการออกแบบลวดลายรวมถึงการสร้างโฟโตไดโอด ชนิด AL/n-Si/Al หรือ UMSM โดยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มบนพื้นผิวซิลิคอนและพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้สารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (Potassium Hydroxide: KOH) และสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetra methyl Ammonium Hydroxide:TMAH) โดยใช้การกัดแบบแอนไอโซทรอปิก เพื่อเปรียบเทียบการตอบสนองทางแสงของพื้นผิวทั้งสองลักษณะ จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการเติมผงซิลิคอนเพื่อช่วยลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมจากสารละลาย ซึ่งงานในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้ใช้หน้ากากป้องกันในการกัดอะลูมิเนียมคือ  $\text{SiO}_2$  ที่ทำการสร้างด้วยกระบวนการ PECVD และในที่สุดท้ายศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยทำการสร้างลงบนแผ่นซิลิคอนชนิด Czochralski silicon (CZ) ที่มีสภาพต้านทาน  $10 \Omega\cdot\text{cm}$  ความหนา  $625 \mu\text{m}$  หลังจากเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างเรียบร้อยแล้วจะทำการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงต่อไป

#### 3.1 เทคนิคการออกแบบโครงสร้างร่องรูปตัวยู

เนื่องจากโฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่เปลี่ยนแปลงพลังงานจากแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ซึ่งจะเกิดขึ้นกับสารกึ่งตัวนำที่มีศักย์ไฟฟ้าภายใน (Built-in Potential) ที่เกิดจากรอยสัมผัสสองรอยขั้วสัมผัสของโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ และบริเวณศักย์ไฟฟ้าภายในที่เกิดขึ้นจะเป็นบริเวณปลอดพาหะซึ่งจะเป็นส่วนที่แยกอิเล็กตรอนอิสระและโฮลอิสระที่เกิดจากการกระตุ้นของแสงและออกสู่วงจรรายนอกและในการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดเพื่อใช้เพิ่มพื้นที่รับแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM จะคำนึงถึงระยะบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) เป็นปัจจัยแรก ซึ่งกระแสแสงจะมีความสัมพันธ์กับบริเวณปลอดพาหะตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มมากขึ้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.1.1 การคำนวณความลึกของร่องรูปตัวยู

การหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะสามารถจากสมการที่ 1 พบว่าที่แรงดัน 5 V และ 10 V ค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะอยู่ที่ 3.96  $\mu\text{m}$  และ 5.48  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ (ผลจากการคำนวณทั้งหมดจะถูกอธิบายอีกครั้งไว้ในบทที่ 4)

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

โดยที่

$w_D$  คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

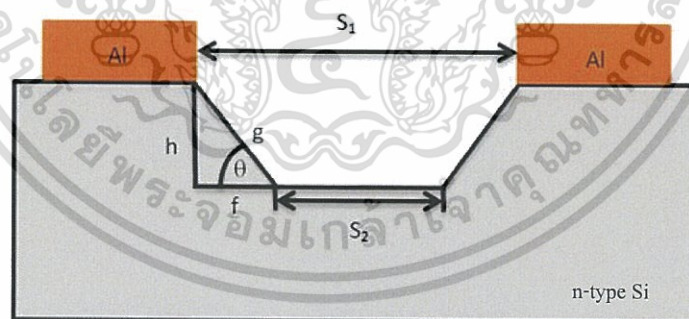
$\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิวิตีของสารกึ่งตัวนำ

$V_{bi}$  คือ แรงดันภายใน

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส

$N_D$  คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ

ดังนั้นความลึกของร่องรูปตัวยูจึงไม่ควรลึกเกินค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นการกัดร่องรูปตัวยูจึงเป็นตัวแปรถัดมาที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่ง



รูปที่ 3.1 ภาพภาคตัดขวางโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al

จากการคำนวณค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะทำให้เรากำหนดความลึกในการกัดให้เป็นร่องรูปตัวยูได้ประมาณ 4  $\mu\text{m}$  ไม่เกิน 5  $\mu\text{m}$  และทำการคำนวณหาพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้นของร่องรูปตัวยู (ด้าน g) โดยใช้การคำนวณทางตรีโกณมิติจากสมการที่ 2 และสมการที่ 3 และใช้ความลึก (h) จากค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะประมาณ 4  $\mu\text{m}$  โดยใช้มุม 54.7° (เป็นมุมในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก) [44] พบว่าโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (ด้าน g) มีพื้นที่รับแสงมากกว่าโครงสร้าง

แบบเชิงราบประมาณ 1.73 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.1. เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

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

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

โดยที่

$h$  คือ ความลึกในการกัด

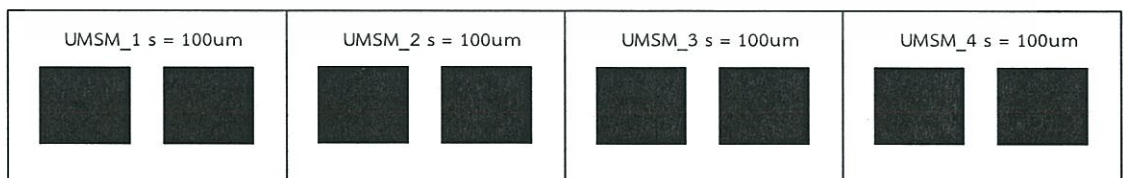
$f$  คือ พื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ

$g$  คือ พื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

### 3.2 ลวดลายสำหรับการสร้างโฟโตไดโอด

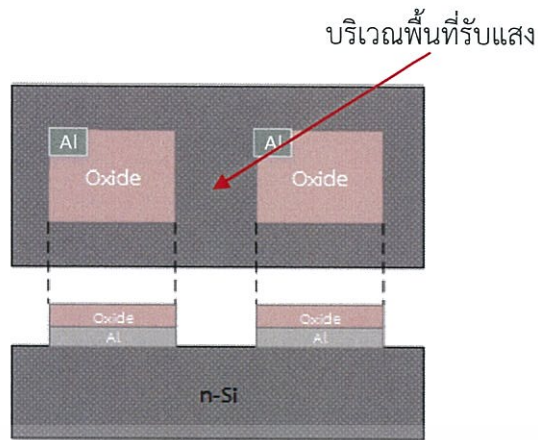
ในการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเพื่อทำการสร้างตัวตรวจวัด การออกแบบนั้นต้องคำนึงถึงเงื่อนไข และข้อจำกัดต่างๆที่ต้องการการศึกษา ในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบเป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (positive) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X5 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ออกแบบทำการสแกนด้วยเลเซอร์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

โครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสชนิดตีก็ย 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ  $1 \text{ mm}^2$  มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านมีขนาด  $100 \mu\text{m}$  ดังแสดงในรูปที่ 3.2 และ รูปที่ 3.2 แสดงลวดลายกระจกต้นแบบของโฟโตไดโอดโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดตีก็ย การออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบยังเป็นตัวกำหนดให้ลักษณะการกัดของสารละลาย KOH ซึ่งมีการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกจึงส่งผลให้ตัวตรวจวัดแสงที่ได้มีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยู หรือ U Shaped Groove [9]



รูปที่ 3.2 ภาพการออกแบบลวดลายกระจกต้นแบบของโฟโตไดโอด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.3 ภาพภาคตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ ชนิด AL/n-Si/Al

### 3.3 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ชนิด AL/n-Si/Al ในงานวิจัยนี้ถูกสร้างขึ้นที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโฟโตไดโอดที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) สภาพความต้านทาน  $10 \Omega \cdot \text{cm}$  ความหนา  $625 \mu\text{m}$  ระยะห่างระหว่างขั้ว  $100 \mu\text{m}$  ขนาดขั้ว  $1 \times 1 \text{ mm}^2$

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด ชนิด AL/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ประกอบด้วยกระบวนการสร้าง 5 กระบวนการคือ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, กระบวนการอาร์เอฟสปีดเตอริงเพื่อสร้างชั้นโลหะอลูมิเนียม, กระบวนการ PECVD ใช้สร้างซิลิคอนไดออกไซด์บนผิวของอลูมิเนียมเพื่อใช้เป็นหน้ากักป้องกันในการกัดอะลูมิเนียม, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายตัวตรวจวัดแสง และกระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยูโดยใช้การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกโดยแต่ละขั้นตอนนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 3.3.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะทำเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด และถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจส่งผลทำให้เกิดข้อผิดพลาดตอนขึ้นลวดลายและประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงลดลงได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อัลตราโซนิค (ultrasonic) แผ่นผลึกซิลิคอนในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (de-ionization water: DI water) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดปिरันยา ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$ : piranha) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid: HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native oxide) บนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในอากาศ
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 3.2.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม

ในกระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมจะสร้างด้วยวิธีอีวีแมกนีตรอนสปัตเตอร์ริง เป็นกระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมให้มีความหนา 2 ไมโครเมตร โดยอาศัยหลักการที่อะตอมของผิวหน้าสารเคลือบซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นเป้าถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง เช่น อนุภาคของก๊าซอาร์กอน ( $\text{Ar}^+$ ) จากนั้นอะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะวิ่งมาเคลือบบนแผ่นผลึกซิลิคอน

### 3.3.3 กระบวนการ PE-CVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition)

การปลูกฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมาใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ  $<400\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นวิธีการปลูกชั้นฟิล์มบางที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสถานะก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์การปลูกฟิล์มวิธีนี้ใช้หลักการพลาสมาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ จึงทำให้สามารถปลูกชั้นฟิล์มที่อุณหภูมิต่ำ ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ )

### 3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

ในกระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงานเพื่อสร้างลวดลายขั้วโลหะ อะลูมิเนียมด้วยกระจกต้นแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบจะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง เมื่อนำไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นออก ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่องปรับชั้นมาร์ก (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ชั้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer)
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- กัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลาย BOE
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยแก๊สไนโตรเจน
- กัดชั้นอะลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลายผสมกรดฟอสฟอริก
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออกด้วยอะซิโตน
- ล้างในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

### 3.3.5 การเตรียมสารเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

เพื่อทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งจะใช้สารละลายเคมีซึ่งมีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงที่ต้องการเปิดลวดลายออก สารละลายที่ใช้ในการกัด เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer) ทำได้โดยการเตรียม HF : NH<sub>4</sub>F ในอัตราส่วน 1 : 5 จะมีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ 1000 Å/min

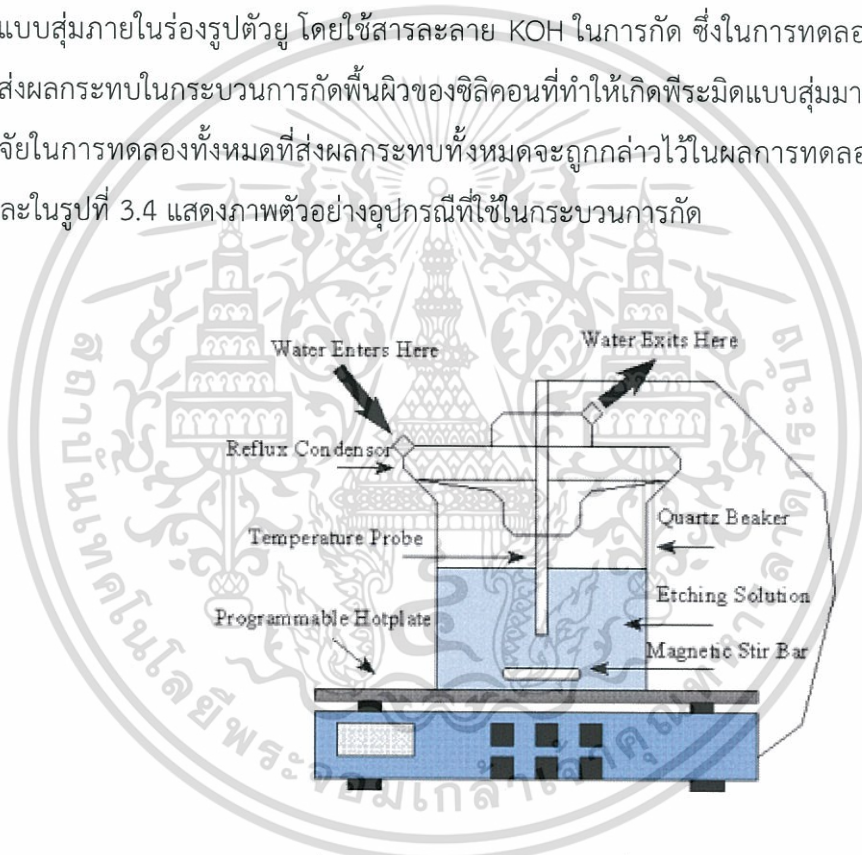
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3.6 การเตรียมสารเคมีกัดชั้นอลูมิเนียม

สารละลายที่ใช้กัดชั้นอะลูมิเนียม (Al etching) จะเป็นส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกเป็นหลัก ทำได้โดยการเตรียม  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{DI}$  ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ใช้อุณหภูมิในการกัด 40 °C เป็นเวลาประมาณ 20-30 วินาที

### 3.3.7 กระบวนการกัดพื้นผิวซิลิคอน

ในงานวิจัยนี้จะแบ่งลักษณะพื้นผิวภายในร่องรูปตัวยูของชิ้นงานออกเป็นสองลักษณะด้วยกัน นั่นคือพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้สารละลาย TMAH 25% wt + IPA ในการกัด และพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH ในการกัด ซึ่งในการทดลองจะทำการหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอนที่ทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่มมากที่สุด เงื่อนไขและปัจจัยในการทดลองทั้งหมดที่ส่งผลกระทบต่อทั้งหมดจะถูกกล่าวไว้ในผลการทดลองไว้ในบทที่ 4 ต่อไป และในรูปที่ 3.4 แสดงภาพตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด



รูปที่ 3.4 ภาพตัวอย่างอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด

### 3.3.8 การเตรียมสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดผิวซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยู

ในการเตรียมสารละลายสิ่งแรกที่ต้องคำนึงถึงคือการแยกภาชนะที่ใช้ของสารละลายแต่ละชนิด และในการทดลองนี้จะกล่าวถึงการเตรียมสารละลาย KOH เพียงเท่านั้น เนื่องจากในการกัดพื้นผิวซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยูแบบเรียบ โดยใช้สารละลาย TMAH ที่ทำการเติมสารละลาย IPA ผู้ทำการทดลองได้ใช้เงื่อนไขในกระบวนการกัดแบบผิวเรียบจากผู้ที่เคยทำการวิจัยมาก่อนหน้านี้แล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 การเตรียมสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการกัดพื้นผิวซิลิคอนจนเกิดเป็นพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู

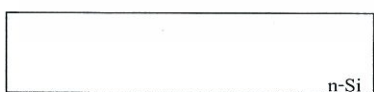
ความเข้มข้นของสารละลาย	ปริมาณสาร (g)	ปริมาตรน้ำ (ml)
KOH 10 %wt	27.777	250
KOH 15 %wt	44.117	250
KOH 20 %wt	62.500	250
KOH 25 %wt	83.333	250
KOH 30 %wt	107.142	250
KOH 40 %wt	166.666	250

### 3.3.9 กระบวนการซินเตอร์ริง

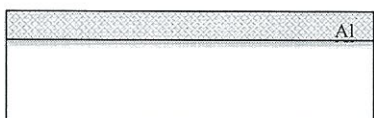
กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering) เป็นกระบวนการที่ทำให้การสัมผัสของอะลูมิเนียมและซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ โดยปกติแล้วจะนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในบรรยากาศของไนโตรเจน ที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 0.7 ลิตร/นาที เป็นเวลา 15 นาที ที่อุณหภูมิ 500 °C แต่สำหรับการศึกษาในกระบวนการสร้างรอยสัมผัส จากการทดลองพบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการซินเตอร์ริงจะเป็นเงื่อนไขที่สำคัญที่เป็นตัวกำหนดว่ารอยสัมผัสที่ได้เป็นรอยสัมผัสแบบข้อต่อตึกหรืออัลลอย ดังนั้นในการทดลองขั้นตอนนี้จึงทำการซินเตอร์ริงที่ อุณหภูมิ 500 °C จากนั้นจึงนำชิ้นงานที่ได้ไปวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าต่อไป

โดยกระบวนการสร้างต่างๆ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.5

### 3.3.10. กระบวนการสร้าง



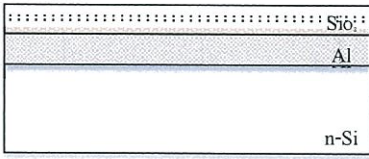
ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน



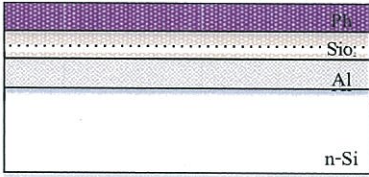
สร้างชั้นอะลูมิเนียมหนา 2 um ด้วย RF-sputtering



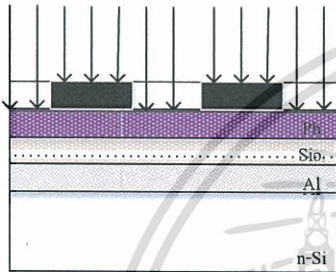
เอกสารนี้เป็นรูปที่ 3.5 กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al ใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



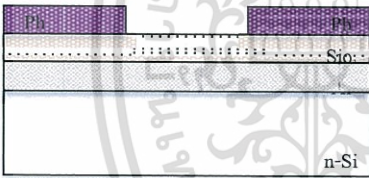
สร้างซิลิคอนไดออกไซด์ด้วย PE-CVD



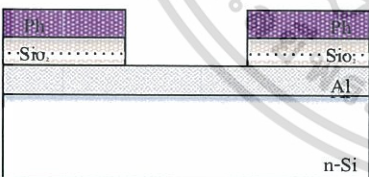
เคลือบน้ำยาไวแสงเบอร์ AZ 1350



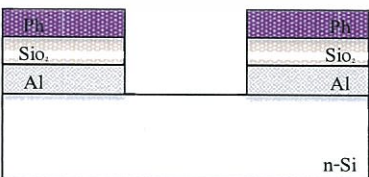
ฉายแสง UV ผ่านกระจกต้นแบบ



ชั้นลวดลายด้วยน้ำยา Developer



กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกด้วยน้ำยา BOE

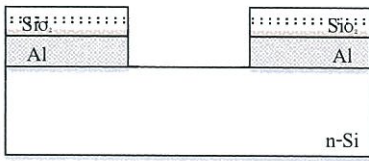


กัดชั้นอะลูมิเนียมออกด้วยน้ำยาลอกอะลูมิเนียม

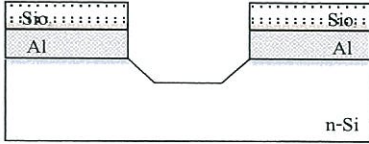


รูปที่ 3.5 (ต่อ) กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al

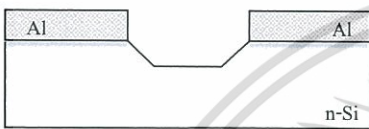
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออกจากด้วย Acetone



ทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนตามเงื่อนไขที่กำหนด

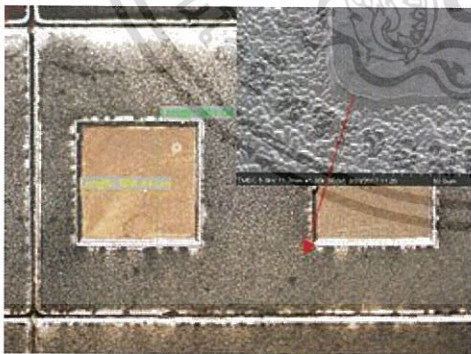


ลอกชั้นออกไซด์ที่เหลือออกจากด้วย BOE

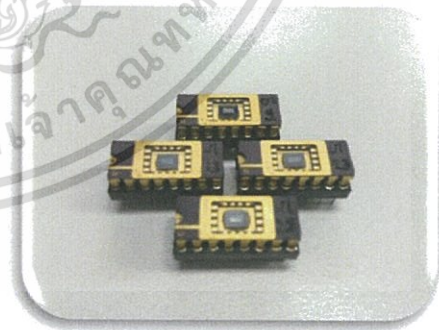


รูปที่ 3.5 (ต่อ) กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างทั้งหมดจะมีลักษณะดังรูปที่ 3.6 จากนั้นจะนำชิ้นงานไปตัดแยกออกจากกัน โดยชิ้นงานจะถูกนำไปเชื่อมต่อขา ดังรูปที่ 3.6 (ข) เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงต่อไป



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.6 (ก) ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt

(ข) ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำไปเชื่อมต่อขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงลำดับขั้นตอนของผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลองเกี่ยวกับการเพิ่มกระแสของโพโตไดโอดแบบ UMSSM โดยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มในร่องรูปตัวยู ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้าง  $AV/n\text{-Si}/Al$  โดยทำการสร้างลงบนแผ่นซิลิคอนชนิด Czochralski silicon (CZ) ที่มีสภาพต้านทาน  $10 \Omega\cdot\text{cm}$  ความหนา  $625 \mu\text{m}$  ตามรายละเอียดการสร้างที่กล่าวไว้ในบทที่ 3 การศึกษาบทนี้ได้ออกแบบการทดลองแยกออกเป็นสามส่วนหลักๆ เริ่มจากการออกแบบโครงสร้างของโพโตไดโอด โดยจะศึกษาจากสมการหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเพื่อกำหนดความลึกที่ใช้ในกระบวนการกัด และทำการหาเงื่อนไขหรือปัจจัยที่เหมาะสมในกระบวนการกัดเพื่อให้ได้พื้นผิวที่ต้องการ ในการทดลองนี้จะใช้กระบวนการกัดแบบเปียก โดยใช้สารเคมีที่มีคุณสมบัติในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกนั่นก็คือ เทตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) และ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เพื่อกัดพื้นผิวซิลิคอนในร่องรูปตัวยูให้มีลักษณะพื้นผิวเรียบและพื้นผิวที่มีการเกิดของพีระมิดแบบสุ่มตามลำดับ ดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไว้ในบทที่ 2 สำหรับแบบผิวเรียบจะใช้เงื่อนไขในการเปลี่ยนแปลงปัจจัยทั้งหมดจากผู้ที่เคยทำการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ [45] ในส่วนที่สองจะเป็นการเปรียบเทียบลักษณะกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดขณะได้รับแสงตกกระทบบและไม่ได้รับแสงตกกระทบบ ซึ่งในการศึกษานี้จะทำการสร้างโพโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบค่ากระแสแสงกับโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSSM) ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู หลังจากทำการทดลองพบว่าการสร้างโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูมีค่ากระแสรั่วอยู่ในเกณฑ์ที่สูง ส่วนที่สามจะเป็นการปรับปรุงกระแสรั่วของโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูโดยการซินเตอร์ริง (Sintering) และทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน รวมถึงค่าความจุไฟฟ้าของโพโตไดโอด

#### 4.1 การศึกษาเทคนิคออกแบบโครงสร้างของโพโตไดโอด

เนื่องจากโพโตไดโอดเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสง ซึ่งมีการประยุกต์ใช้กับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ โดยทำหน้าที่หลักคือเปลี่ยนแปลงพลังงานจากแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า [46] เมื่อนำโพโตไดโอดมาสร้างเป็นอุปกรณ์จึงจำเป็นต้องเลือกโครงสร้างที่เหมาะสมเพราะตัวโพโตไดโอดเองก็มีโครงสร้างหลายลักษณะด้วยกัน เช่น พีเอ็นโพโตไดโอด, พินโพโตไดโอด [47] เป็นต้น เพราะฉะนั้นการเลือกใช้โพโตไดโอดว่าจะเป็นโครงสร้างแบบใดหรือสร้างจากวัสดุชนิดไหนจะขึ้นอยู่กับงานที่จะนำไปประยุกต์ใช้

การสร้างโพโตไดโอดในงานวิจัยนี้ได้ทำการออกแบบโครงสร้างของโพโตไดโอด โดยจะคำนึงถึงค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion region) เป็นปัจจัยแรก ซึ่งกระแสแสงจะมีความสัมพันธ์กับค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มมากขึ้น [48] กล่าวคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อให้แรงดันไบอัสแก่รอยสัมผัสมากขึ้นค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะก็จะกว้างมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.1 เราสามารถคำนวณหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจากได้สมการที่ 4.1 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของแรงดันไบอัสกับค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ พบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับที่ 5 V และ 10 V ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะอยู่ที่ 3.96  $\mu\text{m}$  และ 5.48  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

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

โดยที่  $\varepsilon_s$  คือ ค่าเปอมีนิตีของสารกึ่งตัวนำ

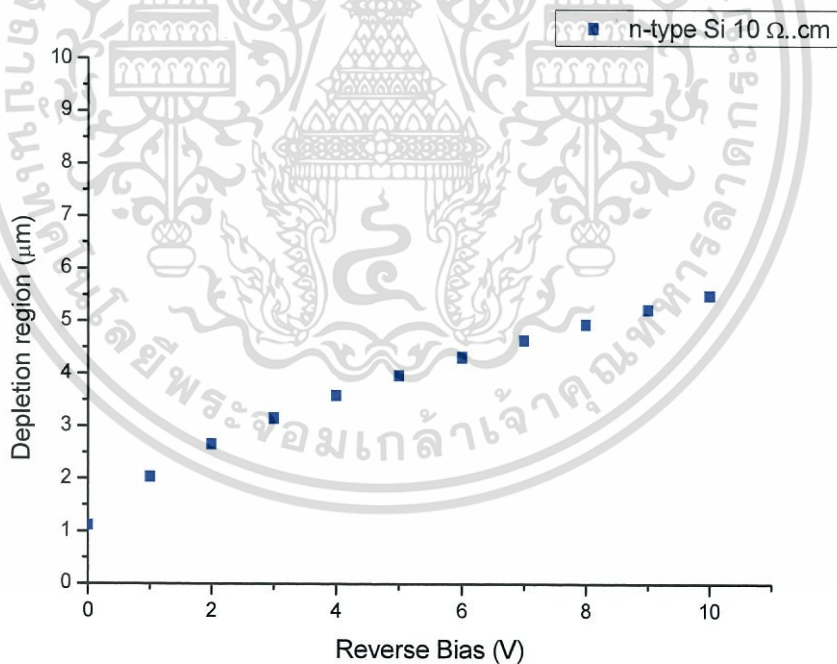
$N_D$  คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$  คือ แรงดันภายในของสารกึ่งตัวนำ

