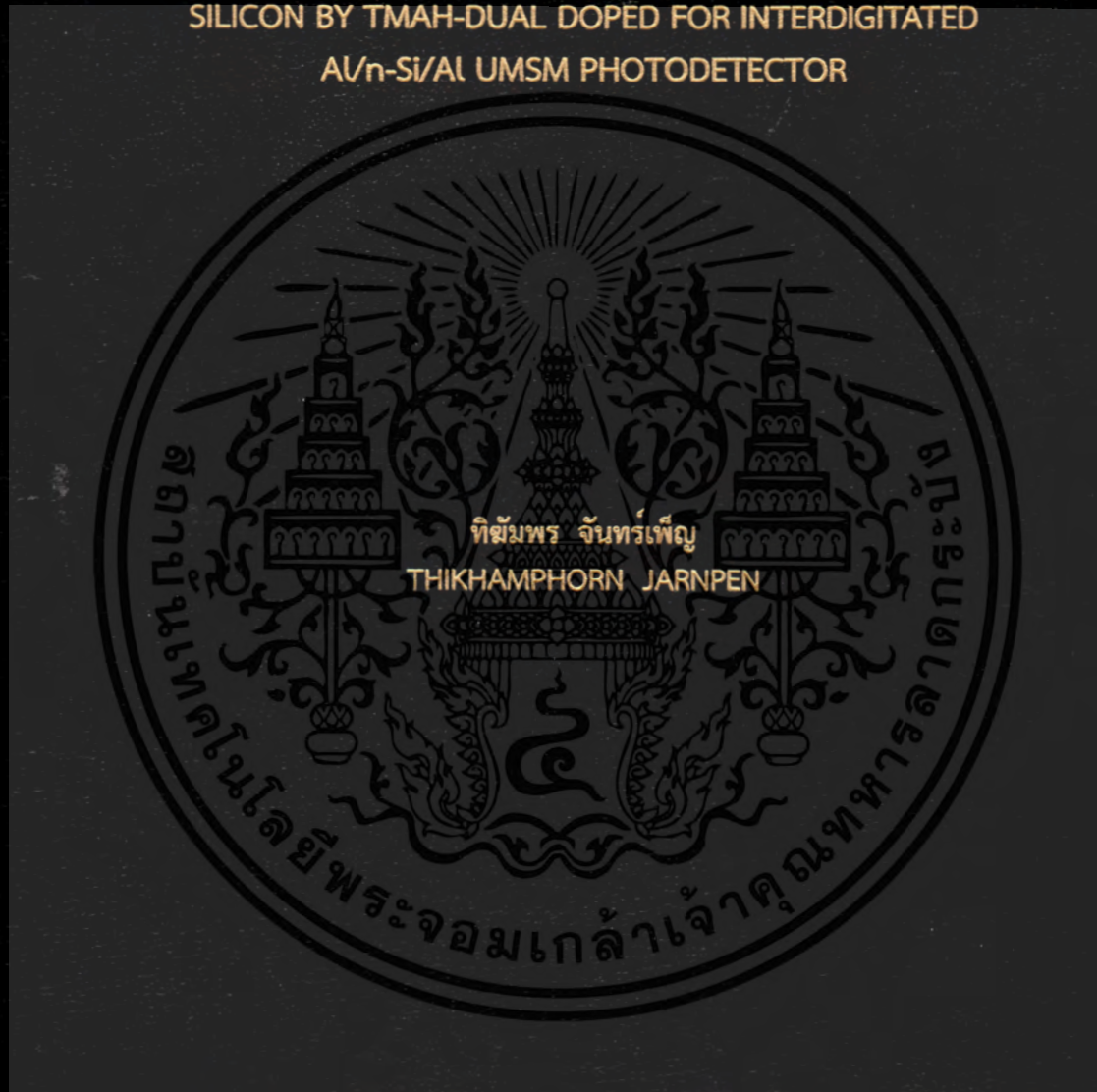


การลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้  
คูสารเจือของสารละลาย TMAH สำหรับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู  
ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทท

REDUCED ALUMINUM ETCHING RATE AND SURFACE ROUGHNESS OF  
SILICON BY TMAH-DUAL DOPED FOR INTERDIGITATED  
Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2561

KMITL-2018-EN-M-043-055

การลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้  
คู่สารเจือของสารละลาย TMAH สำหรับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู  
ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล

REDUCED ALUMINUM ETCHING RATE AND SURFACE ROUGHNESS OF  
SILICON BY TMAH-DUAL DOPED FOR INTERDIGITATED  
Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR



ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ  
THIKHAMPHORN JARNPEN

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
พ.ศ. 2561

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ KMUTL-2018-EN-M-043-055 เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

REDUCED ALUMINUM ETCHING RATE AND SURFACE ROUGHNESS OF  
SILICON BY TMAH-DUAL DOPED FOR INTERDIGITATED  
Al/n-Si/Al UMSM PHOTODETECTOR



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 THECNOLOGY LADKRABANG  
2018

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้า เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2018

FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ การลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้คู่สารเจือของสารละลาย TMAH สำหรับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทท

Thesis Title Reduced Aluminum Etching Rate and Surface Roughness of Silicon by TMAH-Dual Doped for Interdigitated Al/n-Si/Al UMSM Photodetector

นักศึกษา นายทีฆัมพร จันทร์เพ็ญ

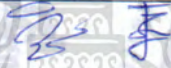



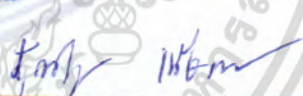
รหัสประจำตัว 59601184

ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2018-EN-M-043-055

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

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพุธที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2561 เวลา 11.30-13.30 น.