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส

$W$  คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าประมาณ  $1.609 \times 10^{-19}$  C



รูปที่ 4.1 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของแรงดันไบอัสกับค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนี้จะเป็นตัวกำหนดความลึกในการกัดร่องรูปตัวยู สำหรับการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอด เพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงตามที่ต้องการ จากการคำนวณ

ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะทำให้เราสามารถกำหนดความลึกในการกัดให้เป็นร่องรูปตัวยูได้ ประมาณ  $4 \mu\text{m} - 5 \mu\text{m}$

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเทคนิคการแบบเปียก ซึ่งใช้สารละลายที่มีคุณสมบัติในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก [49] เป็นที่นิยมใช้กันมากและออกแบบโครงสร้างจากกระบวนการสร้างเทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค (Micro Electro Mechanical Systems : MEMS) [50] มาประยุกต์ใช้ จากนั้นทำการคำนวณหาพื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้น (ด้าน  $g$ ) โดยทำการคำนวณทางตรีโกณมิติจากสมการที่ 4.3 และสมการที่ 4.4 และใช้ความลึก ( $h$ ) เมื่อทราบค่าต่างๆแล้วเราสามารถหาความกว้างของกันหลุมได้จากสมการที่ 4.2 จากค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะประมาณ  $4 \mu\text{m}$  โดยใช้มุม  $54.7^\circ$  (เป็นมุมในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก) [9] พบว่าพื้นที่รับแสงของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (ด้าน  $g$ ) มีพื้นที่รับแสงมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบ (ด้าน  $f$ ) ถึง 1.7 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 4.2

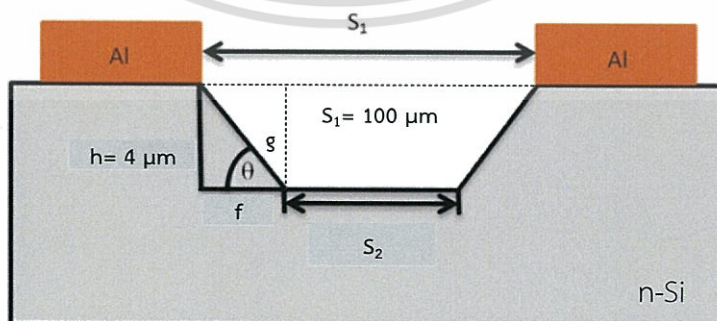
$$S_2 = S_1 - 2h \times \cot\theta \quad (4.2)$$

$$\frac{h}{g} = \sin\theta \quad (4.3)$$

$$\frac{f}{g} = \cos\theta \quad (4.4)$$

$$\frac{h}{f} = \tan\theta \quad (4.5)$$

- โดยที่  $S_2$  คือ ระยะห่างระหว่างร่องรูปตัวยูในกันหลุม  
 $S_1$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้ว มีค่าเท่ากับ  $100 \mu\text{m}$   
 $\theta$  คือ มุมของร่องรูปตัวยู มีค่าเท่ากับ  $54.7^\circ$  (มุมในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก)  
 $h$  คือ ความลึกในการกัด มีค่าเท่ากับ  $4 \mu\text{m}$   
 $f$  คือ พื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ  
 $g$  คือ พื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นความลึกของร่องรูปตัวยูจึงไม่ควรลึกเกินค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นการกัดร่องรูปตัวยูจึงเป็นตัวแปรถัดมาที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่ง

#### 4.2 การศึกษาปัจจัยทางกายภาพที่ส่งผลกระทบต่อพื้นผิวของซิลิคอน

ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปัจจัยทางกายภาพในกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอน ซึ่งในกระบวนการกัดพื้นผิวซิลิคอนจะมีความสัมพันธ์ระหว่างกระบวนการกัดกับปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัด ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลกระทบในกระบวนการกัดขึ้นงานมีอยู่หลายปัจจัยด้วยกันยกตัวอย่างเช่น ความเข้มข้นของสารละลาย, ความเป็นกรดด่าง, จุดบกพร่องของผลึก, สภาพแวดล้อม, อุณหภูมิ เป็นต้น [51] โดยในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม เพื่อใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพทางแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง AV/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู จึงจำเป็นต้องหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบในการกัดที่สามารถทำให้เกิดขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่ดีที่สุด ซึ่งจากการศึกษาในงานวิจัยที่ผ่านมาเราพบว่าปัจจัยที่ส่งผลกระทบมากและสามารถควบคุมได้ง่ายที่สุด คือ ปัจจัยทางความเข้มข้นของสารละลาย, ปัจจัยทางความเร็วรอบในการกวนสาร, ปัจจัยทางอุณหภูมิ เราจึงนำปัจจัยเหล่านี้มาทำการเปลี่ยนแปลงค่าต่างๆเพื่อให้ได้ค่าที่ดีที่สุดในการทำให้เกิดขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่ม

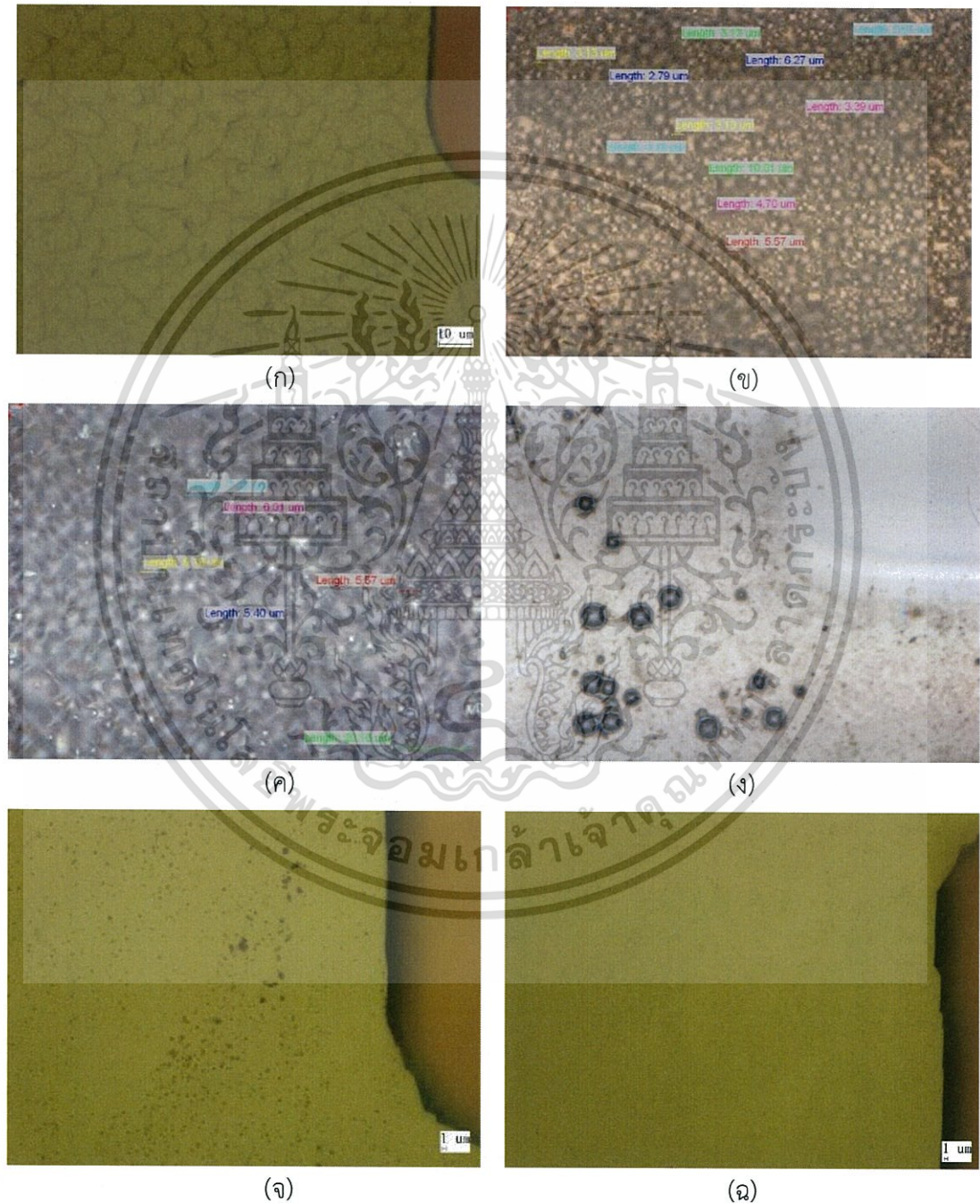
##### 4.2.1 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย KOH

ในการทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาความเข้มข้นที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอน จนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสมที่สุด การทดลองแรกจะออกแบบ โดยคงอุณหภูมิที่ 80°C และใช้ความเร็วในการกวนสารอยู่ที่ 200 รอบต่อนาที ใช้เวลาในกระบวนการกัด 10 นาที ในการทดลองนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย KOH เป็น 10, 15, 20, 25, 30 และ 40%wt การเตรียมสารจะถูกกล่าวไว้ในบทที่ 3

จากรูปที่ 4.3 ภาพถ่ายพื้นผิวของซิลิคอนหลังกระบวนการกัดโดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลาย KOH ด้วยกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15, 20 และ 25 %wt ทำการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนเกิดเป็นพีระมิดแบบสุ่ม แต่เมื่อพิจารณาถึงการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มกลับมีเพียงความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20 %wt เท่านั้นที่ทำการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนมีขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข) และ รูปที่ 4.3 (ค) ตามลำดับ เนื่องจากพีระมิดแบบสุ่มเกิดจากปฏิกิริยาในการกัดที่มีหลายปัจจัยมาเกี่ยวข้อง แต่ปัจจัยทางความเข้มข้นของสารละลายจะมีความสำคัญในการกำหนดเป็นอย่างแรกเพราะเมื่อเกิดปฏิกิริยาในการแตกตัวของสารละลาย KOH จะทำให้ได้อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน และอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนนี้เองจะไปจับตัวกับอะตอมของซิลิคอนจนทำให้เกิดเป็นรูปร่างของพีระมิดแบบสุ่ม ซึ่งเป็นคุณสมบัติของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 ปริมาณของไฮดรอกไซด์ไอออนจะมากหรือน้อยก็

เอกสาร...  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จะขึ้นอยู่กับปริมาณของ KOH ที่เจือจางในน้ำและถ้าหากเติมปริมาณของ KOH มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดการแตกตัวของอะตอมระหว่าง โพแทสเซียม ( $K^+$ ) กับ ไฮดรอกไซด์ ( $OH^-$ ) ซ้ำลง (ดังแสดงในสมการปฏิกิริยาเคมีที่ 4.10 จะส่งผลทำให้อัตราการกัดลดลงและไม่ทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 4.3 (จ) และรูปที่ 4.3 (ฉ) เพราะเนื่องจากการทดลองนี้ใช้เวลาในการกัดเพียง 10 นาที และสารละลาย KOH ที่มีความเข้มข้นของสารละลายสูงก็จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาในการแตกตัวของสารละลายสูงตามไปด้วย [52]



ภาพที่ 4.3 ภาพถ่ายจากกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงให้เห็นพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้นต่างๆ

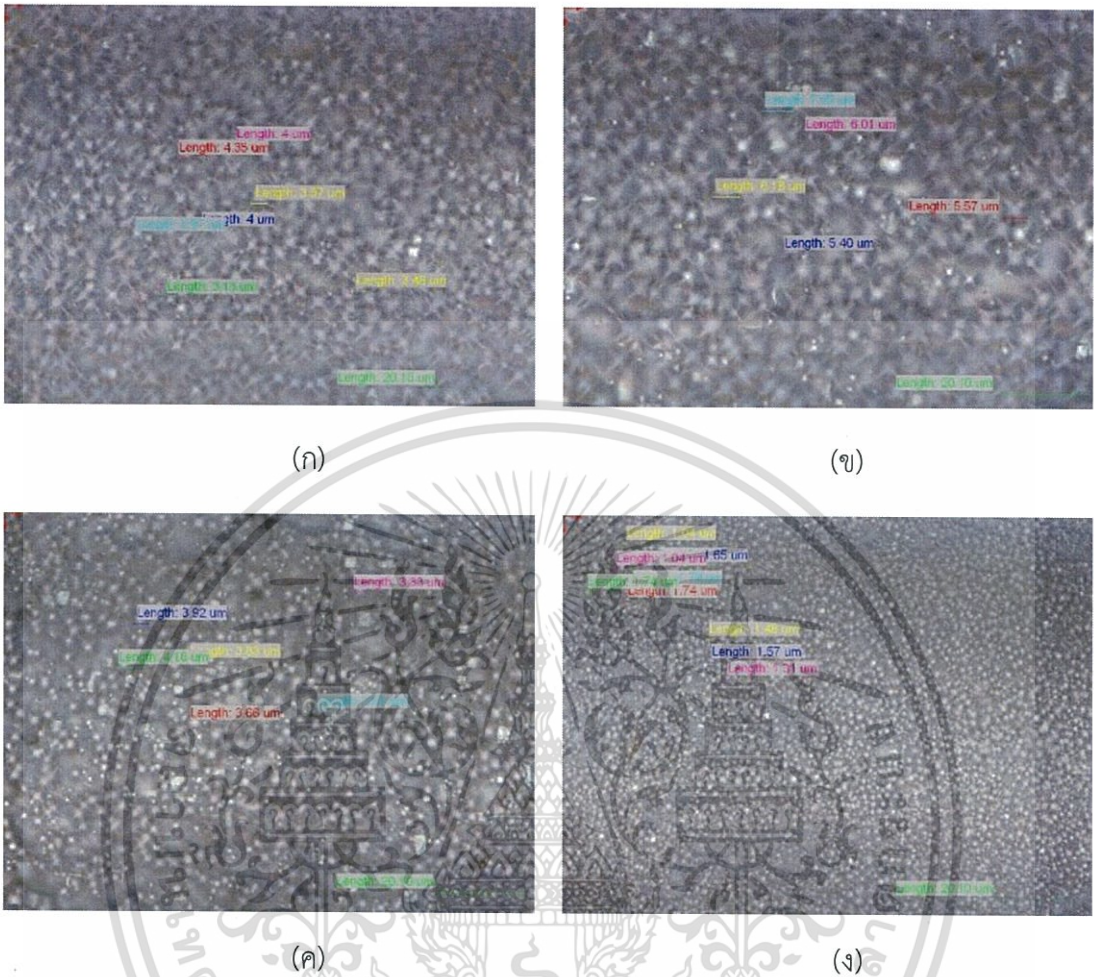
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(ก) สารละลาย KOH 10 %wt (ข) สารละลาย KOH 15 %wt (ค) สารละลาย KOH 20 %wt  
 (ง) สารละลาย KOH 25 %wt (จ) สารละลาย KOH 30 %wt (ฉ) สารละลาย KOH 40 %wt

#### 4.2.2 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย KOH โดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการกวนสาร

จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงความเข้มข้นของสารละลาย KOH ที่เหมาะสมในกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสม โดยในการทดลองนี้จะยกความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt มาใช้ในการทดลองจะทำการคงที่อุณหภูมิไว้กับระยะเวลาในกระบวนการกัดไว้เท่าเดิมคือที่ 80 °C และ 10 นาที ตามลำดับ วัตถุประสงค์ในการทดลองนี้จะเป็นการหาความเร็วรอบในการกวนสารที่ส่งผลกระทบต่อในการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่ม โดยจะทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการกวนสารเป็น 100, 200, 300 และ 400 รอบต่อนาที

ในรูปที่ 4.4 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนหลังกระบวนการกัดโดยการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการกวนสารด้วยกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าความเร็วรอบในการกวนสารที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนเกิดการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่ 200 รอบต่อนาที ดังแสดงในรูปที่ 4.4 (ข) เนื่องจากการกระจายตัวของพีระมิดเกิดจากปฏิกิริยาการแพร่ในกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอน ความเร็วรอบในการกวนสารจะส่งผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH ใกล้เคียงกันทั้งระบบ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อปฏิกิริยาการแพร่ของสารละลาย เมื่อเกิดปฏิกิริยาในการแตกตัวของสารตั้งต้นหรือก็คือสารละลาย KOH จะทำให้ได้ไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) ดังสมการแสดงปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 4.6 อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนจะแพร่เข้าสู่เนื้อของซิลิคอนและจะจับอะตอมของซิลิคอน ซึ่งในขั้นตอนนี้เราเรียกว่าการกัดหรือการสกัด การเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกัด คือกระบวนการที่เกิดจากสารเคมีเกิดการเปลี่ยนแปลงแล้วส่งผลให้เกิดสารเคมีชนิดใหม่ขึ้นมา ซึ่งจะมีคุณสมบัติต่างไปจากเดิม หรือกล่าวได้ว่าเมื่ออะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนจับตัวกับอะตอมของซิลิคอนจะทำให้เกิดสารใหม่ที่เรียกว่า กรดออร์โธซิลิค หรือ Silicic ( $Si(OH)_2^{+2}$ ) ดังสมการแสดงปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 4.9 และความเร็วรอบในการกวนสารยังช่วยทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนขนาดใหญ่หลุดออกจากผิวของซิลิคอนได้อีกด้วย ซึ่งในปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการกัดจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนจากการแตกตัวของน้ำ ฟองก๊าซไฮโดรเจนเปรียบเสมือนหน้ากากป้องกันในการกัด [53] จะส่งผลกระทบต่อขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดอีกด้วย และในตารางที่ 4.1 แสดงความกว้างของฐานพีระมิดแบบสุ่มที่ทำการเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการกวนสาร ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ที่อุณหภูมิ 80 °C และที่การเปลี่ยนแปลงความเร็วรอบในการกวนสาร 200 รอบต่อนาที ทำการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดความกว้างของฐานพีระมิดแบบสุ่มอยู่ที่ 4  $\mu m$  ถึง 6  $\mu m$



ภาพที่ 4.4 ภาพถ่ายจากกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงให้เห็นพื้นผิวของซิลิโคนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ที่อุณหภูมิ 80 °C

(ก) ความเร็วในการกวนสารที่ 100 rpm (ข) ความเร็วในการกวนสารที่ 200 rpm

(ค) ความเร็วในการกวนสารที่ 300 rpm (ง) ความเร็วในการกวนสารที่ 400 rpm

ตารางที่ 4.1 ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงความเร็วในการกวนสารของสารละลาย KOH 20 %wt กับความกว้างของฐานพีระมิดแบบสุ่ม

ความเร็วรอบในการกวนสาร (รอบต่อนาที)	100	200	300	400
ความกว้างของฐานพีระมิด ( $\mu\text{m}$ )	3-5	4-6	3-4	1-2

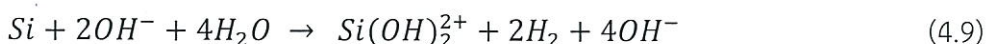
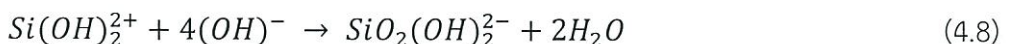
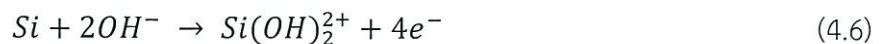
4.2.3 ลักษณะพื้นผิวซิลิโคนที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย KOH โดยการ

เปลี่ยนแปลง อุณหภูมิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการทดลองที่ผ่านมาทำให้เราทราบถึงค่าของปัจจัยที่เหมาะสมของความเข้มข้นของสารละลาย KOH และความเร็วยรอบในการกวนสารที่ทำให้เกิดขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสมที่สุดนั้นคือที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt และความเร็วยรอบในการกวนสาร 200 รอบต่อนาที โดยในการทดลองนี้จะเป็นการเปลี่ยนแปลงความร้อนที่ใช้ในการต้มสารละลายเพื่อหาผลกระทบของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อปฏิกิริยาการกัด ซึ่งจะทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 50, 60, 70, 80 และ 90 °C

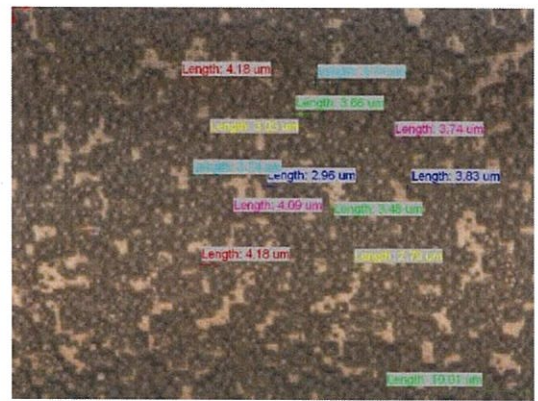
ในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนหลังกระบวนการกัดโดยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ด้วยกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า พบว่าอุณหภูมิที่ส่งผลต่อกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่มที่ดีที่สุดคือที่อุณหภูมิ 80 °C ดังแสดงในรูปที่ 4.5 (ง) และสาเหตุที่ปัจจัยทางอุณหภูมิส่งผลกระทบในกระบวนการกัดพื้นผิวของซิลิคอน อันเนื่องมาจากอุณหภูมิจะเป็นตัวช่วยในการเร่งปฏิกิริยาทางเคมีให้เร็วขึ้นและจากการใช้อุณหภูมิที่สูงยังช่วยทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนขนาดใหญ่แตกตัวได้ง่ายอีกด้วย [54] เมื่อทำการเร่งปฏิกิริยาด้วยความร้อนจะทำให้อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เกิดการแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Oxidation) ซึ่งการแตกตัวของอะตอมไฮดรอกไซด์ไอออนเปรียบเสมือนการฉีดโซล หรือการถ่ายเทอิเล็กตรอนเข้าสู่เนื้อสารของซิลิคอน จนทำให้เกิดการยกระดับสถานะพลังงานของซิลิคอนได้เป็นซิลิคอนไอออน ( $Si^+$ ) และจับตัวกับทำให้ได้สารใหม่หรือผลิตภัณฑ์ใหม่ (New produce) เรียกว่าซิลิคอนไฮดรอกไซด์ ( $SiOH^{3-}$ ) และความร้อนยังทำให้เกิดปฏิกิริยาในการแตกตัว (Decomposition) ของน้ำทำให้เกิดอะตอมของไฮโดรเจน ( $H^+$ ) หรือก็คือฟองแก๊สไฮโดรเจนกับอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) จากนั้นไฮดรอกไซด์ไอออนจะไปทำปฏิกิริยาการรวมตัว (Combination reaction) กับซิลิคอนไฮดรอกไซด์ จนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมี ซึ่งจะก่อตัวทำให้เกิดสารใหม่ เรียกว่า กรดออร์โธซิลิก (Orthosilic acid) ดังสมการปฏิกิริยาเคมีที่ 4.6 ถึงสมการที่ 4.9 ซึ่งกระบวนการนี้จะเกิดที่ผิวหน้าของซิลิคอนและจะถูกดึงออกสู่สารละลายในระบบ [26] และในตารางที่ 4.2 แสดงความกว้างของฐานพีระมิดที่ทำการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการกัด ซึ่งพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ความเร็วยรอบในการกวนสาร 200 รอบต่อนาที และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ 80 °C ทำการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดความกว้างของฐานพีระมิดอยู่ที่ 4 - 6  $\mu m$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

ภาพที่ 4.5 ภาพถ่ายจากกล้อง Optical microscope ที่กำลังขยาย 1500 เท่า แสดงให้เห็นพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20%wt

(ก) อุณหภูมิ 50 °C (ข) อุณหภูมิ 60 °C (ค) อุณหภูมิ 70 °C (ง) อุณหภูมิ 80 °C (จ) อุณหภูมิ 90 °C

ตารางที่ 4.2 ตารางแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของสารละลาย KOH 20%wt กับ ความกว้างของฐานพีระมิดแบบสุ่ม

อุณหภูมิ (°C)	50	60	70	80	90
ความกว้างของฐานพีระมิด (μm)	1-3	2-4	3-6	4-6	0.2-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 4.3 การวิเคราะห์โครงสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู

ในงานวิจัยการเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM โดยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มในร่องรูปตัวยูนี้จะทำการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่มีพื้นผิวภายในร่องรูปตัวยูเป็นสองลักษณะคือแบบแรกลักษณะผิวเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt และทำการเติมสารละลาย IAP (Isopropyl Alcohol) ซึ่งในกระบวนการกัดแบบผิวเรียบได้กล่าวไว้ตั้งแต่ข้างต้นแล้วว่าได้เงื่อนไขในการเปลี่ยนแปลงปัจจัยในการทดลองทั้งหมดจากผู้ที่เคยทำการศึกษามาแล้ว และลักษณะพื้นผิวที่สองคือพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม จากการทดลองที่ผ่านมาทำให้ทราบถึงเงื่อนไขในการเปลี่ยนแปลงปัจจัยที่ทำให้เกิดขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยของความเข้มข้นของสารละลาย KOH, ปัจจัยของความเร็วรอบในการกวนสาร, ปัจจัยทางอุณหภูมิ และค่าที่เหมาะสมนั้นคือ ที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ความเร็วรอบในการกวนสารที่ 200 รอบต่อนาทีและใช้อุณหภูมิในกระบวนการกัดที่ 80 °C

#### 4.3.1 การวิเคราะห์โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al<sub>n</sub>-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH

ในหัวข้อนี้จะเป็นการทำการทดลองเพื่อหาระยะเวลาในกระบวนการกัดที่แน่นอนเพื่อให้ได้ความลึกตรงกับค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่คำนวณไว้ในหัวข้อก่อนหน้านี้ โดยในการทดลองนี้จะทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัดเป็น 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที จากนั้นทำการหาความลึกด้วยเครื่อง Surface Profilometer model TENCOR P10 ดังแสดงให้ในรูปที่ 4.6 โดยเครื่องมือวัดความลึกนี้จะใช้ปลายเข็มขนาดเล็กลากไปบนชิ้นงานที่ต้องการวิเคราะห์ในระยะเวลาที่กำหนด จากนั้นเครื่องจะทำการแปลงค่าที่ได้จากการลากผ่านพื้นผิวเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าและแปรผลออกมาเป็นกราฟ ซึ่งการอ่านกราฟจะมีระดับอ้างอิงระดับบนสุดเมื่อนำมาลบกับระดับอ้างอิงอีกค่าหนึ่งหรือระดับล่างสุดจะทำให้ได้ความลึกหรือความขรุขระของชิ้นงาน



(ก)



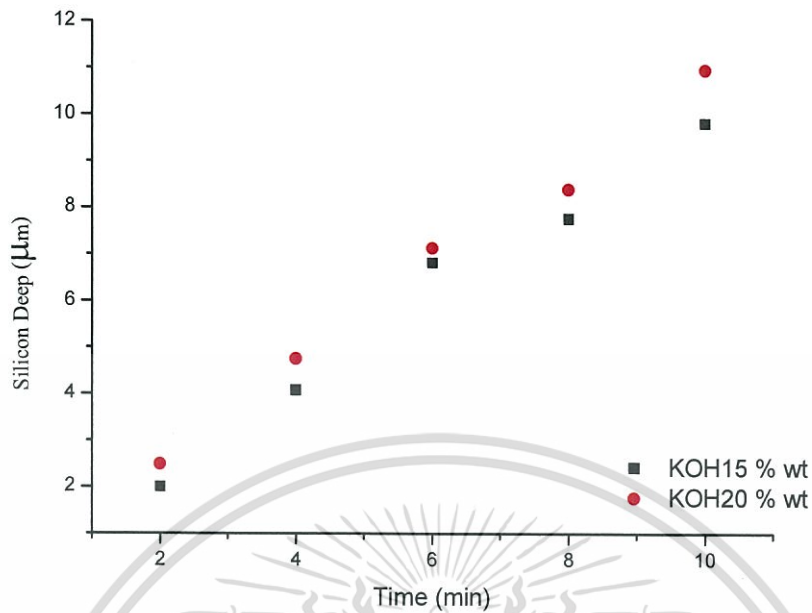
(ข)



(ค)

รูปที่ 4.6 ชุดเครื่องมือวิเคราะห์หาความลึกและความขรุขระของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) (ก) เครื่อง Surface profilometer model TENCOR P10 (ข) กราฟแสดงความลึกของโฟโตไดโอดแบบ UMSM (ค) กราฟแสดงความขรุขระ (หรือพีระมิดแบบสุ่ม) ของโฟโตไดโอดแบบ UMSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



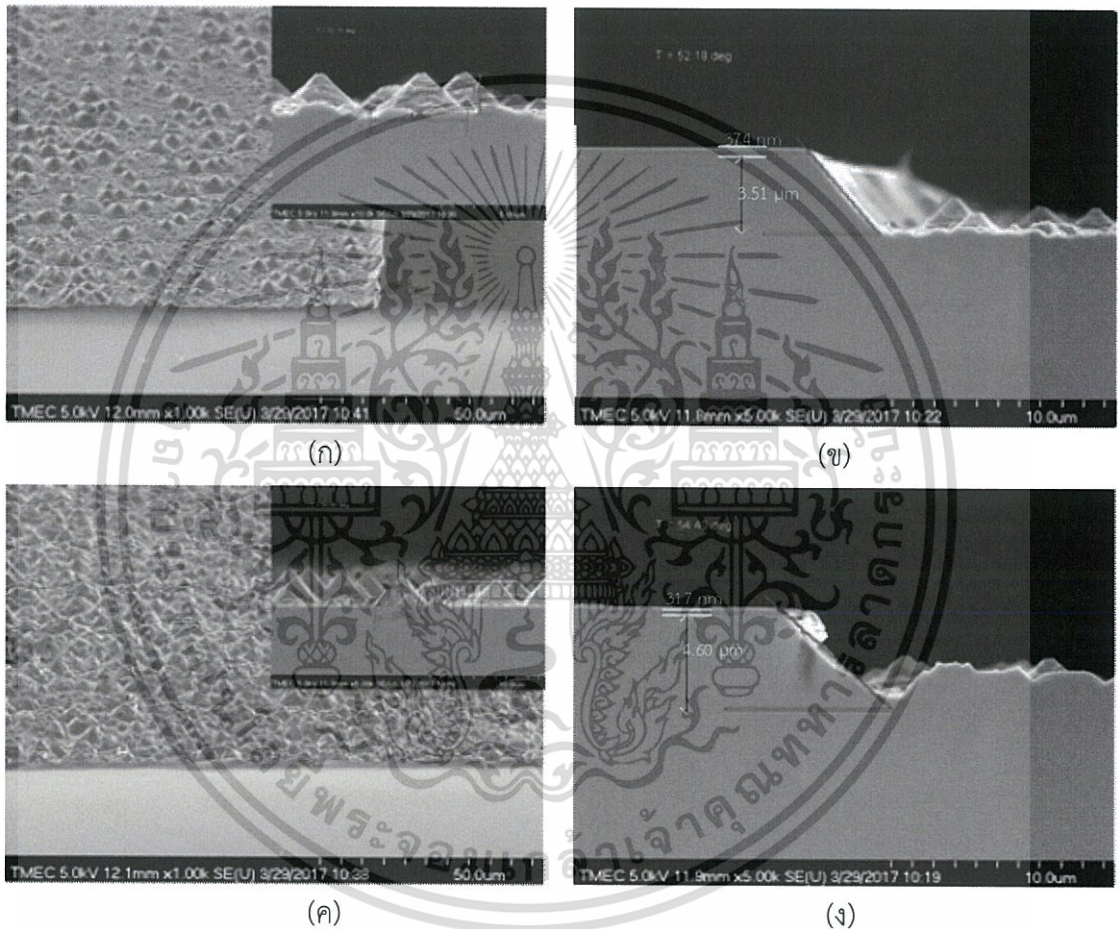
รูปที่ 4.7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับระยะเวลาที่ใช้ในการกัดด้วยความเข้มข้นสารละลาย KOH 15%wt และ 20 %wt

จากรูปที่ 4.7 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความลึกกับระยะเวลาในกระบวนการกัด พบว่าความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20 %wt มีอัตราการกัดใกล้เคียงอยู่ที่ 1-2 ไมครอนต่อนาที และที่ระยะเวลาในกระบวนการกัด 4 นาที ของทั้งสองความเข้มข้นกัดผิวของซิลิคอนได้ลึก 4 µm และ 4.6 µm ตามลำดับ เพราะฉะนั้นเราจึงสามารถกำหนดระยะเวลาในกระบวนการกัดที่ได้ความลึกแบบหยาบจากการใช้เครื่อง step profiler แต่ความลึกอาจจะไม่ใช่ความลึกที่แท้จริงจึงจำเป็นต้องทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดต่อไป

จากการศึกษาการทดลองเพื่อหาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการกัดแผ่นซิลิคอนทำให้เราทราบถึงค่าที่แน่นอนที่ทำให้กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนเกิดเป็นพีระมิดแบบส้อมที่มีขนาดและการกระจายตัวอย่างเหมาะสมพร้อมทั้งยังได้ความลึกของโครงสร้างร่องรูปตัวยูตามที่ต้องการ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างโฟโตโอดที่มีพื้นผิวสองลักษณะเพื่อนำไปใช้ในการวิเคราะห์กระแสแสงที่เกิดขึ้นคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมในร่องรูปตัวยู ในการทดลองก่อนหน้านี้ได้ใช้เพียงความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt เพียงความเข้มข้นเดียว แต่ยังพบว่ามียังอีกความเข้มข้นหนึ่งที่ใช้ค่าการเปลี่ยนแปลงปัจจัยเดียวกันจนทำให้กระบวนการกัดร่องรูปตัวยูมีขนาดและการกระจายของพีระมิดแบบส้อมตัวเช่นเดียวกันนั้น คือ ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และในกระบวนการกัดพื้นผิวแบบเรียบอย่างที่ได้เคยกล่าวไปก่อนหน้านี้คือเราจะยกค่าในการเปลี่ยนแปลงทางปัจจัยทั้งหมดมาจากผู้ที่เคยทำการทดลองไว้ก่อนหน้านี้แล้ว และในรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นถึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาพถ่ายพื้นผิวและภาคตัดขวางของซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt ที่ระยะเวลาในกระบวนการกัด 4 นาที มีลักษณะการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มในทิศทางที่ไม่เท่ากัน ซึ่งระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัดหากใช้เวลาในกระบวนการกัดน้อยเกินไปอาจส่งผลทำให้การแตกตัวของสารละลาย KOH เกิดได้ช้าลงทำให้เกิดการกัดพื้นผิวซิลิคอนไม่เท่ากันทั่วทั้งแผ่น พีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นมีขนาดฐาน  $4.46\ \mu\text{m}$  สูง  $1.82\ \mu\text{m}$  และมีความลึกอยู่ที่  $3.51\ \mu\text{m}$  ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.8 (ข) ที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt พบว่าเป็นความเข้มข้น

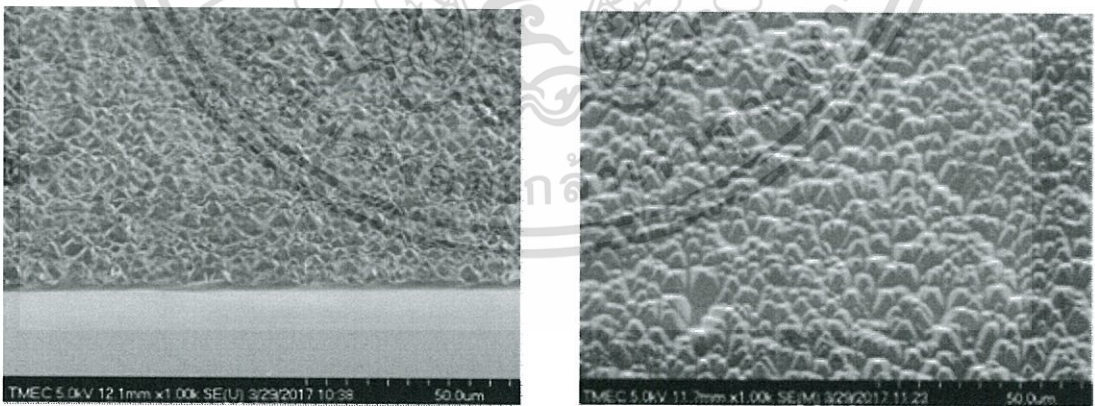


รูปที่ 4.8 ภาพพื้นผิวและภาพตัดขวางจากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 และ 5,000 เท่า

- (ก) ภาพพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt
- (ข) ภาพตัดขวางของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 15 %wt
- (ค) พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt
- (ง) ภาพตัดขวางของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่ดีที่สุดที่ทำให้เกิดลักษณะกระจายตัวของขนาดและพีระมิดแบบสุ่มเนื่องจากการเกิดของพีระมิดแบบสุ่มเนื่องจากการกระจายตัวของพีระมิดนั้นมีปัจจัยอยู่หลายอย่างหากมีความเข้มข้นของสารละลาย, อุณหภูมิ, ความเร็วรอบในการกวนสารและเวลาที่เหมาะสมจะทำให้เกิดการแตกของของสารละลาย KOH ดียิ่งขึ้นจึงทำให้เห็นลักษณะของขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มดีขึ้น แต่ปัจจัยที่กล่าวมานี้ผู้ทำการทดลองยังพบปัญหาจากอีกปัจจัยหนึ่งนั่นคือปริมาณฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยารีดักชันของน้ำฟองก๊าซไฮโดรเจนหากมีขนาดใหญ่จนเกินไปจะทำให้การกัดพื้นผิวของซิลิคอนแตกต่างกันหรือกล่าวได้ว่าฟองก๊าซไฮโดรเจนเปรียบเสมือนหน้ากากป้องกันการกัด และที่เวลาในการกัด 4 นาที ทำให้ได้พีระมิดแบบสุ่มที่มีขนาดฐาน  $4.6 \mu\text{m}$  สูง  $2.34 \mu\text{m}$  และมีความลึกอยู่ที่  $4.6 \mu\text{m}$  ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.8 (ง) จากการใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20%wt จะเห็นได้ว่าสารละลาย KOH มีการกัดที่ระนาบ (111) มากกว่าระนาบ (100) จึงทำให้การกัดเกิดเป็นพีระมิดและในการทดลองส่วนของการวิเคราะห์โครงสร้างที่ทำการเปรียบเทียบการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มบนพื้นผิวของซิลิคอนโดยใช้เวลาในกระบวนการกัดที่แตกต่างกัน ในกระบวนการกัดจะใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt และเพื่อให้เห็นความแตกต่างของการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มจะใช้ระยะเวลาในการกัดที่ 4 นาที และ 10 นาที พบว่าที่ระยะเวลาในการกัดพื้นผิวของซิลิคอนที่ 10 นาทีจะมีการกัดพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เห็นการกระจายตัวของพีระมิดได้ดีกว่าระยะเวลาในการกัดพื้นผิวของซิลิคอนที่ 4 นาที อย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.9 (ก) และรูปที่ 4.9 (ข) สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาที่นานขึ้นจะส่งผลทำให้อะตอมของสารละลาย KOH แตกตัวได้ดียิ่งขึ้นและเมื่อควบปัจจัยที่ใช้ในการกัดอย่างเหมาะสมจะทำให้ขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มใกล้เคียงกันมากยิ่งขึ้น

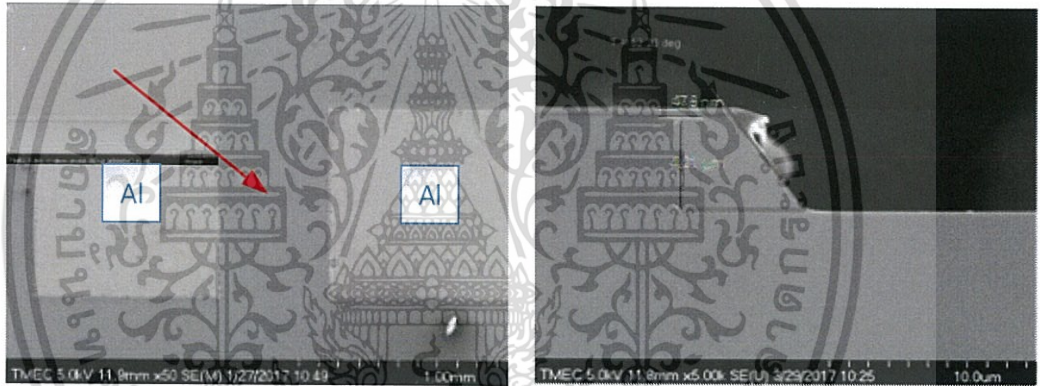


รูปที่ 4.9 ภาพถ่ายเปรียบเทียบการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มบนพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการเปลี่ยนแปลงระยะเวลาในการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดที่กำลังขยาย 1,000 เท่า โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย KOH 20 %wt ในการกัด (ก) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 4 นาที (ข) ใช้เวลาในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่ 10 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.3.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของโฟโตไดโอดโครงสร้าง AVn-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ ภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH

ในการกัดพื้นผิวในร่องรูปตัวยูแบบเรียบจะทำการกัดพื้นผิวซิลิคอน โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA ลงไปในสารละลายโดยใช้เวลาในกระบวนการกัด 15 นาที ซึ่งในการเปลี่ยนแปลงทางปัจจัยจะยกเงื่อนไขทั้งหมดจากผู้ที่เคยทำการทดลอง พบว่าในกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนเรียบขึ้นอาจมีสาเหตุมาจากจากการเติมสารละลาย IPA จะช่วยลดแรงตึงผิวของสารละลายทำให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เกิดจากปฏิกิริยาการแตกตัวของน้ำหลุดออกได้ง่ายยิ่งขึ้นและยังไม่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย KOH อีกด้วย แต่ในทางกลับกันผลกระทบจากการเติมสารละลาย IPA กลับทำให้อัตราการกัดของสารละลาย TMAH ลดลง และกัดผิวซิลิคอนลึกลงไป 4.2  $\mu\text{m}$  ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.10 สาเหตุที่สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH มีลักษณะการกัดแบบร่องรูปตัวยูได้นั้นส่วนหนึ่งเกิดมาจากการกำหนดพื้นที่ในการกัดจากกระจกต้นแบบในการสร้างและอีกส่วนหนึ่งคือคุณสมบัติ



รูปที่ 4.10 ภาพถ่ายพื้นผิวและภาคตัดขวางของซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt + IPA ในกระบวนการกัดด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 1,000 เท่าและ 5,000 เท่าตามลำดับ

ในกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายทั้งสองจึงทำให้ได้มุมในการกัดที่ใกล้เคียงกัน และสารละลายทั้งสองชนิดยังมีส่วนที่คล้ายกันอีกอย่างหนึ่งนั่นคือเมื่อเกิดปฏิกิริยาในการแตกตัวของสารละลายทั้งสองชนิดจะทำให้ได้อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนเช่นเดียวกันดังแสดงให้เห็นในปฏิกิริยาทางเคมีในสมการที่ 4.10 และ 4.11 อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนจะแพร่เข้าไปที่ผิวหน้าของซิลิคอนและจะจับตัวกับอะตอมของซิลิคอนทำให้เกิดสารเคมีชนิดใหม่ที่เรียกว่า กรดออร์โธซิลิก ดังสมการปฏิกิริยาเคมีที่ 4.9



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 4.4 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโพโตไดโอดโครงสร้าง $AVn-Si/Al$ แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู

ในการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอด ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างโพโตไดโอดโครงสร้าง  $AVn-Si/Al$  แบบเชิงราบ (MSM) มาใช้ในการเปรียบเทียบเนื่องจากการสร้างโพโตไดโอดแบบเชิงราบมีกระบวนการสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและในส่วนของคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ได้ทำการศึกษาการสร้างโพโตไดโอดแบบเชิงราบมาอย่างยาวนานจึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับทฤษฎีและงานวิจัยอื่นๆ ในการสร้างโพโตไดโอดทั้งหมดในงานวิจัยนี้จะใช้ขั้วโลหะชนิดเดียวกันคือ อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งมีลักษณะขั้วเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมีขนาดพื้นที่ (A) เท่ากับ  $1 \text{ mm}^2$  และมีระยะห่างระหว่างขั้ว  $100 \mu\text{m}$  ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดจะทำการวัดโดยใช้เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station ซึ่งอยู่ในกล่องป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอก (dark box) เข้าไปมีผลกระทบต่อโพโตไดโอด เครื่องมือนี้จะทำหน้าที่เชื่อมต่อขาของขั้วอะลูมิเนียมที่อยู่บนแผ่นซิลิคอน (ยังไม่ได้บรรจุลงบนตัวถัง) จากนั้นป้อนจะทำการป้อนค่าแรงดันเพื่อใช้หาค่ากระแสจากระบบเครื่องมือวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ซึ่งจะถูควบคุมด้วยระบบคอมพิวเตอร์ โดยจะป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่  $-10 \text{ V}$  ถึง  $10 \text{ V}$  ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.11 จากนั้นจะนำข้อมูลที่ได้อ่านหรือพล็อตกราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันต่อไป



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.11 เครื่องมือที่ใช้ทดสอบโพโตไดโอด เพื่อใช้หาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

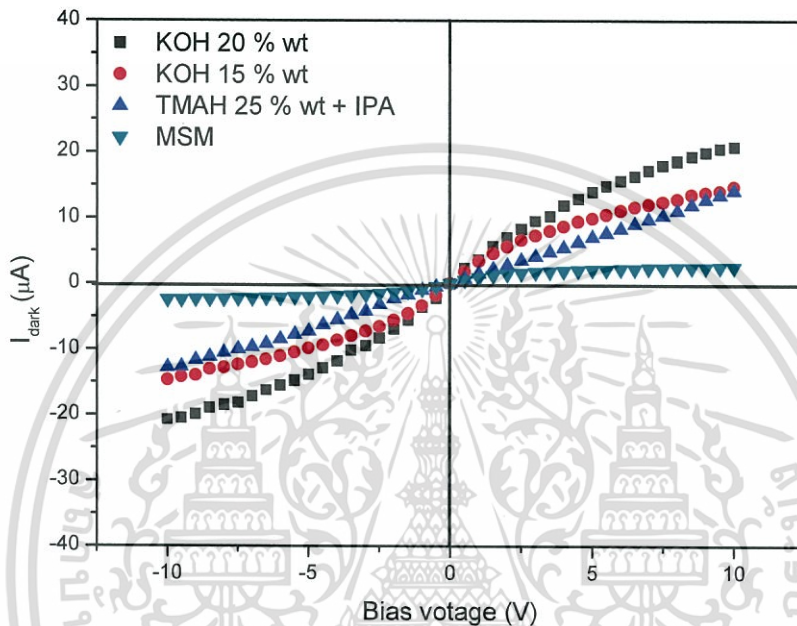
(ก) ระบบเครื่องมือวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน (ข) เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station ซึ่งอยู่ภายในกล่องป้องกันแสง

##### 4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดโครงสร้าง $AVn-Si/Al$ แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากกราฟรูปที่ 4.12 พบว่ากระแสมีค่าเปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบอัส โดยจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อโพโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสเพิ่มมากขึ้น จากการทดสอบที่แรงดันไบอัส  $-10$  ถึง  $10 \text{ V}$  ค่ากระแสรั่วของโพโตไดโอดแบบเชิงราบ อยู่ที่  $2.1 \mu\text{A}$  กระแสรั่วของโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู แบบเรียบโดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA ในการกัดอยู่ที่ 14.1  $\mu\text{A}$  และกระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 15 %wt และ 20 %wt อยู่ที่ 14.7  $\mu\text{A}$  และ 20.8  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ เมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู พบว่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู มีค่ากระแสรั่วสูงกว่าเชิงราบ ถึง 10 เท่า



รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวสองลักษณะคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH

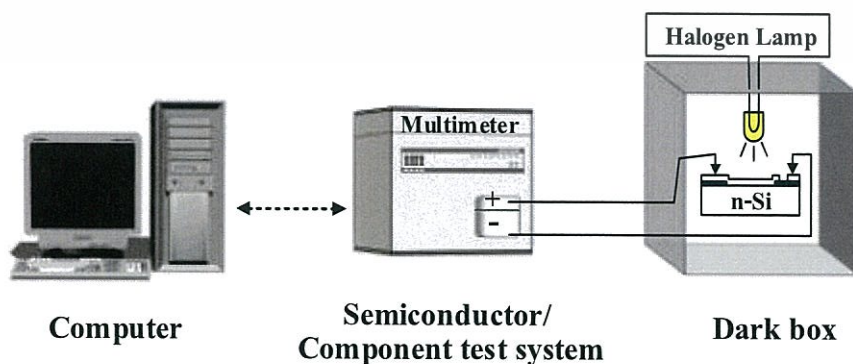
การที่ค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูมีค่าสูงทั้งนี้อาจมีหลายๆสาเหตุ โดยในทางทฤษฎีจะมาจากการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับแก่ขั้วหนึ่งของโฟโตไดโอด ซึ่งจะทำให้ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะกว้างมากขึ้นและการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะจะข้ามกำแพงศักย์ชอตกีย์ ( $\phi_{bn}$ ) ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำจนทำให้เกิดกระแสรั่ว หรืออาจกล่าวได้ว่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสชอตกีย์ (Schottky barrier height:  $\phi_{bn}$ ) เป็น พารามิเตอร์หนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากความสูงกำแพงศักย์ชอตกีย์สามารถบ่งบอกปริมาณ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสได้ ความสูงกำแพงศักย์ชอตกีย์จะมีค่ามากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับชนิดของโลหะและสารกึ่งตัวนำ หากความสูงกำแพงศักย์มีค่ามาก จะส่งผลให้อิเล็กตรอนที่จะเคลื่อนที่ข้าม รอยสัมผัสจากโลหะมายังสารกึ่งตัวนำนั้น เป็นไปได้ยาก แต่หากความสูงกำแพงศักย์นั้นต่ำก็จะทำให้อิเล็กตรอนสามารถเคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยสัมผัสไปยังสารกึ่งตัวนำได้มากขึ้น และการที่อิเล็กตรอน เคลื่อนที่ข้ามผ่านรอยสัมผัสนั้นก็หมายความว่า จะมีกระแสที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ หรือก็คือ กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชอตกีย์

นั่นเอง [55] และอีกสาเหตุหนึ่งที่เกิดกระแสรั่วสูงอาจเกิดจากสารตกค้างของสารละลาย KOH เนื่องจากไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เป็นกระบวนการกัดแบบเปียกจึงทำให้เกิดการทิ้งประจุของโพแทสเซียมอยู่บนผิวของซิลิคอนและเมื่อทำการเปรียบเทียบค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปด้วยที่ใช้สารละลาย TMAH และค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดที่ใช้ความเข้มข้นสารละลาย KOH 15 %wt ในกระบวนการกัดพบว่าค่ากระแสรั่วมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการศึกษาในส่วนของสารละลาย TMAH เป็นสารละลายที่ใช้ในกระบวนการสร้าง CMOS หรือบอกได้ว่าเป็นสารละลายที่ไม่มีการทิ้งประจุจึงคาดการณ์ว่าค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดที่ใช้สารละลาย TMAH ในการกระบวนการกัดน่าจะมีค่ากระแสรั่วที่ใกล้เคียงกับโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ ที่ค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดที่ใช้สารละลาย TMAH ในการกัดมีค่าสูงอาจมีสาเหตุมาจากการใช้ภาชนะในกระบวนการกัดเดียวกัน ซึ่งอาจจะส่งผลทำให้ประจุตกค้างของสารละลาย KOH คงอยู่ในภาชนะค่ากระแสรั่วที่ได้จึงมีค่าสูง เนื่องจากการใช้ภาชนะที่ใส่สารละลายในแต่ละครั้งเราไม่สามารถทราบได้ว่าภาชนะที่ใช้หรือสารเคมีที่ทำการเตรียมเพื่อใช้ในกระบวนการกัดต่างๆ มีความสะอาดมาน้อยเพียงใด ซึ่งค่ากระแสรั่วที่สูงนี้จะทำการปรับปรุงอีกครั้งในการทดลองต่อไป

#### 4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบ และแบบร่องรูปด้วย ขณะได้รับแสงตกกระทบ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบ และแบบร่องรูปด้วย ขณะได้รับแสง โดยในการศึกษาจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงที่ใช้ตกกระทบในลักษณะสัญญาณแบบ DC (Direct current) ซึ่งจะช่วยให้เห็นถึงความสามารถในการตรวจวัดแสงที่ความเข้มต่างๆ และยังจะทำการศึกษาค่าของกระแสแสง (Photocurrent:  $I_{photo}$ ) ที่เปลี่ยนไปและจะนำกระแสแสงที่ได้ไปเปรียบเทียบผลของกระแสแสงโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและแบบร่องรูปด้วยที่มีพื้นผิวสองลักษณะคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปด้วย ในการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันเพื่อหาค่ากระแสแสงที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ และตรวจสอบความเป็นเชิงเส้นของค่ากระแสแสงกับความเข้มแสงที่เปลี่ยนไป โดยจะใช้แหล่งกำเนิดจากหลอดฮาโลเจน (halogen lamp) จะทำการวัดที่แรงดันไบอัส -10 V ถึง 10 V ที่ความเข้มแสงต่างๆคือ 5,000 lux ถึง 25,000 lux ดังแผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในรูปที่ 4.13



รูปที่ 4.13 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของโฟโตไดโอด

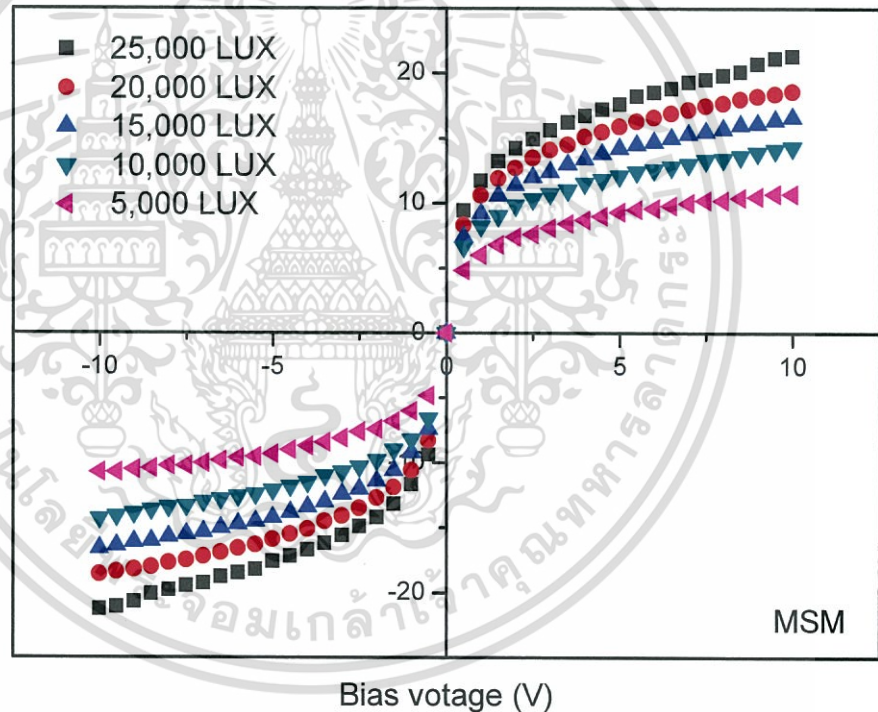
เอกสารนี้โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบ และแบบร่องรูปด้วยนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากนั้นนำค่ากระแสแสงที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดันไบอัสโดยค่ากระแสแสงสามารถหาได้จากสมการที่ 4.12

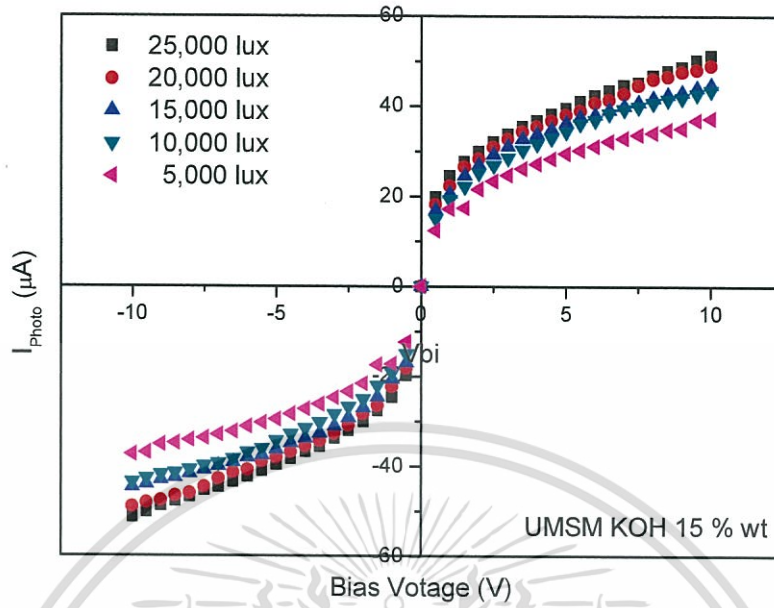
$$I_{photo} = I_{mea} - I_{dark} \quad (4.12)$$

โดยที่  $I_{mea}$  คือ กระแสรวมที่วัดได้จากการทดลอง

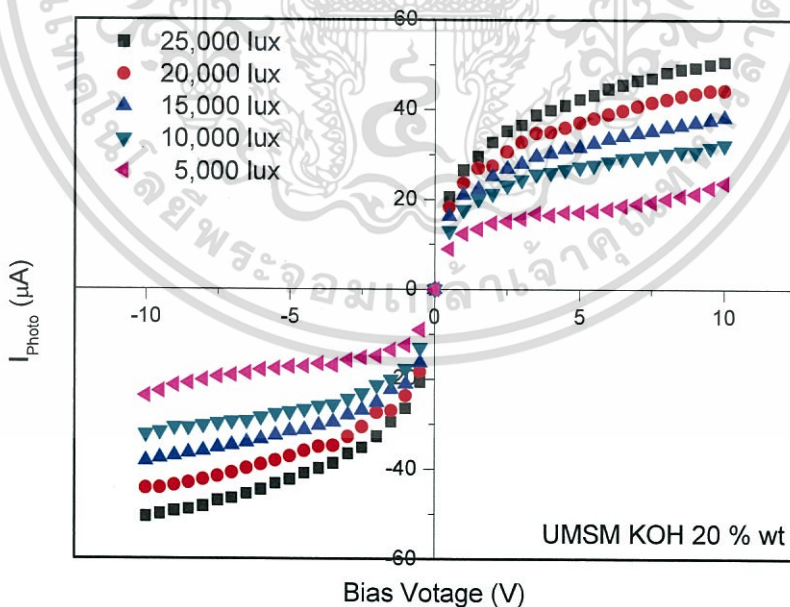
แล้วนำค่ากระแสแสง (Photo current :  $I_{photo}$ ) ที่วัดได้มาพล็อตกราฟหาความสัมพันธ์สมบัติกระแสกับแรงดัน ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.17



รูปที่ 4.14 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ ขณะได้รับแสงตกกระทบ

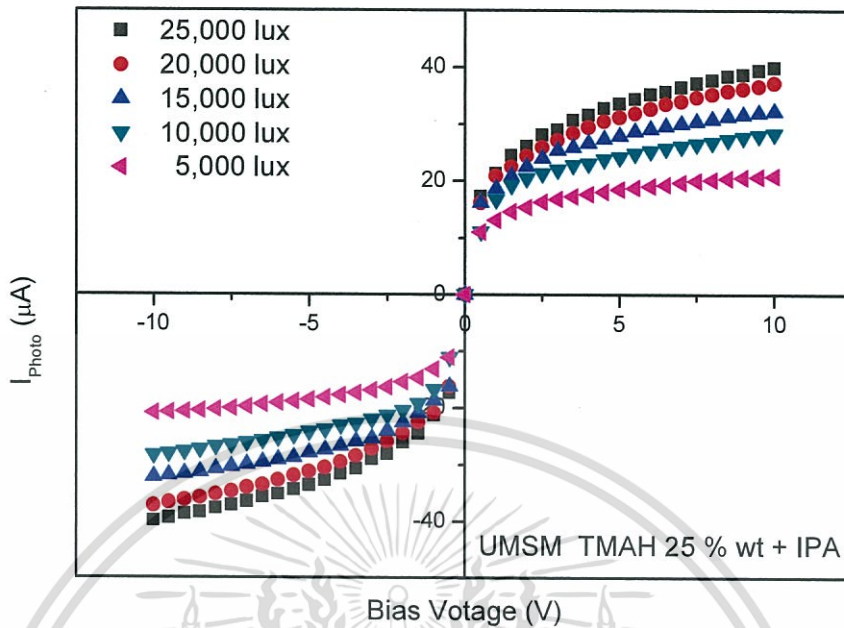


รูปที่ 4.15 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย KOH 15 %wt ขณะรับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.16 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ขณะรับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.17 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt + IPA ขณะรับแสงตกกระทบ

จากการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันขณะได้รับแสงตกกระทบที่ความเข้มแสงค่าต่างๆ ของโฟโตไดโอดผลการทดสอบสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวสองลักษณะคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.14 ถึงรูปที่ 4.17 เมื่อนำค่ากระแสแสงที่วัดได้จากการทดลอง ( $I_{mea}$ ) มาลบกับค่ากระแสมืด ( $I_{dark}$ ) จะทำให้ได้ค่ากระแสแสง ( $I_{photo}$ ) ที่แท้จริงแล้วนำค่าที่ได้มาหาความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดัน โดยให้แรงดันไบอัสตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสตรง 10 V ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบมีค่าประมาณ 21  $\mu\text{A}$  ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA มีค่ากระแสแสงอยู่ที่ 41.52  $\mu\text{A}$  และค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20 %wt มีค่ากระแสแสงประมาณ 45.8  $\mu\text{A}$  และ 50.2  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ เมื่อนำค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างทั้งหมดมาเปรียบเทียบกัน พบว่าค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยูโดยใช้สารละลาย KOH มีค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและแบบเชิงราบ ถึง 1.25 เท่า และ 2.3 เท่า ตามลำดับ ที่ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มมีค่ากระแสแสงมากขึ้นอันเนื่องมาจาก

พีระมิดแบบสุ่มบนพื้นผิวของซิลิคอนภายในร่องรูปตัวยูทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวช่วยที่ใช้ในการเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง และเมื่อแสงตกกระทบที่พื้นผิวของพีระมิด แสงจะแสดงคุณสมบัติตัวหนึ่งของมัน ออกมาคือการสะท้อนทำให้แสงที่ตกกระทบผิวของพีระมิดด้านหนึ่งสะท้อนไปหาพื้นผิวของพีระมิดอีกด้านหนึ่งด้วยเช่นกัน

#### 4.4.3 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$ แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ภายในร่องรูปตัวยู

การทดลองในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อปรับปรุงกระแสรั่วของโฟโตไดโอดที่สร้างขึ้นในหัวข้อ 4.4.1 ด้วยอุณหภูมิหรือที่เรียกกันว่ากระบวนการซินเตอร์ริง ซึ่งจากกระบวนการสร้างที่ผ่านมาทำให้ทราบสาเหตุของการเกิดกระแสรั่วของโฟโตไดโอดทั้งแบบเชิงราบ และแบบร่องรูปตัวยู ในหลายๆสาเหตุ ซึ่งกระบวนการสร้างครั้งนี้ได้ทำการเตรียมสารละลายที่ใช้ในกระบวนการสร้างโฟโตไดโอดทั้งแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยูใหม่ทั้งหมดและก่อนเริ่มกระบวนการสร้างโฟโตไดโอด ได้ทำการนำภาชนะทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการกัดล้างในน้ำปราศจากประจุและเมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการกัดได้นำชิ้นงานทั้งหมดล้างน้ำปราศจากประจุโดยให้น้ำไหลผ่านเป็นเวลา 10 นาที ก่อนการวิเคราะห์

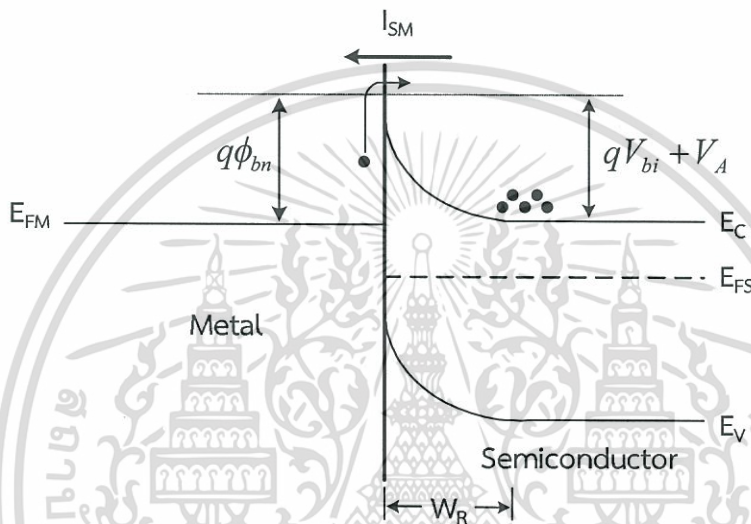
โดยจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดโครงสร้าง  $Al/n-Si/Al$  แบบเชิงราบ (MSM) ด้วยความร้อน [56] ที่สร้างขึ้น ณ ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ที่ผ่านมาพบว่ากระบวนการซินเตอร์ริงเพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและฐานรองซิลิคอนมีความสมบูรณ์มากที่สุดจะต้องผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 15 นาที [57] ดังนั้นเพื่อให้กระบวนการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู มีความสอดคล้องและได้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกันจึงได้นำเอาเงื่อนไขในกระบวนการซินเตอร์ริงมาประยุกต์ใช้กับงานวิจัยนี้ ซึ่งในกระบวนการซินเตอร์ริงจะทำให้รอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอนมีสมบัติที่ดีขึ้น [57] และทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแสงเช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อที่ 4.4.1 และหัวข้อที่ 4.4.2 จากนั้นทำการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้ากับแรงดันของโฟโตไดโอด ซึ่งผลการทดลองจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

#### 4.4.4 การทดสอบผลของอุณหภูมิในกระบวนการซินเตอร์ริงที่มีผลต่อกระแสรั่วของโฟโตไดโอดโครงสร้าง $Al/n-Si/Al$ แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

การวิเคราะห์กระแสรั่วไหลของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยูจะทำการวัดโดยใช้เครื่อง Cascade Microtech model M150 probe station โดยจะป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง -10 V และเนื่องจากโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างในงานวิจัยนี้มีขั้วโลหะเดียวกันคืออะลูมิเนียม ดังนั้นในขณะที่

เอกสารสัมมูลโฟโตไดโอดจะมีค่าความสูงของกำแพงศักย์ช็อตกึ่งของขั้วแคโทด ( $\Phi_{bn1}$ ) และขั้วแอโนดค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

( $\phi_{bn2}$ ) เท่ากันและมีค่าแรงดันภายในของชั้นแคโทด ( $V_{bi1}$ ) และชั้นแอโนด ( $V_{bi2}$ ) เท่ากัน และใน ส่วนขอค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะของขั้วแคโทด ( $w_{d1}$ ) และขั้วแอโนด ( $w_{d2}$ ) เท่ากันจึง เป็นข้อดีข้อหนึ่งของโครงสร้างแบบ MSM ที่ไม่ต้องกังวลเกี่ยวกับชั้นของแรงดันไบอัสซึ่งทำให้ค่าที่ได้ ในการตอบสนองทางแสงของโครงสร้างโฟโตไดโอดนี้มีลักษณะสมมาตร ดังที่แสดงในผลการทดลองที่ ผ่านมา ซึ่งผลการทดลองในหัวข้อต่อไปนี้จะนำเสนอผลการทดลองในส่วนของแรงดันไบอัสย้อนกลับ เพียงเท่านั้น



รูปที่ 4.18 แถบพลังงานขณะได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับของชนิดกึ่งไดโอดด้านแคโทด

ในการเกิดกระแสรั่วไหลของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM เมื่อทำการป้อนแรงดันไบอัสย้อนกลับแก่รอยสัมผัสชนิดกึ่ง ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบจะส่งผลทำให้บริเวณปลอดพาหะใน ด้านแคโทดมีการขยายตัวกว้างมากขึ้นจึงส่งผลทำให้ค่ากำแพงศักย์ภายใน ( $\phi_{bn}$ ) สูงขึ้นทำให้ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ แต่จะมีเพียง อิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากทางด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ชนิดกึ่งไปยังด้าน สารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งจะทำให้เกิดทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกระแสรั่วของรอยสัมผัสชนิดกึ่ง ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.18 และความกว้างของบริเวณ ปลอดพาหะของโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ในงานวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการสร้างขั้วไฟฟ้าให้มีระยะ ขั้วไฟฟ้าขนาดกว้าง  $100 \mu\text{m}$  เพราะฉะนั้นการพิจารณาความสำคัญของบริเวณปลอดพาหะจะ พิจารณาเฉพาะด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นในบริเวณ ปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป

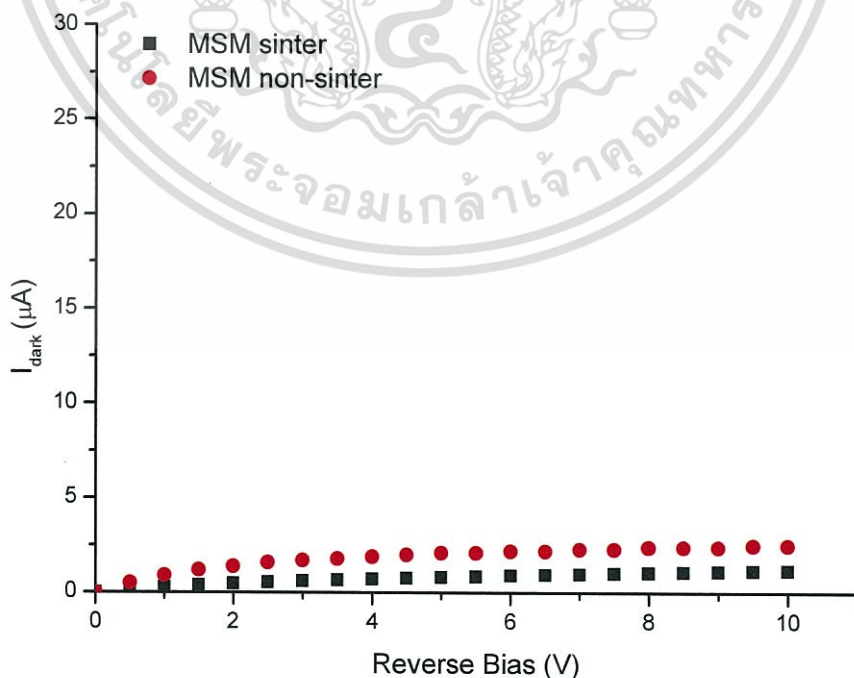
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างที่กล่าวไปแล้วในข้างต้นว่าค่าความสูงกำแพงศักย์ภายใน ( $\Phi_{bn}$ ) ถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญในการลดกระแสรั่วไหลในอุปกรณ์ที่สร้างขึ้นได้ หรือกล่าวได้ว่าความสูงของกำแพงศักย์ภายใน จะทำหน้าที่ป้องกันการไหลของอิเล็กตรอนจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นค่าความสูงของกำแพงศักย์ข้อต่อก็สามารถหาได้จากสมการที่ 4.13

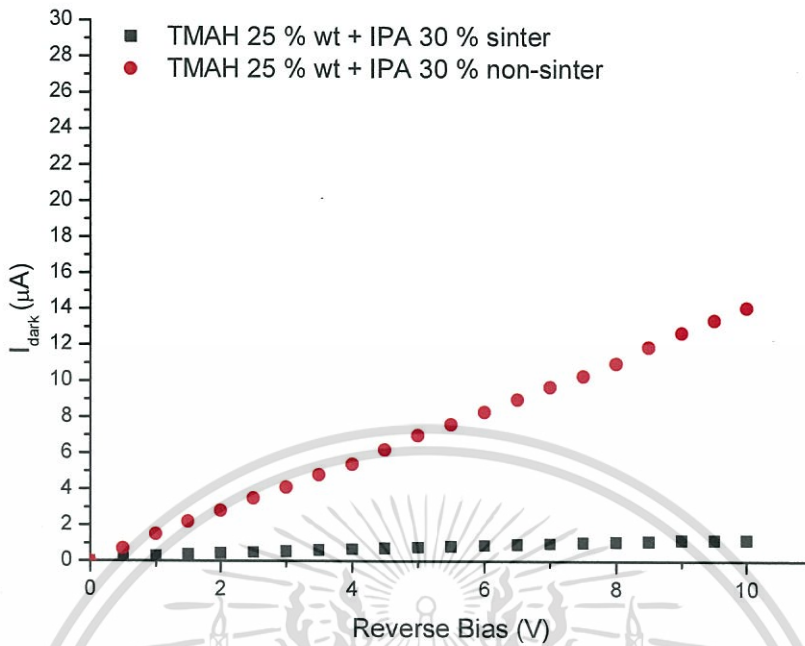
$$\Phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{ART^2}{I_0} \right) \quad (4.13)$$

โดยที่  $k$  คือ ค่าคงที่ของโบสท์มันน์ มีค่าประมาณ  $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/k}$   
 $T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)  
 $R$  คือ ค่าคงตัวรีชาร์ดสันมี ค่าประมาณ  $110 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-2}$  (n-Si)  
 $q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าประมาณ  $1.609 \times 10^{-19} \text{ C}$   
 $A$  คือ พื้นที่รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่งตัวนำโลหะ ( $\text{cm}^{-2}$ )  
 $I_0$  คือ กระแสอิ่มตัว (A)

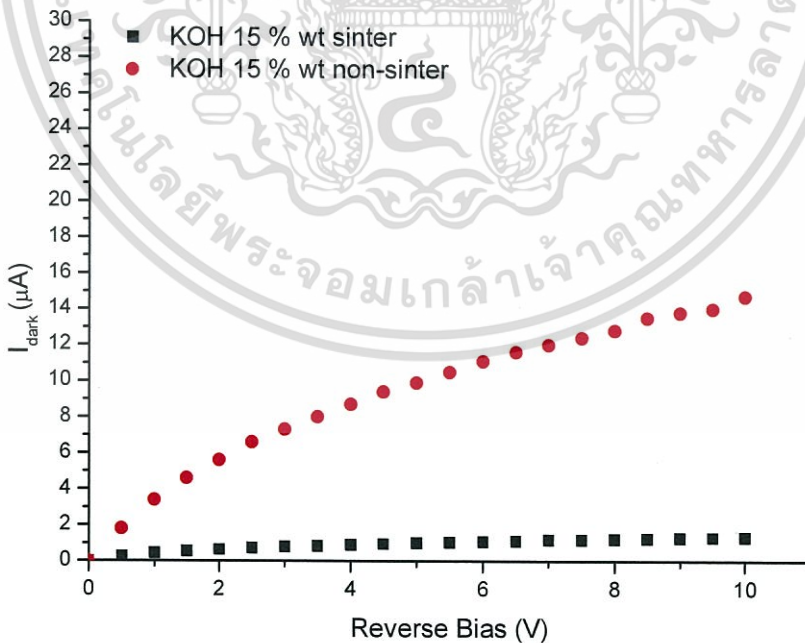
อย่างที่ได้อธิบายไปแล้วข้างต้นว่าในการสร้างโฟโตไดโอดโครงสร้าง MSM ของทางศูนย์วิจัย อิเล็กทรอนิกส์มีการสร้างและวิเคราะห์มาเป็นระยะเวลาอันยาวนานจึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้จากการทดลอง ใกล้เคียงกันและในงานวิจัยนี้เองจะทำการใช้ค่าของกำแพงศักย์ข้อต่อกี้ ( $\Phi_{bn}$ ) ของผู้ที่เคยทำการทดลองในการขึ้นเตาจริงที่อุณหภูมิ  $500^\circ\text{C}$  ที่เวลา 15 นาที ซึ่งจะมีค่าประมาณ  $0.72 \text{ eV}$  [58]



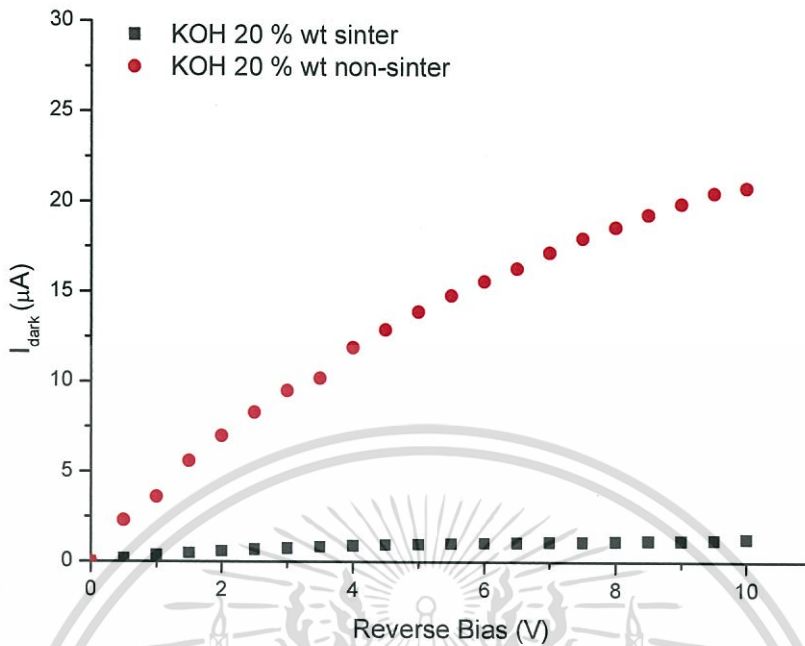
เอกสารรูปที่ 4.19 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ค่าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



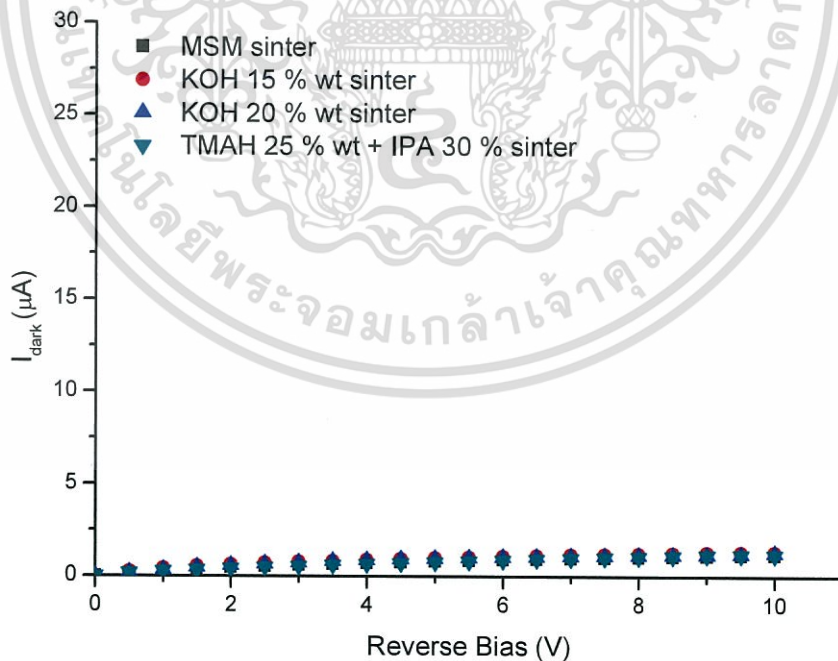
รูปที่ 4.20 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt + IPA ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.21 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 15 %wt ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.22 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบ สุ่มภายใน ร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 20 %wt ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.23 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวสองลักษณะคือพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายใน เอกสารร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.3 แสดงค่ากระแสรั่วที่แรงดันไบอัส 10 V ของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม โดยใช้ อุณหภูมิในการซินเตอร์ริง 500 °C

ชนิดของโฟโตไดโอด	กระแสรั่วก่อนซินเตอร์ริง	กระแสรั่วหลังซินเตอร์ริง
MSM	2.5 $\mu\text{A}$	1.17 $\mu\text{A}$
UMSM KOH 15 %wt	14.7 $\mu\text{A}$	1.32 $\mu\text{A}$
UMSM KOH 20 %wt	20.8 $\mu\text{A}$	1.28 $\mu\text{A}$
UMSM TMAH 25 %wt + IPA	14.1 $\mu\text{A}$	1.19 $\mu\text{A}$

จากกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสกับแรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู ในรูปที่ 4.19 ถึง รูปที่ 4.23 สามารถนำมาสรุปได้เป็นตารางแสดงค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดก่อนทำการซินเตอร์ริงและหลังทำการซินเตอร์ริง ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 3 เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสตรง 10 V โฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) จากตารางสรุปพบว่าค่ากระแสรั่วหลังทำการซินเตอร์ริงมีค่าลดลงประมาณ 10-20 เท่า โดยที่โฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt และทำการเติมสารละลาย IPA ในกระบวนการกัด และพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20 %wt หลังจากการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที มีค่ากระแสรั่ว ( $I_{dark}$ ) อยู่ในเกณฑ์ใกล้เคียงกันคือที่ประมาณ 1.17  $\mu\text{A}$ , 1.19  $\mu\text{A}$ , 1.32  $\mu\text{A}$  และ 1.28  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ

เมื่อพิจารณาจากกราฟในรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.21 ก่อนและหลังการซินเตอร์ริงมาเปรียบเทียบกันสามารถบ่งบอกได้อย่างชัดเจนเลยว่าค่าที่กระแสรั่วลดลงนี้เกิดขึ้นจากค่าของกัมพวงศักย์ภายในที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการใช้อุณหภูมิในการซินเตอร์ริง ซึ่งเป็นสิ่งที่ยืนยันการทำหน้าที่ของกัมพวงศักย์ในการป้องกันการไหลของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำได้เป็นอย่างดีดังแสดงในรูปที่ 4.18 และที่เลือกใช้อุณหภูมิที่ 500 °C เนื่องจากอลูมิเนียมเป็นโลหะที่มีจุดหลอมเหลวต่ำ โดยมีจุดหลอมเหลวอยู่ที่ประมาณ 660 °C ดังนั้นการใช้อุณหภูมิในช่วงใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวจะทำให้อลูมิเนียมแพร่ลงไปในฐานรองซิลิคอนได้ดียิ่งขึ้น [59] จึงส่งผลทำให้รอยสัมผัสขั้วต่อกึ่งระหว่างอลูมิเนียมและฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็นเป็นรอยสัมผัสที่มีความสมบูรณ์มากขึ้นอีกทั้งยังช่วยลดสถานะผิวทำให้กระแสรั่วต่ำอีกด้วย [57] ซึ่งจะแตกต่างจากโฟโตไดโอดที่ยังไม่ผ่านการซินเตอร์ริง จึงยังคงมีผลของสถานะผิวที่เกิดจากการไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึก (lattice mismatch) ระหว่างอะลูมิเนียมและฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็น จึงเป็นผลทำให้เกิดกระแสรั่วไหลที่สูงกว่านั่นเอง [60]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

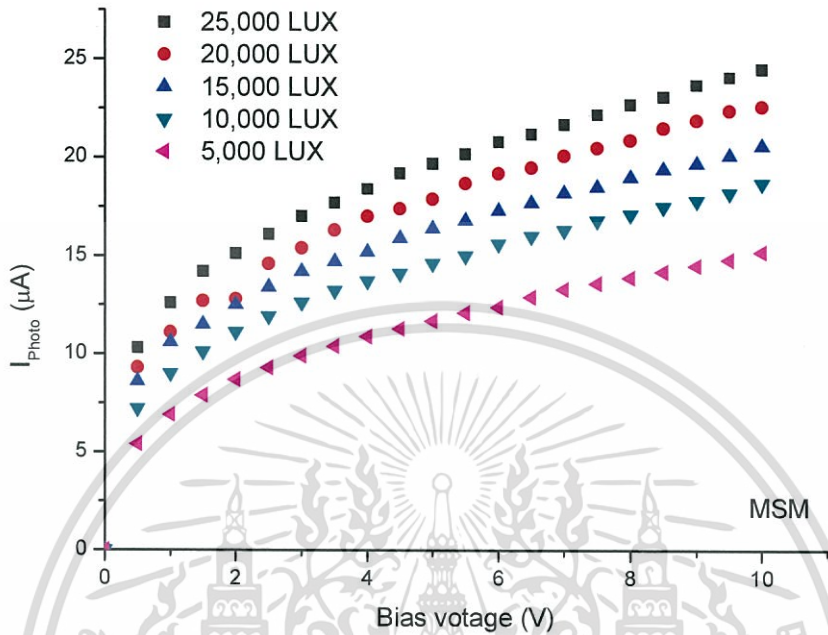
#### 4.4.5 การเปรียบเทียบค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบ และแบบร่องรูปตัวยู หลังกระบวนการซินเตอร์িং ขณะได้รับแสงตกกระทบ

ในหัวข้อนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาการเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู ซึ่งในการทดลองจะทำการทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างทั้ง 4 โครงสร้างและทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแสง หลังจากผ่านกระบวนการซินเตอร์িংที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 15 นาที โดยใช้ความเข้มแสงในการตกกระทบที่ 5,000 lux ถึง 25,000 lux และป้อนแรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 ถึง -10 V จากนั้นจะทำการเปรียบเทียบค่ากระแสแสง (Photocurrent:  $I_{photo}$ ) ที่ได้กระแสรวมที่วัดได้จากการทดลอง ( $I_{mea}$ ) ลบด้วยกระแสรั่ว ( $I_{dark}$ ) ดังแผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบในรูปที่ 4.13 โดยจะใช้ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ นำมาเปรียบเทียบกับค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่มีพื้นผิวสองลักษณะนั่นคือโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่มีพื้นผิวแบบเรียบที่ทำการสร้างโดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt และทำการเติมความเข้มข้นสารละลาย IPA และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20 %wt ในกระบวนการกัดตามลำดับ

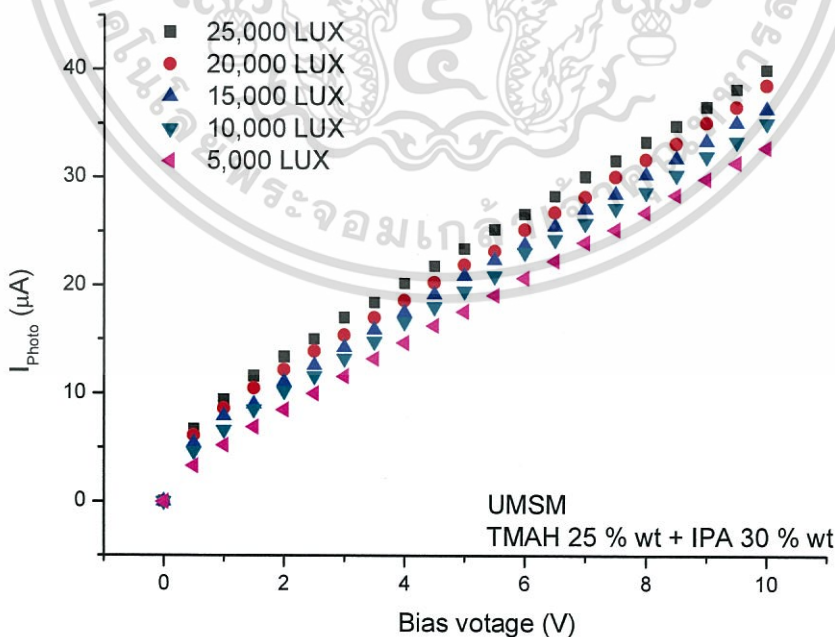
จากผลของลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในการตกกระทบ ดังแสดงในรูปที่ 4.24 ถึงรูปที่ 4.28 จะเห็นได้ว่าโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างทั้ง 4 โครงสร้าง นั่นคือโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ, โฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt และทำการเติมสารละลาย IPA, โฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20 %wt นั้นสามารถตอบสนองทางแสงได้เป็นอย่างดี โดยกระแสจะสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น และเมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ -10 V และที่ความเข้มแสง 25,000 lux โฟโตไดโอดแบบเชิงราบมีค่ากระแสแสงอยู่ที่ประมาณ 24  $\mu$ A โฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่มีพื้นผิวแบบเรียบมีค่ากระแสแสงอยู่ที่ 42.8  $\mu$ A และโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม โดยใช้สารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 15 %wt และที่ความเข้มข้น 20 %wt มีค่ากระแสแสงอยู่ที่ 48.7  $\mu$ A และ 51.3  $\mu$ A ตามลำดับ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกระแสแสงที่ได้จากโฟโตไดโอดทั้ง 4 โครงสร้าง โดยใช้ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) ในการเปรียบเทียบ จากการคำนวณพบว่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt และทำการเติมสารละลาย IPA พบว่ามีค่ากระแสแสงมากกว่าแบบเชิงราบ ประมาณ 1.74 เท่า และโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และ 20 %wt พบว่ามีค่ากระแสแสงมากกว่าแบบเชิงราบประมาณ 2.02 และ 2.13 เท่า ตามลำดับ ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.4 จากการเพิ่มขึ้นของค่ากระแสแสงที่ทำการสร้างพีระมิตแบบสุ่ม สามารถบ่งชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ในการรับแสง หรือกล่าวการสร้างพีระมิตแบบสุ่มจะช่วยให้เพิ่มพื้นที่ในการรับแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู จึงส่งผลทำให้ค่ากระแสแสงที่ได้มีค่ามากกว่าโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่มีพื้นผิวเรียบ

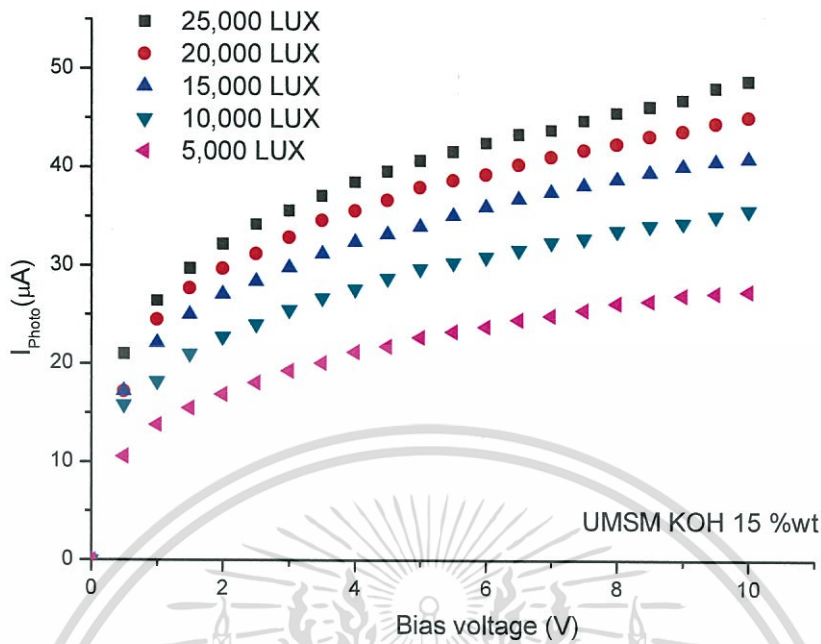


รูปที่ 4.24 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ ขณะได้รับแสงตกกระทบ

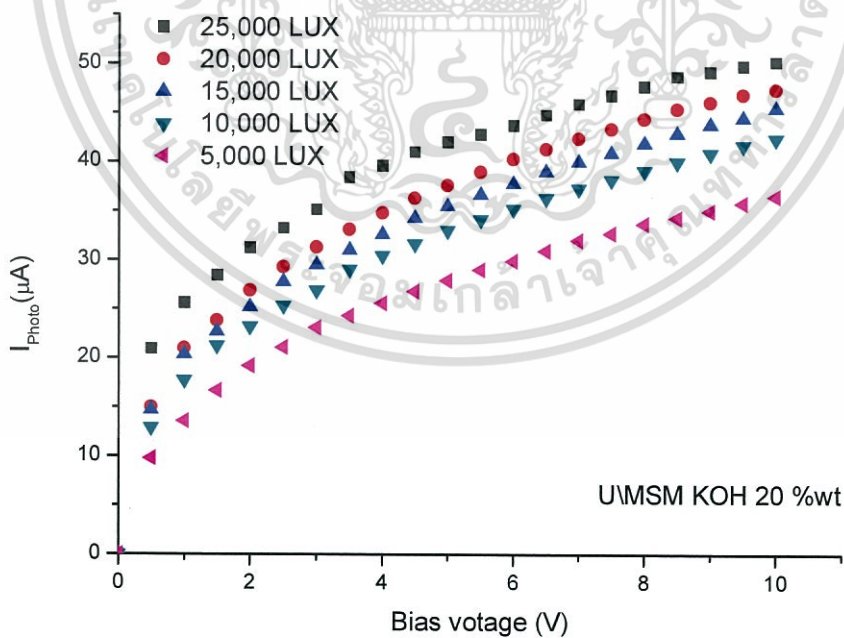


รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt + IPA ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

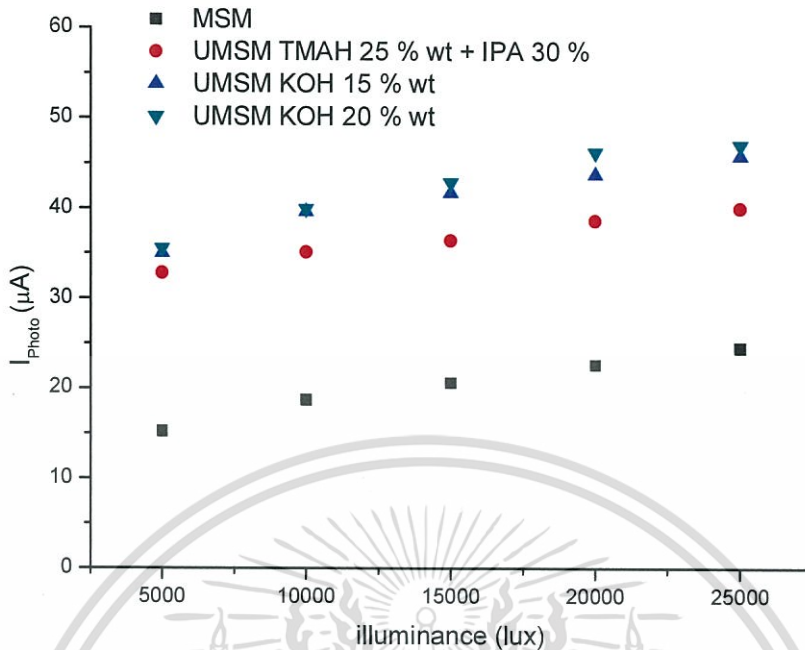


รูปที่ 4.26 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบ สุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 15 %wt ขณะได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.27 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบ สุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH 20 %wt ขณะได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



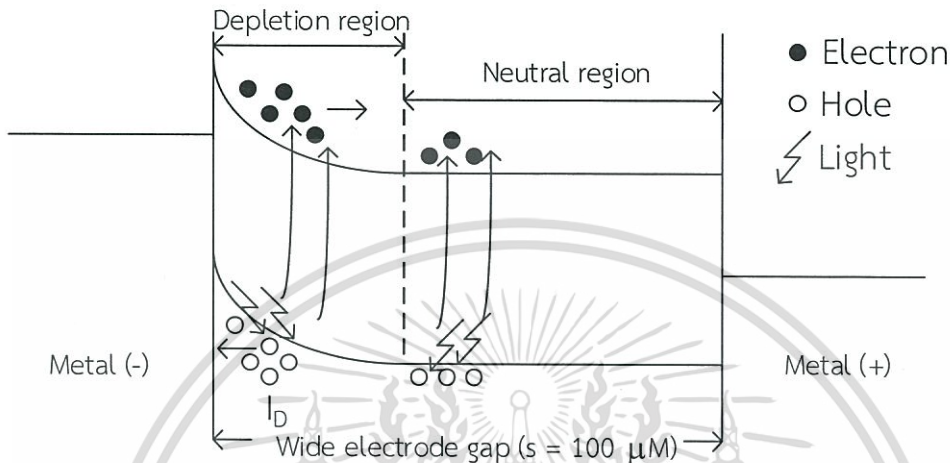
รูปที่ 4.28 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัว ยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH

ตารางที่ 4.4 แสดงค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูป ตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม โดยใช้อุณหภูมิในการช ินเตอร์นิง 500 °C

ชนิดโฟโตไดโอด	กระแสแสง ( $I_{\text{photo}}$ )	ค่ากระแสแสงที่เพิ่มขึ้น
MSM	24 $\mu\text{A}$	เมื่อทำการเปรียบเทียบกับ MSM
UMSM KOH 15 %wt	48.7 $\mu\text{A}$	2.02 เท่า
UMSM KOH 20 %wt	51.3 $\mu\text{A}$	2.13 เท่า
UMSM TMAH 25 %wt + IPA	42.8 $\mu\text{A}$	1.78 เท่า

เมื่อพิจารณาที่ผิวของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนที่ใช้เป็นฐานรองในการสร้างโฟโตไดโอดแบบ wide electrode gap พบว่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะไม่ครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมด เนื่องจากใน กระบวนการสร้างได้กำหนดระยะห่างระหว่างขั้วไว้ที่ 100  $\mu\text{m}$  ดังนั้นบริเวณผิวของตัวตรวจวัดแสง ชนิดนี้จะประกอบด้วยสองส่วนคือ บริเวณปลอดพาหะ และบริเวณนิวทรัล ซึ่งส่งผลให้เกิดกลไกการ แยกสารเป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการเรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของลิขสิทธิ์ใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดกระแสแสงในโฟโตไดโอดชนิดนี้ขึ้นจาก 2 กรณีคือ กระแสแสงที่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะ เรียกว่า กระแสโฟโตไดโอด ( $I_D$ ) และกระแสแสงที่เกิดจากบริเวณนิวทรัลเรียกว่า กระแสโฟโตคอนดัคเตอร์ ( $I_C$ )



รูปที่ 4.29 แถบพลังงานของโฟโตไดโอด เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับและมีแสงตกกระทบ

โดยเมื่อโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัส จะส่งผลทำให้ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้น และเมื่อมีแสงกระทบที่บริเวณปลอดพาหะจะส่งผลทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลเกิดขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ในขณะที่โฮลเคลื่อนที่ในทิศทางสวนทิศสนามไฟฟ้า ไปยังขั้วแคโทด การเคลื่อนที่ของโฮลนี้ก่อให้เกิดกระแสโฟโตไดโอดขึ้น ส่งผลให้มีกระแสไหลออกไปยังอุปกรณ์อื่นภายในวงจรต่อไป ในส่วนของบริเวณนิวทรัล เมื่อมีแสงตกกระทบจะเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลขึ้นเช่นกัน โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้า และเกิดการแพร่ของโฮลที่ขอบบริเวณปลอดพาหะ ส่งผลให้เกิดกระแสโฟโตคอนดัคเตอร์ แผนภาพแถบพลังงานของโฟโตไดโอดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ wide electrode gap เมื่อได้รับแสงตกกระทบดังแสดงในรูปที่ 4.29 กระแสโฟโตไดโอดเป็นกระแสเกิดจากการเคลื่อนที่ของพาหะอิสระที่เกิดขึ้นในบริเวณปลอดพาหะ และกระแสโฟโตไดโอดนี้มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อบริเวณปลอดพาหะขยายตัวมากซึ่งทำให้เกิดพื้นที่รับแสงของบริเวณปลอดพาหะมากขึ้นจึงเกิดคู่พาหะอิสระอิเล็กตรอน - โฮล จากการกระตุ้นของแสงที่ตกบริเวณกระทบได้มากขึ้น ซึ่งในตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดนี้ที่มีระยะห่างระหว่างขั้วขนาดกว้างนั้นกระแสโฟโตไดโอดจะเป็นกระแสส่วนใหญ่ และมีผลกระทบมากต่อการทำงานของอุปกรณ์ ส่วนกระแสโฟโตคอนดัคเตอร์ที่เกิดบริเวณนิวทรัลหรือบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อมจะมีค่าไม่เปลี่ยนแปลง จึงกล่าวได้ว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีค่ามากขึ้นเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้น ดังนั้นจึงสามารถควบคุมกระแสแสง

ของโฟโตไดโอด โครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดนี้ได้ด้วยวิธีการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสที่ให้แก่ตัวไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตรวจวัดแสง [61] ซึ่งถือเป็นคุณสมบัติเด่นอีกประการหนึ่งของโฟโตไดโอดที่มีลักษณะโครงสร้างนี้ ดังนั้นกระแสของโฟโตไดโอดที่เกิดขึ้นจากค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจากการไบอัสที่แรงดันใดๆ มีค่าเท่ากับกระแสแสงทั้งหมดที่วัดได้

#### 4.4.6 การศึกษาลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ภายในร่องรูปตัวยู

การทดสอบลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดเป็นการทดลองเพื่อศึกษาสมบัติพื้นฐานของรอยสัมผัสขั้วต่อที่สำคัญคือค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ( $W$ ) การวัดความจุไฟฟ้าของรอยสัมผัสขั้วต่อก็จะทำการวัด โดยใช้เครื่อง Cascade Microtech Model M150 probe station ดังรูปที่ 4.11 ซึ่งเป็นการวัดเช่นเดียวกับการศึกษากระแสรั่วของโฟโตไดโอด ซึ่งจะป้อนค่าแรงดันไบอัสตั้งแต่  $-10$  V ถึง  $10$  V ที่ความถี่  $100$  kHz ซึ่งการวิเคราะห์หาค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดสามารถหาได้จากสมการที่ 4.14

$$C = \frac{A\epsilon_s}{W} = A \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_D}{2(V_{bi} \pm V_A)}} \quad (4.14)$$

โดยที่  $\epsilon_s$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีของสารกึ่งตัวนำ

$N_D$  คือ อะตอมสารเจือผู้ให้ใน n-Si

$V_{bi}$  คือ แรงดันภายในของสารกึ่งตัวนำ

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส

$W$  คือ ค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ

$q$  คือ ประจุไฟฟ้าของอิเล็กตรอน มีค่าประมาณ  $1.609 \times 10^{-19}$  C

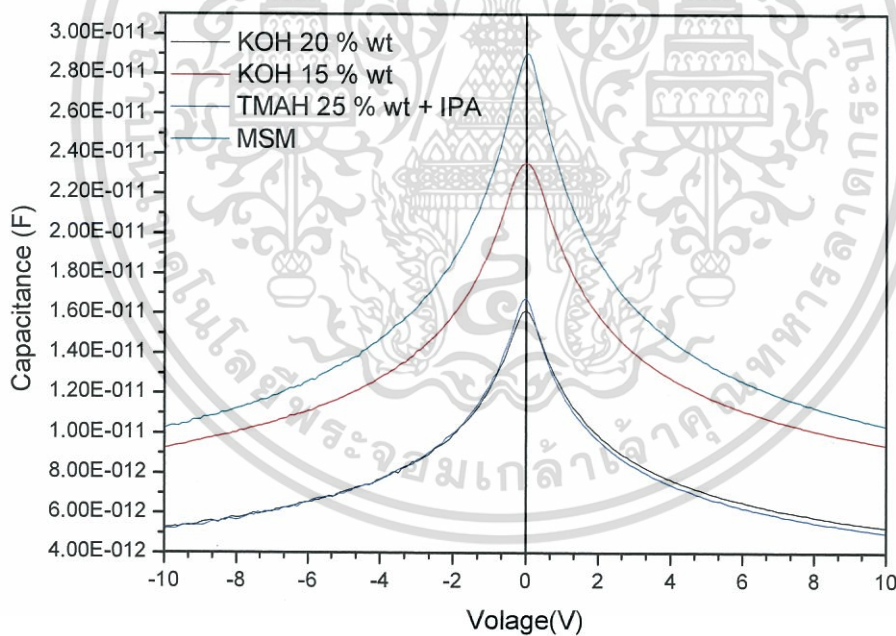
$A$  คือ พื้นที่รอยสัมผัสระหว่างสารกึ่ง-ตัวนำโลหะ

จากกราฟรูปที่ 4.30 พบว่าลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่มีพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู มีความสมมาตรกัน เนื่องจากโครงสร้างแบบรอยสัมผัสขั้วต่อทั้งสองรอยสัมผัสจึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าของแรงดันไบอัสตรงและย้อนกลับมีค่าใกล้เคียงกัน กล่าวคือเมื่อให้แรงดันไบอัสมากขึ้นจะทำให้ความจุไฟฟ้ามีค่าน้อยลงหรือก็คือมีค่าแปรผกผันกับแรงดันไบอัส ตามสมการที่ 4.14

เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัส  $10$  V ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ มีค่าประมาณ  $10.2$  pF ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่มีพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt และทำการเติมสารละลาย IPA ในกระบวนการกัดมีค่าประมาณ  $5.23$  pF และค่า

ความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยูโดยใช้ค่า  
เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์สงวนไว้สำหรับงานวิจัยเท่านั้น การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 15 %wt และที่ความเข้มข้น 20 %wt มีค่าประมาณ 9.25 pF และ 5.14 pF ตามลำดับ สาเหตุที่ค่าความจุไฟฟ้าของโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู มีค่าลดลงคงต้องพิจารณาถึงค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ จากเดิมที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ 5 ถึง 10 V ระยะการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะจะขยายอยู่ในสารกึ่งตัวนำซิลิคอนประมาณ  $4\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$  ซึ่งเป็นค่าที่กำหนดความลึกในกระบวนการกัดตั้งแต่หัวข้อแรกๆ เมื่อทำการสร้างโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ในกระบวนการกัดจะกัดเนื้อของสารกึ่งตัวนำซิลิคอนหลุดหายไปประมาณ  $4\ \mu\text{m} - 5\ \mu\text{m}$  อยู่แล้ว เมื่อนำสมการในการหาค่าความจุไฟฟ้าที่แสดงในสมการที่ 4.14 มาเปรียบเทียบกับจะเห็นว่าค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะเป็นค่าตัวแปรหนึ่งในสมการหาค่าความจุไฟฟ้า ดังนั้นเมื่อมีบริเวณปลอดพาหะหายไปบางส่วนในกระบวนการสร้างโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู จึงทำให้ค่าความจุไฟฟ้าต่ำลงไปด้วยเช่นกัน ซึ่งจากสมการจะเห็นว่าตัวแปรระหว่างค่าความจุไฟฟ้ากับค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะนี้แปรผกผันกันอยู่ ซึ่งถือว่าความจุไฟฟ้าที่ลดลงนี้เป็นข้อดีข้อหนึ่งของโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) เนื่องจากการที่ความจุไฟฟ้าลดลงจะส่งผลทำให้เกิดการตอบสนองทางความถี่เพิ่มมากขึ้นกว่าเดิม [60]



**รูปที่ 4.30** ลักษณะสมบัติความจุไฟฟ้า-แรงดันของโพโตไดโอดแบบเชิงราบ และโพโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบและพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย TMAH และสารละลาย KOH

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้นำเสนอเทคนิคการออกแบบโครงสร้าง การทดสอบและวิเคราะห์ลักษณะสมบัติต่างๆ ของโฟโตไดโอดที่ถูกสร้างอยู่บนแผ่นผลึกสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ซึ่งมีเทคโนโลยีในการสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน และในงานวิจัยนี้ยังมีจุดมุ่งหมายในการเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยนำเทคโนโลยีในกระบวนการสร้างระบบไฟฟ้าจุลภาค (MEM) และเทคนิคในการเพิ่มพื้นที่รับแสงด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มของเซลล์แสงอาทิตย์มาประยุกต์ใช้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่มีพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้สารละลาย TMAH และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู (UMSM) ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้สารละลาย KOH ในกระบวนการกัด โดยจะทำการสร้างลงบนแผ่นซิลิคอนชนิด Czochralski silicon (CZ) ที่มีสภาพต้านทาน  $5 - 10 \Omega \cdot \text{cm}$  โดยโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างจะสร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดเอ็ดระนาบ (100) ความหนา  $625 \mu\text{m}$  มีขนาดของขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม  $1 \text{ mm}^2$  และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า  $100 \mu\text{m}$  ในงานวิทยานิพนธ์นี้จะแบ่งการทดลองออกเป็นสามส่วนหลักๆ คือในส่วนแรกจะเป็นเทคนิคการออกแบบโครงสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู โดยในส่วนนี้จะแบ่งการทดลองย่อยอีกสามการทดลองเพื่อหาปัจจัยรวมถึงเงื่อนไขที่ทำให้เกิดขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสมที่สุด ในส่วนที่สองจะเป็นการวิเคราะห์การตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดทุกโครงสร้างและในส่วนที่สามจะเป็นการปรับปรุงกระแสรั่วไหลของโฟโตไดโอด

การทดลองส่วนแรกจะเป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งในการทดลองนี้จะนำเสนอเทคนิคในการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู โดยจะนำเทคโนโลยีในกระบวนการออกแบบการสร้างระบบไฟฟ้าจุลภาค มาใช้ จากผลการทดลองพบว่าที่แรงดันไบอัสย้อนกลับ  $5 \text{ V}$  และ  $10 \text{ V}$  ค่าความกว้างของบริเวณปลอดภัยในเนื้อสารกึ่งตัวนำซิลิคอนมีค่าประมาณ  $3.96 \mu\text{m}$  และ  $5.48 \mu\text{m}$  ตามลำดับ ซึ่งจากค่าการขยายตัวของพหุเหลี่ยมทำให้สามารถกำหนดความลึกของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูได้ โดยใช้สมการทางตรีโกณมิติในการคำนวณจากการคำนวณพบว่าโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูควรมีความลึกของร่องรูปตัวยูอยู่ที่  $4 \mu\text{m}$  ถึง  $5 \mu\text{m}$  และโครงสร้างนี้จะมีพื้นที่รับแสง ด้าน Slope มากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบประมาณ 1.7 เท่า ในการศึกษาปัจจัยและเงื่อนไขในการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยูของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ในการทดลองนี้จะแบ่งออกเป็นสามส่วนหลักๆ นั่นคือการหาความเข้มข้นของสารละลาย KOH เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ที่มีผลต่อการเกิดพีระมิดแบบสุ่ม การหาความเร็วรอบในการกวนสารที่ช่วยทำให้เกิดการกระจายตัวของพีระมิด และสุดท้ายการหาอุณหภูมิที่ช่วยเร่งให้เกิดปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลาย

ในส่วนแรกจะพิจารณาความเข้มข้นของสารละลาย KOH ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกักพื้นผิวซิลิคอนจนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสมที่สุด พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย 20 %wt ทำการกักพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดพีระมิดแบบสุ่ม เนื่องจากการเกิดของพีระมิดแบบสุ่มจะเกิดจากการแพร่ของอะตอมไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) เข้ายังเนื้อสารและจับตัวกับอะตอมของซิลิคอนจนถูกดึงออกสู่สารละลายในระบบ

ในส่วนที่สองจะพิจารณาความเร็วรอบในการกวนสารละลาย KOH ที่ส่งผลกระทบต่อกระบวนการกักพื้นผิวของซิลิคอนจนทำให้เกิดการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เหมาะสมที่สุด พบว่าความเร็วรอบในการกวนสารที่ 200 รอบต่อนาที มีความเหมาะสมที่สุด เนื่องจากการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มเกิดจากปฏิกิริยาการแพร่ในกระบวนการกักพื้นผิวของซิลิคอน และความเร็วรอบในการกวนสารจะส่งผลทำให้ความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันทั้งระบบ ซึ่งในการเกิดปฏิกิริยาในกระบวนการกักจะเกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนจากการแตกตัวของน้ำและฟองก๊าซไฮโดรเจนนี้เองจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนหน้าฉากป้องกันในการกัก ซึ่งผลที่ตามมาของฟองก๊าซไฮโดรเจนคือพื้นผิวที่มีการกักแบบไม่สม่ำเสมอ แต่การใช้ความเร็วรอบในการกวนสารที่เหมาะสมจะช่วยให้ฟองก๊าซไฮโดรเจนขนาดใหญ่หลุดออกไปได้ง่าย จึงส่งผลทำให้เกิดการกระจายตัวของพีระมิดที่สม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น

ในส่วนสุดท้ายจะพิจารณาอุณหภูมิที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการกัก พบว่าที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นอุณหภูมิที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาในการกักที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากการเร่งปฏิกิริยาดด้วยความร้อนจะทำให้อะตอมของไฮโดรเจนไอออน ( $OH^-$ ) เกิดการแตกตัวหรือเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ง่าย

ในการวิเคราะห์โครงสร้างของโฟโตไดโอดพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย TMAH 25 % wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA และพื้นผิวที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt พบว่าสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกักทั้งสองกักระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) ซึ่งแสดงคุณสมบัติในการกักแบบแอนไอโซทรอปิกได้เป็นอย่างดี ในการตรวจสอบความลึกของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นสารละลาย TMAH 25 % ที่ทำการเติมสารละลาย IPA และที่ใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 15 %wt และความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ในกระบวนการกักมีความลึกอยู่ที่ 4.21  $\mu\text{m}$ , 3.51  $\mu\text{m}$  และ 4.60  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ในการตรวจสอบขนาดและการกระจาย

ตัวของพีระมิดแบบสุ่ม พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt มีขนาดและการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวของพีระมิดแบบส้อมที่ดีที่สุด โดยมีความกว้างของฐานและความสูงของพีระมิดอยู่ที่ 4.6  $\mu\text{m}$  2.34  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ

และการทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA และการสร้างพื้นผิวที่มีพีระมิดแบบส้อม โดยใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัส 10 V ค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดทั้งสี่โครงสร้างมีค่าประมาณ 2.1  $\mu\text{A}$ , 14.1  $\mu\text{A}$  และ 20.1  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ การที่กระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูทั้งหมดสูง มีอาจสาเหตุมาจากการใช้สารละลายในการกัดหรือที่เรารู้จักว่ากระบวนการกัดแบบเปียก ในการกระบวนการกัดแบบเปียกหากสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดมีความสกปรกหรือสารตกค้างจะส่งผลทำให้ชิ้นงานที่นำไปกัดมีความสกปรกที่ผิวหน้า ซึ่งอาจจะส่งผลให้กระแสรั่วอยู่ในเกณฑ์ที่สูงได้และการใช้สารละลายบางประเภท เช่น สารละลาย KOH เมื่อเกิดการแตกตัวจะเกิดประจุของโพแทสเซียม ซึ่งประจุนี้อาจจะตกค้างอยู่ในสารละลายและภาชนะที่ใช้ในกระบวนการกัดและการตกค้างของประจุนี้อาจจะเป็นสาเหตุหนึ่งของการเกิดกระแสรั่ว

ในการทดสอบผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอดหลังกระบวนการขึ้นเตอริง ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ พบว่าโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA และโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพีระมิดแบบส้อมภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt มีค่ากระแสรั่วประมาณ 1.17  $\mu\text{A}$ , 1.19  $\mu\text{A}$  และ 1.28  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ เมื่อนำค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูหลังผ่านกระบวนการขึ้นเตอริงมาเปรียบเทียบกับค่ากระแสรั่วของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูก่อนกระบวนการขึ้นเตอริง พบว่ามีค่ากระแสรั่วลดลงประมาณ 10-20 เท่า และที่กระแสรั่วลดลงส่วนหนึ่งอาจมีสาเหตุมาจากการเพิ่มความสูงของกำแพงค้ำจายจากกระบวนการขึ้นเตอริงและอีกส่วนหนึ่งอาจมาจากความสะอาดของภาชนะที่ใช้ที่และความสะอาดการเตรียมสารเคมีที่ได้ทำการเตรียมใหม่ทั้งหมด และก่อนการนำชิ้นงานมาวิเคราะห์คุณสมบัติไฟฟ้าได้ทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุเป็นระยะเวลา 10 นาที จึงสามารถสรุปได้ว่ากระแสรั่วส่วนใหญ่มาจากประจุค้ำจายที่อยู่บนชิ้นงานและยังรวมไปถึงภาชนะและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัด

ในการทดสอบการตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูญาติเนาไปเซประยเขยขนดานการค้ำ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมสารละลาย IPA และการสร้างพื้นผิวที่มีพีระมิดแบบสุ่ม โดยใช้ ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt หลังจากกระบวนการซินเตอร์ริงและในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ เมื่อพิจารณาที่แรงดันไบอัส 10 V ที่ความเข้มแสง 25,000 lux พบว่าโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างให้เป็นโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีค่ากระแสแสงมากกว่าโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างแบบเชิงราบ และเมื่อทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยูทำให้ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดเพิ่มขึ้นมากกว่าเดิม อันเนื่องมาจากการสร้างพีระมิดแบบสุ่มเปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ในการรับแสง จึงทำให้ได้ค่ากระแสแสงเพิ่มมากขึ้น ประมาณ 2.3 เท่า

ในการทดสอบค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวแบบเรียบ และทำการสร้างพื้นผิวที่มีพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู พบว่าค่าความจุไฟฟ้ามีค่าลดลงเมื่อความลึกของร่องรูปตัวยูมากขึ้น เนื่องจากในกระบวนการกัดแผ่นผลึกฐานรองซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยูที่มีความลึกต่างๆ เมื่อเราให้แรงดันไบอัสแก่รอยสัมผัสจะเกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดภัยในเนื้อสารกึ่งตัวนำและเมื่อนำชิ้นงานผ่านกระบวนการกัด สารละลายที่ใช้จะกัดเนื้อของสารกึ่งตัวนำจะหายไปส่วนหนึ่ง ซึ่งเมื่อให้แรงดันไบอัสจะทำให้บริเวณปลอดภัยหายไปบางส่วนด้วยและอาจจะส่งผลทำให้ค่าความจุไฟฟ้าลดลงเพราะค่าความจุไฟฟ้าแปรผกผันกับการขยายตัวของบริเวณปลอดภัย และที่แรงดันไบอัส 10 V ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ มีค่าเท่ากับ 10.2 pF ค่าความจุไฟฟ้าของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวเรียบ โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA มีค่าเท่ากับ 5.23 pF และโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูที่ทำการสร้างพื้นผิวพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt มีค่าประมาณ 5.14 pF

## เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Bassous, M. Scheuermann, V. P. Kesan, M. Ritter, J. M. Halbout and S. S. Iyer, "A High-Speed Silicon Metal-Semiconductor-Metal Photodetector Fully Integrable with (Bi) CMOS Circuits" in Proc. Electron Devices Meeting, pp.187-190, (1991)
- [2] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, อิสระ ศรีธนะชัย และ สัญญา คุณขาว, "การตอบสนองทางแสงของโฟโตไดโอด ชนิด Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิฟิเคชันด้วยระยะห่างของอิเล็กโทรดที่มีขนาดกว้าง", วิศวกรรมสารลาดกระบัง, ปีที่ 24, ฉบับที่ 3, หน้า 6-11, (2550)
- [3] S. M. Sze and D. J. Coleman, Jr., "A Low-Noise Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Microwave Oscillator", The Bell System Technical Journal, pp. 1695-1699, (1971)
- [4] J. M. Andrews, "The Role of the Metal-Semiconductor Interface in Silicon Integrated Circuit Technology", Journal of Vacuum Science & Technology, vol.11, No. 6, pp. 972-984, (1974)
- [5] บุศรา นรารักษ์, "การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโฟโตไดโอด โครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร์ด้วยอะตอมแพลตทินัม", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 47, 67, (2556)
- [6] สุรดา เอื้อมานพงษ์, บุศรา นรารักษ์, อิสระ ศรีธนะชัย, ศนิ กลั่นสนิท, ศุภกร จันทร์ประภา, นิภาพรรณ กลั่นเงิน, อัมพร โพธิ์ไย และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "การศึกษาระดับพลังงานกระตุ้นของซิลิคอนไดโอดรอยต่อพี-เอ็นที่ถูกแพร์ด้วยแพลตทินัม" การประชุมวิชาการทวิวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 35, Volume II หน้า 1029-1032, (2555)
- [7] ไอลดา สุวรรณชาติ, "ผลกระทบของการฉายรังสีเอกซ์บนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดที่แพร์สารเจือแพลตทินัม" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 62, 65, (2558)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [8] A.-L. Suwanchatree, N. Mongkonthanant, N. Atiwongsangtong, S. Niemcharoen, "Improving Electrical Characteristics of MSM Photodetectors Using Platinum Diffusion and Wide Electrode Gap Design.", Asian conference on Engineering and Natural Sciences (ACENS-2015), JAPAN, pp. 268-277 (2015).
- [9] งามจิต มงคลธนานนท์, จิรวัดน์ ปราบเขต, รังสรรค์ เมืองเหลือ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การศึกษากัดร่องรูปตัวยูสำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสง UMSM โดยสารละลาย TMAH", การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 ฉบับที่ 1 หน้าที่ 177-180, (2559)
- [10] งามจิต มงคลธนานนท์, "การศึกษากัดแผ่นซิลิคอนแบบร่องรูปตัวยูโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 41, (2559)
- [11] ธนกฤต แสงโฮง, จิรวัดปราบเขต และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "การลดกระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบ U-Shape" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 ฉบับที่ 1 หน้าที่ 169-172, (2559)
- [12] ธนกฤต แสงโฮง, "การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก" วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 50, (2559)
- [13] Kejia (Albert) Wang, "Wire textured, multi-crystalline Si solar cells created using self-assembled masks", OPTICS EXPRESS A568. Vol. 18, No. S4, (1998)
- [14] K. Biswas, S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon", Microelectronics Journal 37 pp.519-525, (2006)
- [15] Hiroshi Tanaka, Shuichi Yamashita, Yoshitsugu Abec, Mitsuhiro Shikida, Kazuo Sato, "Fast etching of silicon with a smooth surface in high temperature ranges near the boiling point of KOH solution", Sensors and Actuators A 114, pp. 516-

เอกสารนี้เป็น 520, (2004) ไม่เหมาะสำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [16] H. F. W. Dekkers, F. Duerinckx, J. Szlufcik and J. Nijs, “Silicon surface texturing by reactive ion etching”, *Opto-Electronics Review*. 8 (4), pp. 311-316, (2000)
- [17] S. Zaidi, D. Ruby, J. GEE, “Characterization of random reactive ion etched-textured silicon solar cells”, *IEEE Transaction on Electron Device*, 48 (6), pp. 1200-1206, (2001)
- [18] Kirt R. Williams, Kishan Gupta, Matthew Wasilik, “Etch Rates for Micromachining Processing—Part II”, *JOURNAL OF MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS*, VOL. 12, NO. 6, pp. 761-778, (2003)
- [19] Gosalvez MA, Tang B, Pal P, Sato K, Kimura Y, Ishibashi K, “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. *J Micromech Microeng* 19 (12): 125011 (18 pp), (2009)
- [20] Yaqin Wang, Ruizhi Luo, Junjun Ma and Shi-Qing Man, “Fabrication of the pyramidal microstructure on silicon substrate using KOH solution”, 5th International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology (AEMT 2015), pp. 302-307, (2015)
- [21] H. Seidel, L. Csepregi, A. Heuberger, H. Baumgartel, Anisotropic etching of crystalline silicon in alkaline solutions, orientation dependence and behavior of passivation layers, *J. Electrochem. Soc.* 137, 3612–3626, (1990)
- [22] Elin Steinsland, Terje Finstad, Anders Hanneborg, “Etch rates of (100), (111) and (110) single-crystal silicon in TMAH measured in situ by laser reflectance interferometry”, *Sensors and Actuators* 86 pp. 73–80, (2000)
- [23] รังสรรค์ เมืองเหลือ “การสร้างตัวตรวจรู้อัตราการไหลของก๊าซแบบความต้านทาน (RTD) โดยใช้เทคโนโลยีระบบกลไฟฟ้าจุลภาค” โครงการวิจัยสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ หน้า 21-24,

เอกสารนี้เป็น (2556) ที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] Tiago S. Monteiro, Pamakštys Kastytis, Luís M. Gonçalves, Graça Minas and Susana Cardoso, “DynamicWet Etching of Silicon through Isopropanol Alcohol Evaporation”, *Micromachines*, 6, pp.1534–1545, (2015)
- [25] A Brockmeier, F J Santos Rodriguez, M Harrison and U Hilleringmann, “Surface tension and its role for vertical wet etching of silicon”, *JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING*, 22 125012, pp.1-7, (2012)
- [26] Prem Pal, Kazuo Sato, Miguel Angel Gosálvez, Shintaro Itoh “Surfactant Adsorption on Single-Crystal Silicon Surfaces in TMAH Solution: Orientation-Dependent Adsorption Detected by In Situ Infrared Spectroscopy”, *Journal of Microelectromechanical Systems* 18(6):1345 – 1356, (2010)
- [27] [http://www.microchemicals.eu/technical\\_information/silicon\\_etching.pdf](http://www.microchemicals.eu/technical_information/silicon_etching.pdf), “Wet-Chemical Etching of Silicon”
- [28] W K CHOI, J T L THONG, Y BAI, PUNEET NEWASKAR and P LUO, “Effect of etchant concentration and defects on pyramid formation in TMAH etched silicon”, *Bull. Mater. Sci.*, Vol. 22, No. 3, pp. 615-621, (1999)
- [29] M. A. Green, “the path to 25% silicon Solar Cell Efficiency History of Silicon Cell Evolution”, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, 17, pp. 183-189, (2009)
- [30] Anita W. Y. Ho and Stuart R. Wenham, “Fabrication of silicon solar cells with rear pinhole contacts”, *Solar Energy Materials % Solar Cells* 91, pp. 1234-1242, (2007)
- [31] P. Campbell and M. A. Green, “Light trapping properties of pyramidally textured surfaces”, *J. App. Phys.* 62, pp. 243-249, (1987)
- [32] ยุทธนา แจ้งอรุณ, กมลวรรณ สุทธิเจริญ, โยธิน วงศ์ประเสริฐ, จิรวัดน์ ปราบเขตและสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตโอดิโอด โครงสร้าง UMSM ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 512-515, (2560)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [33] K. Seegera and R. E. Palmer, “Fabrication of silicon cones and pillars using rough metal films as plasma etching masks”, Appl. Phys. Lett., Vol. 74, No. 11, pp. 1627-1630, (1999)
- [34] Chog Barugkin, Thomas Allen, Teck K. Chong, Thomas P. White, Klaus J. Weber, and Kylie R. Catchpole, “Light trapping efficiency comparison of Si solar cell textures using spectral photoluminescence”, Optics Express Vol. 23, Issue 7, pp. 391-400, (2015)
- [35] P. Papet, O. Nichiporuk, A. Fave and M. Lemiti., “Pyramidal texturing of silicon solar cell with TMAH chemical anisotropic etching”, Solar energy materials & Solar cell 90, pp. 2319-2328, (2006)
- [36] B. Valleji, M. Gonzalez-Manas, J. Martinez-Lopez and M. A. Cabllero, “on the texturization of monocrystalline silicon with sodium carbonate solution”, Solar energy 81, pp. 565-569, (2007)
- [37] K. sato, M. Shikida, T. Yamashiro, M. Tsunekawa, S. Ito, “Roughening of single-crystal silicon surface etched by KOH water solution”, Sens. Actuat. A73, pp. 122-130, (1999)
- [38] <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/properties-of-light>
- [39] สราวุธ วิศวะแสงสุข, “การศึกษาคุณสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 5-6, 2545
- [40] [http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh\\_6.htm](http://www.rmutphysics.com/physics/oldfront/62/light1/ligh_6.htm)
- [41] [http://nomyensci.blogspot.com/2010/09/blog-post\\_9198.html](http://nomyensci.blogspot.com/2010/09/blog-post_9198.html)
- [42] The Physics Classroom. The Electromagnetic and Visible Spectra, [Online]. Available: <http://www.physicsclassroom.com/class/light/Lesson-2/The-Electromagnetic-and-Visible-Spectra>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [43] L. Graves., Thermal imaging cameras may help cyclists with red light troubles, [Online].Available:<http://www.katu.com/news/local/Thermal-imaging-cameras-may-help-cyclists-with-red-light-troubles-267094981.html>
- [44] K. Westra, “KOH and TMAH Etching of Bulk Silicon”, February 11, (2010)
- [45] วุฒิไกร คำอ่อน, ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, จีรวัดน์ ปราบเขต, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู”, การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 508-511, (2560)
- [46] ไอลดา สุวรรณชาติ, สุรดา เอื้อมานะพงษ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, รัชสรรค์ เมืองเหลือ, อัมพร โพธิ์ไย “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิคอนชนิดตัดกึ่งไดโอดที่ถูกแพร่สารเจือแพลตทินัม”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 36, หน้า 645-648, (2558)
- [47] สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, พิมพ์ครั้งที่ 4 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, (2549).
- [48] งามจิต มงคลธนานนท์, วุฒิไกร คำอ่อน, ธนภดต แสงโฮง, ยุทธนา แจ็งอรุณ, วรเทพ น้อยปรีชาและสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาสมบัติของกระแสแรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิฟิเจคทีฟที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 663-666, (2558)
- [49] C. Modovan, R. Iosub, D. Dascalu, G. Nechifor, “Anisotropic etching of silicon in complexant redox alkaline system”, Sens. Actuat. B58, pp. 438-449, (1999)
- [50] Wenshan Wei, Weilong You, Wei Zhao, Zhengyin Yu, Jun Pang, Heng Yang, “A novel approach for MEMS with galvanic protection on SOI wafer”, Microsyst Technol 21: pp. 1959–1965, (2015)
- [51] J.T.L thong, W.K. Choi, C.W. Chong, “TMAH etching of silicon and interaction of etching parameters”, Sens. Actuat. A63, pp. 243-249, (1997)

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [52] สมเกียรติ ศุภเดช, “เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์”, พิมพ์ครั้งที่ 4 แผนกตำรา คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2549.
- [53] E. D. Palik et al, “Etching roughness for (100) silicon surfaces in aqueous KOH”, J. Appl. 70, pp. 3291-3300, (1991)
- [54] กิตติศักดิ์ อมรสุนทรทวงศ์และทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์, “ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิคอนที่มีลวดลายพีระมิด”. การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 (E-NETT) (2553)
- [55] สุธดา เอื้อมานะพงษ์, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Cr/n-Si (Pt-Doped)/Cr”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 75-76, (2559)
- [56] ธเนศ โชะเหม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ และสรายุทธ์ วิศวแสงสุข, “ผลกระทบของอุณหภูมิซินเตอร์ริงที่มีต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโพโตไดโอดชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา”, วิศวกรรมลาดกระบัง, ปีที่ 21, ฉบับที่ 3 หน้า 14-19, (2547)
- [57] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: มินเซอรัลวิสหัพพลาย, หน้า 135-137, (2558).
- [58] สรายุทธ์ วิศวแสงสุข, สมชาติ พนาเกษม, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, โยอิจิ ยาซุมุระ และวิสุทธิ รุติรุ่งเรือง, “การศึกษาค่าความสูงกำแพงศักย์ของรอยสัมผัสชนิดที่ผ่านการซินเตอร์ริง”, การประชุมวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 23, หน้า 721-724, (2543)
- [59] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ”, พิมพ์ครั้งที่ 1, กรุงเทพฯ: มินเซอรัลวิสหัพพลาย, หน้า 12-13. (2558).
- [60] กุลวรางค์ นุตะมาน, “การศึกษาการออกแบบ การสร้างและลักษณะสมบัติของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง ITO/n-Si/ITO แบบอินเตอร์ดิเจิต”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, หน้า 91-96, (2552)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [61] ไอลดา สุวรรณชาติ, ‘ผลกระทบของการฉายรังสีเอกซ์บนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอย สัมผัสข้อต่อตึกที่แพร่สารเจือแพลทินัม’ วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. หน้า 68, 74, (2558)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] ยุทธนา แจ็งอรุณ, กมลวรรณ สุทธิเจริญ, โยธิน วงศ์ประเสริฐ, จิรวัดน์ ปราบเขตและสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง UMSM ด้วยการสร้างพีระมิดแบบส้อม”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 512-515, 2-4 พฤษภาคม 2560
- [2] ยุทธนา แจ็งอรุณ, กมลวรรณ สุทธิเจริญ, จิรวัดน์ ปราบเขตอภิขญา ทองรักษ์, รังสรรค์ เมืองเหลือและสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “เทคนิคการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้เพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM”การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 540-543, 2-4 พฤษภาคม 2560






The 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network  
of Rajamangala University of Technology

งานประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า  
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

# EENET 2017

"การพัฒนานวัตกรรมเพื่ออุตสาหกรรมและการเกษตรอย่างยั่งยืน"  
Sustainable Development of Innovation for Industry and Agriculture

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

### Conference Topics

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



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ครั้งที่ 9

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

การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง UMSM ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม

The increasing photodiode light current on UMSM structure that forming by random pyramid

ยุทธนา แซ่จอรุณ<sup>1</sup> กมลวรรณ ตูตติงเจริญ<sup>1</sup> โยธิน วงศ์ประเสริฐ<sup>1</sup> จิรวัดน์ ปราบเขต<sup>1</sup> และ ตูรศักดิ์ เข็มอมเจริญ<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง knsurasak@kmitl.ac.th, yuthana2.jangaroon@gmail.com ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) jirawat.prabkhet@nectec.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ได้นำเสนอการเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัว U (UMSM) ชนิด Al-n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 100  $\mu\text{m}$  โดยกำหนดความลึกในการกัดร่องรูปตัว U ประมาณ 4  $\mu\text{m}$  ด้วยการใช้สารละลาย KOH ในการกัด ทนเวลาสารละลาย KOH ความเข้มข้น 15 %wt และ 20 %wt ที่ใช้เวลากัดร่องรูปตัว U เป็นเวลา 4 นาที ได้ความลึกของซิลิคอนเท่ากับ 4.08  $\mu\text{m}$  และ 4.75  $\mu\text{m}$  ตามลำดับ ที่สารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 %wt พบว่ามีขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดที่ใกล้เคียงกันนำใช้สร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัว U และที่เอกรัศมีระยะที่ถาวรสองต้นของแสง พบว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสแสงที่เพิ่มขึ้นเราพบว่าเมื่อที่ตัดคือโครงสร้างของร่องรูปตัว U (หรือด้าน Slope) และการสร้างพีระมิดแบบสุ่มภายในร่องรูปตัว U โครงสร้างที่เปลี่ยนไปนี้ทำให้กระแสแสงเพิ่มขึ้น 2.37 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดแบบเชิงราบที่มีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากัน

คำสำคัญ: โฟโตไดโอด, เซมิคอนดักเตอร์, ร่องรูปตัว U, แอนไอโซทรอปิก

Abstract

In this article has presented on the increasing of photodiode light current with U-shaped groove typed Al-n-Si/Al by forming from random pyramid that used electrode distance at 100  $\mu\text{m}$ . For etching depth has specified on photodiode of U-shaped groove at 4  $\mu\text{m}$  by using KOH concentration. The report found that using KOH concentration at 15 % wt and 20 %wt for 4 minutes made silicon depth at 4.08  $\mu\text{m}$  and 4.75  $\mu\text{m}$  respectively. With KOH concentration at 20 %wt also found applicable pyramid in size and distribution for forming U-shaped groove photodiode. After examine on current characteristic found that the increasing of photo current has U-shaped groove structure (or Slope Side) as a key. Furthermore, while comparing with planer photodiode that has the same distance in electrode found that U-shaped groove photodiode forming from random pyramid has increased photo current to 2.37 times.

Key word: Photodiode, Optical sensor, U-Shaped Groove, Anisotropic

บทนำ

อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำแสงในปัจจุบันมีมากมายหลายชนิดหนึ่งในนั้นคือ โฟโตไดโอดแบบเชิงราบ (MSM) [1] แสดงในรูปที่ 1 (ก) โฟโตไดโอดเป็นอุปกรณ์วัดปริมาณความเข้มของแสง โดยสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้า [2] ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้งานกันอย่างมากมาย จึงทำให้โฟโตไดโอดได้รับการพัฒนาประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการลดกระแสรั่วและเพิ่มปริมาณของกระแสที่ผลิตขึ้น (กระแสที่ได้รับแสง หรือที่เรียกว่า กระแสแสง) เช่น การสร้างโฟโตไดโอดด้วยการเติมอะตอมสารเจือปนชนิดที่สาม เพื่อสร้างระดับทรapped (Trap level) ที่สามารถช่วยลดกระแสรั่วลงได้ แต่พบว่ากระแสแสงที่ได้มีค่าลดลงไปด้วย [3] นอกจากนี้ยังมีแนวทางการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ โดยอาศัยการฉายรังสีต่างๆ เช่น รังสีอิเล็กตรอน รังสีแกมมา และรังสีเอกซ์ [3] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัว U [4] พบว่าการใช้แผ่นที่มีสภาพต้านทานสูงทำให้การขยายตัวของบริเวณปลอดผลกระทบของลวดวงจรมีประสิทธิภาพขยับขยายไกลกว่าการเกิดกระแสแสงได้และยังพบว่าโฟโตไดโอดที่สร้างมีชั้นมีกรรมวิธีที่สูงอีกด้วย



รูปที่ 1 โฟโตไดโอดแบบ (ก) ได้รับแรงดันไบอัสและแสงตกกระทบบน (ข) โฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัว U

บทความนี้จะทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของโฟโตไดโอดด้วยการเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัว U (UMSM) ซึ่งพัฒนาจากโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ แสดงดังรูปที่ 1 (ข) โดยใช้เทคนิคการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ให้ร่องรูปตัว U ซึ่งใช้กับเทคนิคกระบวนการสร้างระบบเครื่องกลไฟฟ้าจุลภาค หรือระบบ (micro-electromechanical systems: MEMS) [5] ร่วมกับการสร้างกึ่งตัวนำแสงของ

บทความวิจัย

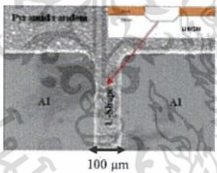
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

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

เซลล์แสงอาทิตย์เป็นเทคนิคที่นิยมใช้สร้างกันในอุตสาหกรรมเซลล์แสงอาทิตย์ [6] เพื่อลดปัญหาการสะท้อนกลับของแสงและเพิ่มโอกาสให้แสงตกกระทบบนผิวของซิลิคอนมากที่สุด ร่องรูปตัวยูของโฟโตไดโอดจะใช้การกัดด้วยสารเคมี ซึ่งมีอยู่หลายชนิดด้วยกัน [7] สำหรับบทความนี้ได้เลือกใช้สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ในกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก เพื่อสร้างพีระมิดแบบสุ่มในร่องรูปตัวยู จากนั้นทำการหาลักษณะผิว ทำการวิเคราะห์พื้นผิวซิลิคอนและโครงสร้างพีระมิดแบบสุ่มด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (FE-SEM) และวัดค่ากระแสแสงแรงดัน โดยใช้แหล่งจ่ายแสงจากหลอดฮาโลเจน

2. การเตรียมชิ้นงาน

กระบวนการสร้างโฟโตไดโอด ชนิด Al<sub>n</sub>-Si/Al แบบร่องรูปตัวยูในบทความนี้ใช้แผ่นซิลิคอน ชนิด n สภาพต้านทาน 10 Ω.cm ขนาด 625 μm โดยมีกระบวนการสร้างดังนี้ คือ เริ่มตั้งจากทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์และไอออนของโลหะ ที่อาจติดค้างอยู่บนผิวซิลิคอน จากนั้นทำการสร้างชั้นอะลูมิเนียมหนา 2 μm ด้วยเครื่องสเป็คโตรริง เพื่อสร้างเป็นขั้วไฟฟ้าของโฟโตไดโอด และสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนา 15,000 Å ด้วยเครื่อง PE-CVD เพื่อใช้เป็นชั้นป้องกัน การกัดอะลูมิเนียม ชั้นคอนทาม์ทำการเปิดช่องซิลิคอน โดยออกไซด์และอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการโฟโตลิโกราฟีและทำการกัดผิวซิลิคอนเป็นร่องรูปตัวยูด้วยสารละลาย KOH ที่มีความเข้มข้น 15 %wt และ 20 %wt ด้วยอุณหภูมิที่ 80 °C และความเร็วรอบของ Magnetic Stirrer 200 rpm ขั้นตอนสุดท้ายทำการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนอะลูมิเนียมที่เหลือออกจะได้โฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูแสดงดังในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงให้เห็นร่องรูปตัวยูและพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้น



รูปที่ 2 ภาพด้วยกล้องโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al<sub>n</sub>-Si/Al ที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม ด้วยสารละลาย KOH จากกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยกำลังขยาย 500 เท่า

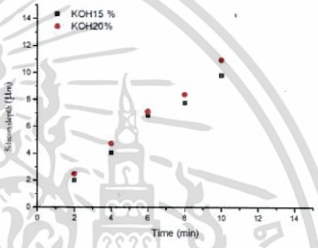
3 การทดลองและผลการทดลอง

3.1.1 สมบัติทางกายภาพของโฟโตไดโอดร่องรูปตัวยู

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าของโฟโตไดโอด จึงการกัดของกระแสแสงจะมีความสัมพันธ์กับบริเวณปลอด

ทหะ [2] ดังนั้นควมลึกการกัดร่องรูปตัวยูไม่ควรลึกมากเกินไปจนทำให้บริเวณปลอดทหะไม่สามารถเกิดขึ้นที่บริเวณด้านใต้ของร่องรูปตัวยู ดังนั้นการกัดร่องรูปตัวยูจึงเป็นตัวแปรที่สำคัญตัวหนึ่ง

ในรูปที่ 3 แสดงให้เห็นความลึกของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH กับเวลา แสดงให้เห็นว่าการกัดของสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20 %wt จะมีการกัดที่เร็วกว่าที่ความเข้มข้น 15 %wt โดยในการสร้างของโฟโตไดโอดนี้จะกำหนดความลึกของร่องรูปตัวยูประมาณ 4 μm ซึ่งจะสอดคล้องกับการเกิดบริเวณปลอดทหะอย่างเหมาะสมกับสภาพความต้านทานแผ่นซิลิคอน 10 Ω.cm ดังในรูปที่ 3 ถ้าให้เวลาในการกัดซิลิคอนที่เวลา 4 นาที ด้วยสารละลาย KOH ความเข้มข้น 15 %wt และ 20 %wt จะให้ความลึกของซิลิคอนเท่ากับ 4.08 μm และ 4.75 μm ตามลำดับ



รูปที่ 3 กราฟความลึกของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยของสารละลาย KOH ความเข้มข้น 15 %wt และ 20 %wt

3.1.2 ลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย KOH

ในรูปที่ 4 เป็นภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงให้เห็นการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH ความเข้มข้น 15 %wt (ในรูปที่ 4 (ก)) และสารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 %wt (ในรูปที่ 4 (ข)) แสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดจากการกัดในทิศทางที่ไม่เท่ากัน การกระจายตัวของพีระมิดนั้นเมื่อขยายไปยัง [5] แล้วในนี้ก็จะพิจารณาจากความเข้มข้น ซึ่งส่งผลให้เกิดปริมาณของค่าไซโลโรเจนขึ้นที่ผิวของซิลิคอนในระหว่างกระบวนการกัดเป็นปฏิกิริยารีดักชันของการแตกตัวของน้ำ [8] โดยในรูปที่ 4 (ก) แสดงให้เห็นผิวของซิลิคอนที่เกิดพีระมิดที่ขึ้นกับจากกรกัดด้วยสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 15 %wt มีปริมาณการกระจายตัวน้อย ในรูปที่ 4 (ข) คือลักษณะของผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt ได้ปริมาณการกระจายตัวของพีระมิดแบบสุ่มที่มากกว่า ส่วนในรูปที่ 4 (ค) เป็นภาพของภาคตัดขวางของชิ้นงานที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt จะเห็นว่าพีระมิดที่มีขนาดฐาน 4.76 μm สูง 2.98 μm ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่า

EL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

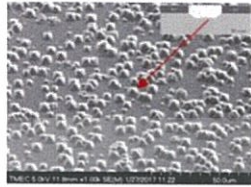
บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

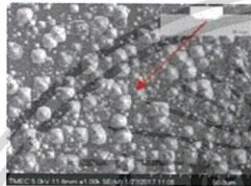
Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017 (EENET 2017)

สารละลาย KOH มีลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกจะหยุดกัดที่ระนาบ (111) หรือก็คือด้าน Slope ของพีระมิด

โครงสร้างต่างไปจากเดิม(แบบเชิงราบ) พบว่ากระแสมีของโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวซีมีค่ากระแสมีมากกว่าโฟโตไดโอดแบบบิรเบม ซึ่งกระแสมีของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบและแบบร่องรูปตัวซีมีค่าเท่ากับ 2.1  $\mu\text{A}$  และ 20.8  $\mu\text{A}$  ตามลำดับ



(n)



(u)

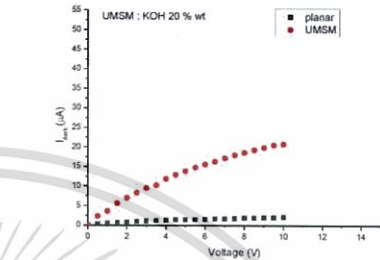


(k)

รูปที่ 4 ภาวะการกัดด้วยของพีระมิดแบบทึบบนพื้นผิวซิลิกอนจากกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (FE-SEM) โดย (ก)สารละลาย KOH 15 %wt (ข) สารละลาย KOH 20 %wt และ (ค) ภาพตัดขวางของชิ้นงานที่กัดด้วยสารละลาย KOH 20 %wt

3.3 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และขณะได้รับแสงตกกระทบ ของโฟโตไดโอด

จากหัวข้อที่ผ่านมาจึงเลือกสร้างโฟโตไดโอดที่กัดด้วยสารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 %wt เพราะมีขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดที่ต่ำกว่า จากขนาดร่องรูปตัวซี  $100 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$  ในรูปที่ 5 ภาวะในตวงความสัมพัทธ์ระหว่างกระแสมีและแรงดันไบอัส พบว่ากระแสมี ( $I_{\text{dark}}$ ) มีค่าเปลี่ยนแปลงตามแรงดันไบอัส ซึ่งมีค่ามากขึ้นเมื่อโฟโตไดโอดได้รับแรงดันไบอัสสูงขึ้น ส่งผลให้กระแสมีที่เกิดขึ้นภายในบริเวณปลดปล่อยมากขึ้นไปด้วย ในบทความนี้ โฟโตไดโอดได้มี

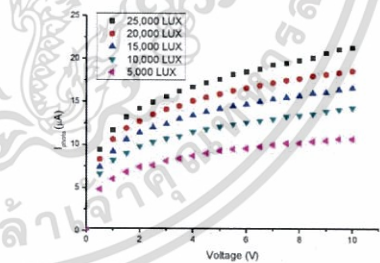


รูปที่ 5 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM แบบเชิงราบ และแบบร่องรูปตัวซี ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

เมื่อใช้แสงแหล่งจ่ายแสง Halogen Lam ตกกระทบที่บริเวณร่องรูปตัวซีที่โครงสร้างพีระมิดแบบทึบ ที่ความเข้มแสง 5,000 LUX ถึง 25,000 LUX โดยให้แรงดันไบอัสไปที่ 10 V สามารถคำนวณกระแสแสงได้จากสมการที่ 1 โดยที่

$$I_{\text{Photo}} = I_{\text{mea}} - I_{\text{dark}} \quad (1)$$

$I_{\text{Photo}}$  คือ กระแสแสงที่ได้รับ  $I_{\text{mea}}$  คือ กระแสแสงที่วัดได้  $I_{\text{dark}}$  คือ กระแสขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ซึ่งพบว่าโฟโตไดโอดทั้งสองสามารถตอบสนองของแสงได้เป็นอย่างดี

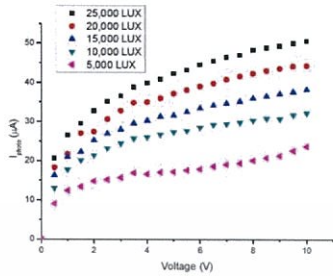


รูปที่ 6 กราฟลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของโฟโตไดโอด MSM แบบเชิงราบ ขณะได้รับแสงตกกระทบ

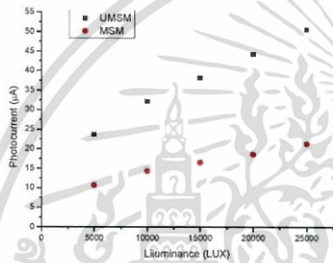
**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

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



รูปที่ 7 กราฟที่แสดงลักษณะสมบัติกระแสแสงแรงดันของโฟโตไดโอดแบบรวมรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 8 กราฟเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสแสงแรงดันของโฟโตไดโอดแบบรวมและแบบรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบที่แรงดันไบอัส 10 V

เมื่อนำค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดทั้งสองที่ได้มาหาคำนวณสัมพันธะระหว่างกระแสแสงกับความเข้มแสงต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 8 ที่ความเข้มแสง 25,000 LUX จะเห็นได้ว่าอัตราส่วนของกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบรูปตัวยูมีค่ามากกว่ากระแสแสงแบบเชิงราบถึง 2.37 เท่า และยังพบอีกว่าเมื่อให้ความเข้มแสงโฟโตไดโอดแบบรูปตัวยูเพิ่มมากขึ้นกระแสแสงที่ได้จะเพิ่มขึ้นอย่างเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกับโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ ที่ค่ากระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบรูปตัวยูเพิ่มมากขึ้นเนื่องมาจากโครงสร้างที่เปลี่ยนไป (หรือด้าน Slope) และการสร้างพีระมิดแบบคู่ภายในร่องรูปตัวยู

**4.สรุป**

การสร้างโฟโตไดโอดแบบรูปตัวยูชนิด Aln-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบคู่ที่มีระยะห่างระหว่างขั้ว 100 µm โดยคำนวณความลึกในการกัดร่องรูปตัวยูประมาณ 4 µm ด้วยการใช้สารละลาย KOH กัดพบว่าถ้าใช้สารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 %wt และเวลาการกัดร่อง

รูปตัวยูที่เวลา 4 นาที ได้ความลึกของซิกมอดเท่ากับ 4.75 µm และพบว่าที่ความเข้มข้นนี้มีขนาดและการกระจายตัวของพีระมิดที่ดีจึงเลือกนำมาใช้สร้างโฟโตไดโอดแบบรูปตัวยูและทำการวิเคราะห์การตอบสนองทางแสง พบว่าการเปลี่ยนแปลงกระแสแสงที่เพิ่มขึ้นมาจากตัวแปรที่สำคัญคือโครงสร้างของร่องรูปตัวยู(หรือด้าน Slope) และการสร้างพีระมิดแบบคู่ภายในร่องรูปตัวยูโครงสร้างที่เปลี่ยนไปนี้ทำให้กระแสแสงเพิ่มขึ้น 2.37 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับโฟโตไดโอดแบบเชิงราบที่มีระยะห่างระหว่างขั้วเท่ากัน ซึ่งค่าของกระแสแสงที่สูงนั้นจะนำไปพัฒนาและแก้ไขในการสร้างโฟโตไดโอดแบบรูปตัวยู ให้ดีขึ้นในอนาคต

**5. กิตติกรรมประกาศ**

งานวิจัยนี้ต้องขอขอบคุณนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้เครื่องมือวัดต่างๆ และนายอภิสิทธิ์ แซ่หลิม นายธัชชัช ใโตะตัน ที่ช่วยในการวัดชิ้นงานและสุดท้ายขอขอบคุณอาจารย์ประจำภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ สาขาไมโครอิเล็กทรอนิกส์

**6.เอกสารอ้างอิง**

- [1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, จอมสัมพันธ์โลหะและสารกึ่งตัวนำ, สำนักพิมพ์มีนเซอร์วิทย์ ชัณฑลยา
- [2] ไอลลา สุวรรณชาติ, สุรดา เตียมบะพงษ์, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, รั้งสรศักดิ์ เมืองเหล็ก, อัมพร ไทรโย “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของซิลิกอนชนิดที่บีโอดีโอดที่เติมสารเติมแต่ง”
- [3] ยุทธนา แซ่จอร์จ, ไอลลา สุวรรณชาติ, จมจิต มงคลชานนท์, วุฒิไกร คัชอน, สังกัด แกงโฮ, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, มนตรี แสนละมูล “การศึกษาผลของเกลือทินัมและรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด”
- [4] จมจิต มงคลชานนท์, จิรวัด ปรบมเขต, รั้งสรศักดิ์ เมืองเหล็ก, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “
- การศึกษาการกัดร่องรูปตัวยูสำหรับสร้างตัวคววรีแสง UMSM โดยสารละลาย TMAH”
- [5] Pal, P.; Sato, K.; Shikida, M.; Gosálvez, M.A. “Study of corner compensating structures and fabrication of various shapes of MEMS structures in pure and surfactant added TMAH”
- [6] กิตติศักดิ์ อมรสุรินทร์ ศ.ท.พิชญ์วรรณ พงษ์สุวรรณรักษ์ “ผลของกระแสที่อ่อนแสงของซิลิคอนที่เติมซิลิกอนที่มีผลลดขั้วพีระมิด”
- [7] K. Biswas\*, S. Kal.\* “Etch characteristics of KOH, TMAH And dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon”
- [8] Hiroshi Tanaka, Shuichi Yamashita “Fast etching of silicon with a smooth surface in high temperature ranges near the boiling point of KOH solution”



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ครั้งที่ 9

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

เทคนิคการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้เพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM  
Structure design technique for increasing photocurrent of UMSM

ยุทธนา แจงอรณ<sup>1</sup> กลมวรรณ ยุทธิเจริญ<sup>2</sup> จีรวัดน์ ปรานเขต<sup>3</sup> อธิษฐา ทองรัมย์<sup>4</sup> รังสรรค์ เมื่องเหลือ<sup>5</sup> และ ศุภศักดิ์ เขียนเจริญ<sup>6</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง E-mail: knsurasa@kmitl.ac.th,

yuthana.jangaroon@gmail.com <sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร

E-mail:aphichata.l@rmutp.ac.th <sup>3</sup>ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEIC) E-mail: jirawat.prabket@nectec.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเทคนิคการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้เพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM โดยใส่สารละลาย TMAH ที่ทำการเติมสารละลาย IPA และสารละลาย KOH เพื่อกัดพื้นผิวซิลิกอนในร่องรูปตัว U ที่มีลักษณะพื้นผิวเรียบและพื้นผิวที่มีการเกิดของพีระมิดแบบสุ่มตามลำดับ ในโครงสร้างนี้ใช้เอทิลีนเป็นขั้วไฟฟ้าและใช้ระยะห่างระหว่างขั้ว 100  $\mu\text{m}$  จากการทดสอบพบว่าความลึกในการกัดร่องรูปตัว U ซึ่งหาได้จากค่าการขยายตัวของบริเวณโดยรอบขณะเป็นเชิงจันต์สำคัญปัจจัยหนึ่งในการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัว U เพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากกว่าโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ และที่ความลึกร่องรูปตัว U ประมาณ 4  $\mu\text{m}$  พบว่าโครงสร้างแบบร่องรูปตัว U (ด้าน  $\alpha$  หรือ Slope) ที่พื้นที่รับแสงมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบ (ด้าน  $\beta$  ถึง 1.73 เท่าและเมื่อทำการกัดพื้นผิวซิลิกอนให้มีลักษณะพื้นผิวเรียบ โดยใช้สารละลาย TMAH 25 %wt ที่ทำการเติมสารละลาย IPA 30% พบว่าใช้เวลาในการกัด 12 นาที กัดผิวซิลิกอนลึก 4.12  $\mu\text{m}$  และมีลักษณะพื้นผิวที่เรียบที่สุด จากนั้นทำการกัดพื้นผิวซิลิกอนด้วยสารละลาย KOH พบว่าที่สารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 %wt เป็นเพียงความเข้มข้นเดียวที่ทำการกัดที่ระบิตแบบสุ่ม และใช้เวลาในการกัด 4 นาที กัดผิวซิลิกอนลึก 4.75  $\mu\text{m}$  และที่ระบิตที่กัดมีขนาดรอบ 4.76  $\mu\text{m}$  สูง 2.98  $\mu\text{m}$  มีข้อได้ลักษณะพื้นผิวและความลึกที่ต่อจากระบบขั้วไฟฟ้าโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างที่ระบิตแบบสุ่มและพื้นผิวเรียบไปอีกมากสัได้อาณาเขตกระแสโดยใช้กระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบเป็นตัวอ้างอิงเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองทางแสงต่อไปในอนาคต

คำสำคัญ: โฟโตไดโอด, เซนเซอร์แสงร่องรูปตัว U, แบบเอียงระบิต

Abstract

This article presents structure design technique for increasing photo current of UMSM photodiode. The study examined on TMAH solution adding with IPA and KOH solution that used on silicon surface etching process on U-shaped groove for making flat surface and randomly pyramid surface, respectively. About the structure in this

study has used aluminum electrode with distance for each electrode at 100  $\mu\text{m}$ . After the experimentation found the depth on etching U-shaped groove are formed on depletion region enlargement that is one of the key for making U-shaped groove photodiode. For increasing photocurrent area more than planer photodiode, U-shaped groove with depth at 4  $\mu\text{m}$  has used in this study and found that G side or Slope on U-shaped groove has more photo current area than the planer photodiode at 1.73 times. In addition, after etching on silicon surface and make it flat by using TMAH solution at 25 %wt adding with IPA 30 % found the result at 12 minutes has etching depth at 4.12  $\mu\text{m}$  and the most flat surface is occurred. Continuously etching process on silicon surface with KOH solution, the result shown that KOH with concentration at 20 %wt is the only amount that caused random pyramid. Furthermore, with etching process for 4 minutes, it found silicon depth at 4.75  $\mu\text{m}$ , pyramid base at 4.76  $\mu\text{m}$  and height at 2.98  $\mu\text{m}$ . After etching surface and depth is available for use on photodiode. The photodiode using for forming random pyramid and planer surface will be used for study on photo current characteristic of planer photodiode which can be reference for analyze photo current perception in further research.

Key word: Photodiode, Optical sensor, anisotropic, U-shaped

1. บทนำ

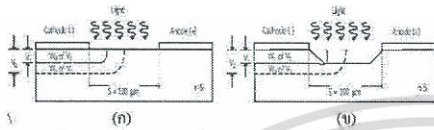
โฟโตไดโอด (Photodiode) เป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพสูงที่จะนำไปใช้ในงานอุปกรณ์ทางออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งมันข้อได้เปรียบกว่าตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่นๆ เพราะว่ามีควมจุไฟฟ้าและกระแสมีค่า [2] โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของ MSM-PD จะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสแบบช็อคกีย์สองรอยสัมผัสที่สร้างขึ้นทีวัดด้านบนของสารกึ่งตัวนำได้หลายชนิดคั้งเช่น ซิลิกอน (Si) หรือ แกลเลียมอะเซไนด์ (GaAs) เป็นต้นจึงทำให้ตรวจจันแสงได้ตั้งแต่ช่วงอินฟราเรดจนถึงอุลตราไวโอเลต โดยการเลือกสารกึ่งตัวนำที่เหมาะสม และใช้ส่วนของสารกึ่ง

บทความวิจัย

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

Proceedings of the 9<sup>th</sup> Conference of Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology 2017. (EENET 2017)

ความถี่อยู่ระหว่างขั้วโลหะทั้งสอง (Electrode spacing : S) เป็นส่วน  
ดูดกลืนแสงแต่กระแสแสงส่วนใหญ่เกิดจากบริเวณปลอดพาหะ (w<sub>p</sub>)  
แสดงให้เห็นในรูปที่ 1 (ก)



รูปที่ 1 โฟโตนิกโอด ขณะได้รับแสงคลื่นในอัตรแสงคงที่  
(ก) แบบเชิงราบ (ข) แบบร่องรูปถ้วย

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างของ MSM-PD แบบเชิงราบ กระบวนการ  
สร้างจะสอดคล้องกับเทคโนโลยีการสร้างวงจรรวมแบบ CMOS [1] ซึ่ง  
ง่ายต่อการพัฒนาเป็นวงจรรวมทางแสง (Optical Integrated Circuits)  
อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่ายังมีอีกโครงสร้างหนึ่งที่สามารถเพิ่ม  
ประสิทธิภาพทางแสงให้มากขึ้นในขณะที่สามารถขยายตัวของบริเวณ  
ปลอดพาหะแทนเดิมและใช้ระยะห่างระหว่างขั้วที่นั่นก็คือโครงสร้าง  
แบบร่องรูปถ้วย แสดงดังรูปที่ 1 (ข) ซึ่งจะมีค่าเอียง (หรือ Slope) ที่  
เพิ่มขึ้นจากเดิม (หรือแบบเชิงราบ) ในบทความจะทำการเปรียบเทียบผล  
โครงสร้างโฟโตนิกโอด โดยใช้เทคนิคการจำลองแบบไอโซทรอปิกให้  
ได้ร่องรูปถ้วย ซึ่งใช้กันมากในกระบวนการสร้างระบบเครื่องกลไฟฟ้า  
จุลภาคหรือเมมส์ (micro-electromechanical systems:MEMS) [5] ร่วมกับ  
การสร้างลิ้นค้ำแสงของผลึกแสง เกิดขึ้นที่เทคนิคที่นิยมใช้สร้างลิ้น  
ในอุตสาหกรรมเซมิคอนดักเตอร์ [4] เมื่อลดมุมการสะท้อนกลับของ  
แสงและเพิ่มโอกาสให้แสงตกกระทบผิวของซิลิกอนมากที่สุดส่วน  
สารเคมีที่ใช้ในการกัดแบบไอโซทรอปิก ในบทความนี้ได้ใช้  
สารละลาย KOH เพื่อสกัดผิวซิลิกอนให้เป็นพีระมิดแบบสุ่มและ  
สารละลาย TMAH-IPA เพื่อสกัดพื้นผิวซิลิกอนให้เป็นแบบหริวยและ  
เมื่อได้ลักษณะพื้นผิวที่ต้องการแล้วจึงนำโฟโตนิกโอดที่มีลักษณะผิว  
เรียบและโฟโตนิกโอดที่มีระนาบเรียบไปศึกษาผลการเกิดกระแส  
แสงต่อไปในอนาคต

2.การทดลอง

ในกระบวนการสร้างโฟโตนิกโอดแบบร่องรูปถ้วย (UMSM) ใน  
บทความนี้ใช้แผ่นซิลิกอน ชนิด 6 สกนความหนาหนา 10 Ω.cm หนา  
625 μm โดยมีกระบวนการสร้างดังนี้ คือ กระบวนการทำความสะอาด  
แผ่นซิลิกอน เพื่อกำจัดสารอินทรีย์ และไอออนของโลหะ ที่ติดอยู่บนผิว  
ซิลิกอน จากนั้นจึงทำการสร้างชั้นอะลูมิเนียมหนา 2 μm ด้วยเครื่อง  
สเป็คตริ่ง และสร้างชั้นซิลิกอนออกไซด์หนา 15,000 Å ด้วยเครื่อง PE-  
CVD เพื่อให้เป็นหน้าฉากป้องกันในการกัดอะลูมิเนียม ส่วนทำการเกิด  
ช่องซิลิกอน โอดออกไซด์และอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการลิโกราฟีและ  
ทำการสกัดผิวซิลิกอนเป็นร่องรูปถ้วยด้วย สารละลาย KOH และ

สารละลาย TMAH-IPA ชั้นคอนทักทำอย่างการกัดชั้นซิลิกอนโอด  
ออกไซด์บนอะลูมิเนียมที่เหลืออกจะให้โฟโตนิกโอดแบบร่องรูปถ้วย

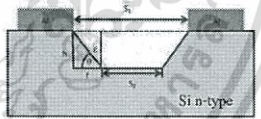
3.ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1การออกแบบโครงสร้างของโฟโตนิกโอด

เนื่องจากโฟโตนิกโอดเป็นอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่เปลี่ยนแปลง  
พลังงานจากแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้และในการออกแบบโครงสร้าง  
ของโฟโตนิกโอดจะคำนึงถึงระยะบริเวณปลอดพาหะ (Depletion  
Region) เป็นปัจจัยหลัก ซึ่งกระแสแสงจะมีควมสัมพันธ์กับบริเวณปลอด  
พาหะตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มมากขึ้นและสามารถคำนวณค่าการ  
ขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะจากได้สมการที่ 1 พหุนามที่แรงดัน 5 V  
และ 10 V ค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะอยู่ที่ 3.96 μm และ 5.48  
μm ตามลำดับ โดยที่

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

w<sub>D</sub> คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ, ε<sub>s</sub> คือค่าประมิวนิตีของ  
สารกึ่งตัวนำ, v<sub>bi</sub> คือแรงดันภายใน, V<sub>A</sub> คือแรงดันไบอัส, N<sub>D</sub> คือ  
ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ ดังนั้นความลึกของร่องรูปถ้วยจึงไม่ควร  
ลึกเกินค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ ดังนั้นการกัดร่องรูปถ้วยจึง  
เป็นตัวเลือกที่มีความสำคัญอีกตัวหนึ่ง



รูปที่ 5 โฟโตนิกโอดแบบร่องรูปถ้วย ชนิด Al/n-Si/Al

จากการคำนวณค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะทำให้เรา  
กำหนดความลึกในการกัดให้เป็นร่องรูปถ้วยได้ประมาณ 4 μm ไม่เกิน 5  
μm ในบทความนี้ได้ใช้เทคนิคการกัดแบบไอโซทรอปิก ที่ใช้กัน  
มากในกระบวนการสร้าง MEM มาประยุกต์ใช้ และทำการคำนวณหา  
พื้นที่รับแสงที่เพิ่มขึ้น (ด้าน ๒) โดยใช้การคำนวณทางตรีโกณมิติจาก  
สมการที่ 2 และสมการที่ 3 และใช้ความลึก (h) จากค่าการขยายตัวของ  
บริเวณปลอดพาหะประมาณ 4 μm โดยให้มุม 54.7° (เป็นมุมในการกัด  
แบบไอโซทรอปิก) [5] พบว่าโครงสร้างแบบร่องรูปถ้วย (ด้าน ๒) มี  
พื้นที่รับแสงมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบ (ด้าน D ถึง 1.73 เท่า ดัง  
แสดงในรูปที่ 5 โดยที่

EL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**บทความวิจัย**

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

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

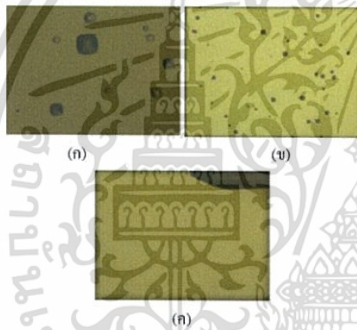
$$\frac{h}{g} = \sin\theta \quad (2) \qquad \frac{f}{g} = \cos\theta \quad (3)$$

h คือ ความลึกในการกัด, f คือ พื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ g คือ พื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบรูปตัว U

**3.2 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการกัดด้วย**

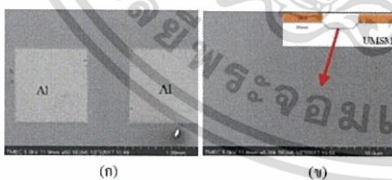
**สารละลาย TMAH**

ในรูปที่ 5 ภาพจากกล้อง Microscope กำลังขยาย 1500 เท่าแสดงให้เห็นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ และทำการเติม IPA 10 %, 20 % และ 30 % ตามลำดับ พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 25 %wt + IPA 30% ทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่เรียบที่สุด



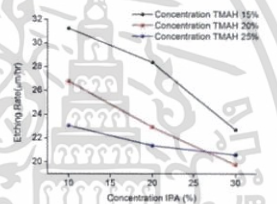
รูปที่ 5 ภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้อง Microscope ที่ทำการกัดด้วยสารละลาย TMAH + IPA 10 %, 20 %, 30 % ตามลำดับ

(a) TMAH 15 %wt (b) TMAH 20 %wt (c) TMAH 25 %wt



รูปที่ 6 ภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยสารละลาย TMAH 25 %wt + IPA 30 % ใช้ระยะเวลาในการกัด 12 นาที (a) ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงาน ที่กำลังขยาย 50 เท่า (b) ภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนหลังจากกระบวนการกัดที่ค่าสังขยา 10,000 เท่า

จากนั้นทำการวิเคราะห์อย่างละเอียดอีกครั้งด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 10,000 เท่า แสดงให้เห็นถึงความเรียบของผิวซิลิคอนแสดงดังรูปที่ 6 ในระหว่างกระบวนการกัดผิวซิลิคอนจะเกิดปฏิกิริยรีดักชันจากการแตกตัวของน้ำส่งผลทำให้เกิดฟองแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้น ซึ่งฟองแก๊สไฮโดรเจนจะเปรียบเสมือนหน้าฉากป้องกันในการกัด [3] ทำให้การกัดผิวของซิลิคอนไม่เรียบ ในบทความนี้จึงทำการเติมสารละลาย IPA ซึ่งเป็นสารลดแรงตึงผิวส่งผลทำให้ฟองแก๊สไฮโดรเจนขนาดใหญ่ออกออกไปได้ง่ายจึงทำให้การกัดผิวของซิลิคอนดีทั้งที่เติมสารละลาย TMAH IPA ยังส่งผลทำให้อัตราการกัดผิวของซิลิคอนลดลงเช่นกัน และในรูปที่ 7 กราฟแสดงอัตราการกัดผิวของซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ และทำการเติม IPA 10 %, 20 % และ 30 % ตามลำดับพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณ IPA มากขึ้นทำให้อัตราการกัดและที่เวลา 12 นาทีสารละลาย TMAH กัดผิวซิลิคอนลึก 4.12  $\mu\text{m}$



รูปที่ 7 กราฟอัตราการกัดของสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยเติม IPA 10 %wt, 20 %wt และ 30 %wt

**3.3 ลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวซิลิคอนที่ทำการกัดด้วย**

**สารละลาย KOH**

ในรูปที่ 8 ภาพจากกล้อง Microscope กำลังขยาย 1500 เท่าแสดงให้เห็นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย KOH พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย KOH 20 %wt ที่ใช้ทำการกัดมีเพียงความเข้มข้นเดียวที่พบลักษณะการกัดผิวซิลิคอนให้เป็นพีระมิดแบบตุ่ม ซึ่งอาจเกิดจากการใช้เวลาในการกัดที่น้อยจึงทำให้เกิดปฏิกิริยาในการแตกตัวของสารละลายส่งผลให้การกัดผิวของซิลิคอนช้าลงไปด้วย [3] และในรูปที่ 9 แสดงให้เห็นถึงขนาดของพีระมิดแบบตุ่มด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าการกระจายตัวของพีระมิดแบบตุ่มเกิดจากการกัดในทิศทางที่ไม่เท่ากันและการกระจายตัวของพีระมิดนั้นมีปัจจัยอยู่หลายอย่าง แต่ในที่นี้จะพิจารณาเฉพาะความเข้มข้นซึ่งส่งผลให้เกิดปริมาณฟองแก๊สไฮโดรเจนในระหว่างกระบวนการกัดและปริมาณฟองแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นที่ผิวของซิลิคอนยังเกิดมาจากปฏิกิริยรีดักชันของการแตกตัวของน้ำอีกด้วย [4] และพีระมิดที่เกิดขึ้นบนฐาน 4.76  $\mu\text{m}$  สูง 2.98  $\mu\text{m}$  ซึ่งจากรูปจะสังเกตเห็นได้ว่าสารละลาย

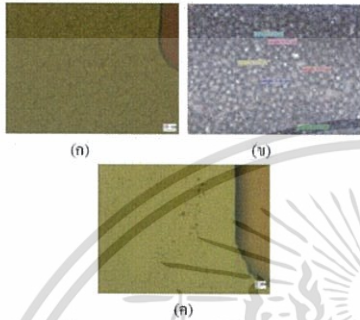
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทความวิจัย

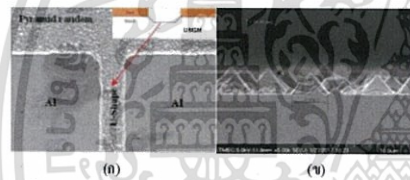
การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9

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

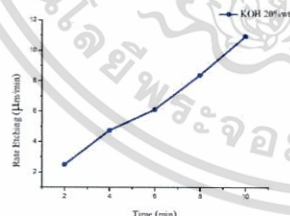
KOH มีลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกจะหลุดล่อนที่ระนาบ (111) หรือที่คือด้าน Slope ของพีระมิด ในรูปที่ 10 กราฟแสดงอัตราการกัดของสารละลาย KOH 20 %wt โดยใช้เวลาในการกัด 2 นาที ถึง 10 นาทีพบว่าอัตราการกัดผิวซิลิคอนอยู่ในช่วง 1-2 μm/min และที่เวลาในการกัด 4 นาที ที่กัดผิวซิลิคอนลึกลงไป 4.75 μm



รูปที่ 8 ภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้อง Microscope ที่ทำการกัดด้วยสารละลาย KOH (ก) ที่ 10%wt (ข) ที่ 20 %wt (ค) ที่ 30 %wt



รูปที่ 9 ภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราดด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม โดยใช้สารละลาย KOH และใช้ระยะเวลาในการกัด 4 นาที (ก) ภาพถ่ายด้านบนของชิ้นงานที่กำลังขยาย 50 เท่า (ข) ภาพตัดขวางของโฟโตไดโอดที่กำลังขยาย 5,000 เท่า



รูปที่ 10 กราฟอัตราการกัดของสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20 %wt โดยใช้เวลาในการกัดที่ 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที

4.สรุป

ในการออกแบบโครงสร้างของโฟโตไดโอดแบบ USMS เพื่อใช้เพิ่มกระแสแสง พบว่าจากการกำหนดความลึกโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่มีความลึกประมาณ 4 μm จากค่าการขยายตัวของบริเวณปลดพาเหน็บเป็นปัจจัยสำคัญปัจจัยหนึ่งในการสร้างโฟโตไดโอดแบบร่องรูปตัวยูเพื่อให้ได้พื้นที่รับแสงมากกว่าโฟโตไดโอดแบบเชิงราบ จึงพบว่าโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (ด้าน ๕) มีพื้นที่รับแสงมากกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบ (ด้าน ๖) ถึง 1.73 เท่า และเมื่อทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนให้ได้ผิวเรียบโดยใช้สารละลาย TMAH จึงพบว่าสารละลาย TMAH 25 %wt ที่มีกรดเค็มสารละลาย IPA 30 % และที่เวลาในการกัด 12 นาที กัดผิวซิลิคอนลึกลงไป 4.12 μm มีลักษณะพื้นผิวที่เรียบที่สุด จากนั้นทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มโดยใช้สารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น พบว่าที่สารละลาย KOH ความเข้มข้น 20 %wt การเกิดพีระมิดแบบสุ่มและที่เวลาในการกัด 4 นาที กัดผิวซิลิคอนลึกลงไป 4.75 μm เมื่อได้ลักษณะพื้นผิวและความลึกที่ต้องการแล้วจึงนำโฟโตไดโอดที่ทำการสร้างพีระมิดแบบสุ่มและพื้นผิวเรียบไปศึกษาการผลิตกระแสแสงโดยใช้การประเมินแสงของโฟโตไดโอดแบบเชิงราบเป็นตัวอ้างอิงเพื่อวิเคราะห์การตอบสนองทางแสงต่อไปในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ต้องขอขอบคุณ ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEIC) ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และบุคลากรของศูนย์วิจัยและทีมงานวิจัยทุกท่าน

6.เอกสารอ้างอิง

[1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, รวยเต็มผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2558  
[2] สุรชนา แจ้งอรุณ, โอลดา สุวรรณชาติ, งามจิต มงคลชนานนท์, วุฒิไกร ลิ้มอ่อน, สังกศิต์ เสง้อ, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, มนตรี แสนละมุล "การศึกษาค้นคว้าของเทคโนโลยีและรังสีเอ็กซ์ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางแสงของโฟโตไดโอด" EECN-37, THAILAND, pp.681-684, 2014  
[3] Hiroshi Tanaka, Shuichi Yamashita, Fast etching of silicon with a smooth surface in high temperature ranges near the boiling point of KOH solution  
[4] กิตติศักดิ์ อนุรัตน์ทางศ.ดร.ทิพย์วรรณ พึ่งสุวรรณรักษ์, ผลของกระแสที่อ่อนแอของผิวซิลิคอนที่งอกขึ้นซิลิคอนที่มีผลต่อประสิทธิภาพการประจักษ์วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้าแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6  
[5] Pal, P.; Sato, K.; Shikida, M.; Gosálvez, M.A. "Study of corner compensating structures and fabrication of various shapes of MEMS structures in pure and surfactant added TMAH"

EL

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายยุทธนา แจ้งอรุณ
วัน เดือน ปีเกิด	23 กุมภาพันธ์ 2533
ที่อยู่	57/33 หมู่ 2 แขวงบางชัน เขตคลองสามวา จังหวัด กรุงเทพมหานคร 10510
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเคมี-สิ่งแวดล้อม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1. กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ 2. ตัวตรวจจับแสง (Photodetector)

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] ยุทธนา แจ้งอรุณ, ไอลดา สุวรรณชาติ, งามจิต มงคลธนานันท์, วุฒิไกร คำอ่อน, ธนกฤต แสงโฮง, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, and มนต์รี แสนละมุน, “การศึกษาผลของการแพร่อะตอมสาเจือแพลทินัมและฉายรังสีเอกซ์ต่อคุณสมบัติไฟฟ้าของโฟโตไดโอด”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า. 681-684, 2557
- [2] ยุทธนา แจ้งอรุณ, ธนกฤต แสงโฮง, วุฒิไกร คำอ่อน, งามจิต มงคลธนานันท์, วรเทพ น้อยปรีชา, รังสรรค์ เมืองเหลือ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การศึกษาการหาค่าตัวแปรของรอยสัมผัสขั้วต่อทึบกี้อิโอด โครงสร้าง  $AV/n-Si$  ด้วยเทคนิคต่างๆ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 683-686, 18-20 พฤศจิกายน 2558
- [3] งามจิต มงคลธนานันท์, วุฒิไกร คำอ่อน, ธนกฤต แสงโฮง, ยุทธนา แจ้งอรุณ, วรเทพ น้อยปรีชา และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษาสมบัติของกระแส-แรงดัน ของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง  $AV/n-Si/Al$  แบบอินเตอร์ดิเจตที่มีระยะห่างขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 663-666, 18-20 พฤศจิกายน 2558
- [4] ธนกฤต แสงโฮง, ยุทธนา แจ้งอรุณ, วุฒิไกร คำอ่อน, งามจิต มงคลธนานันท์, วรเทพ น้อยปรีชา และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “การศึกษาสภาพการตอบทางแสงและประสิทธิภาพควอนตัม ของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง  $AV/n-Si/Al$ ”, การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 38, Volume II หน้า 769-772, 18-20 พฤศจิกายน 2558
- [5] วุฒิไกร คำอ่อน, ยุทธนา แจ้งอรุณ, ไอลดา สุวรรณชาติ, สุรศักดิ์ เนียมเจริญ “ผลจากการฉายรังสีเอกซ์ต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อทึบกี้อิโอด”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 หน้า 853-856, 25-27 พฤษภาคม 2559

- [6] ยุทธนา แจ็งอรุณ, ไอลดา สุวรรณชาติและสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การศึกษากลไกการเกิด กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่ถูกรังสีจากเสาไฟฟ้าแรงดันสูงและสายรังสีเอ็กซ์” การประชุม วิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 8 หน้า 857-860, 25- 27 พฤษภาคม 2559
- [7] ยุทธนา แจ็งอรุณ, กมลวรรณ สุทธิเจริญ, โยธิน วงศ์ประเสริฐ, จิรวัดน์ ปราบเขตและสุร ศักดิ์ เนียมเจริญ “การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอด โครงสร้าง UMSM ด้วยการสร้าง พิระมิดแบบส้อม” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 512-515, 2-4 พฤษภาคม 2560
- [8] ยุทธนา แจ็งอรุณ, กมลวรรณ สุทธิเจริญ, จิรวัดน์ ปราบเขตอภิชา ทองรักษ์, รังสรรค์ เมือง เหลือและสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “เทคนิคการออกแบบโครงสร้างเพื่อใช้เพิ่มกระแสแสงของโฟโต ไดโอดแบบ UMSM” การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9 หน้า 540-543, 2-4 พฤษภาคม 2560



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้