สถานที่สอบ ณ ห้อง HM-301 อาคารเฉลิมพระเกียรติ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรออกตีพิมพ์ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
คณะบดี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องออกมายังเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้  
วันที่ 11 กรกฎาคม พ.ศ. 2561

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้คู่อสารเจือของสารละลาย TMAH สำหรับตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วย ชนิด AL/n-Si/AL ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิต
นักศึกษา	นายทิมพร จันทร์เพ็ญ
รหัสนักศึกษา	59601184
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2561
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

### บทคัดย่อ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราการกัดอะลูมิเนียมและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด โดยคู่อสารเจือของสารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH-Dual Doped) เพื่อใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ชนิด AL/n-Si/AL ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิเจิต โดย TMAH-Dual Doped เป็นส่วนผสมระหว่างสารละลาย TMAH กรดซิลิซิก (Silicic Acid) และสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (AP) ซึ่งงานวิจัยที่ทำการศึกษามีการเติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH เพื่อศึกษาพฤติกรรมของสารละลายที่มีต่ออะลูมิเนียมและซิลิคอน ซึ่งเงื่อนไขการเติมกรดซิลิซิก 34 g/L ลงในสารละลาย TMAH 5 %wt ส่งผลให้อัตราการกัด Al น้อยที่สุด แต่ผิวซิลิคอนที่ถูกกัดมีความขรุขระมากทำให้ยากต่อการทำซ้ำในครั้งต่อไป ในงานวิจัยนี้จึงทำการเติมสาร AP ปริมาณต่างๆ ลงไปในสารตั้งต้น (TMAH 5 %wt + กรดซิลิซิก 34 g/L) และใช้อุณหภูมิในการกัด 80 องศาเซลเซียส พบว่าที่เงื่อนไขของการเติม AP 11.5 g/L จะส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระที่ไม่เกิน 10 นาโนเมตร ทำให้ง่ายต่อการทำซ้ำในครั้งต่อไป และยังคงจุดเด่นในด้านการกัดอะลูมิเนียมที่น้อยอยู่ โดยมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมอยู่ที่ 0.17  $\mu\text{m/hr}$  ด้วยอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่น้อยจึงส่งผลให้สามารถลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เป็นหน้ากากป้องกันได้ และสามารถนำเงื่อนไขของ TMAH-Dual Doped ที่ดีที่สุด (TMAH 5 %wt + กรดซิลิซิก 34 g/L + สาร AP 11.5 g/L) มาใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิตได้ โดยตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิตจะมีค่ากระแสมืดที่มากกว่าแบบ MSM และจะมีกระแสมืดที่มากขึ้นตามจำนวนขั้วไฟฟ้าที่มากขึ้น เนื่องมาจากการมีพื้นที่ของรอยสัมผัสขั้วต่อกันที่เพิ่มมากขึ้น และในส่วนของกระแสแสง ตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM จะมีกระแสแสงมากกว่าแบบ MSM อยู่ที่ 3.34 เท่า เนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงของโครงสร้างร่องรูปด้วย และเมื่อทำการเพิ่มขั้วไฟฟ้าให้มีจำนวนมากขึ้นจะส่งผลให้มีกระแสแสงมากขึ้น เนื่องมาจากจำนวนพื้นที่ที่ใช้ในการรับแสงมีมากขึ้น โดยวิทยานิพนธ์นี้พบว่าที่ จำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 6 ขั้ว ส่งผลให้มีกระแสแสงมากที่สุด เท่ากับ 139.06  $\mu\text{A}$  ซึ่งมีกระแสแสงที่มากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว หรือมีช่องรับแสงเดี่ยว ถึง 2.90 เท่า ดังนั้นผลการศึกษาที่ได้จะเป็นแนวทางที่สำคัญสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ชนิด AL/n-Si/AL ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบ

อินเตอร์ดิเจิตต่อไปในอนาคต ใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Thesis Title</b>	Reduced Aluminum Etching Rate and Surface Roughness of Silicon by TMAH-Dual Doped for Interdigitated Al/n-Si/Al UMSM Photodetector
<b>Student</b>	Mr. Thikhamphorn Jarpen
<b>Student ID</b>	59601184
<b>Degree</b>	Master of Engineering
<b>Program</b>	Microelectronics Engineering
<b>Year</b>	2018
<b>Thesis Advisor</b>	Assoc. Prof. Dr. Surasak Niemcharoen

## Abstract

This thesis purpose to study of aluminum etching rate and surface roughness of silicon by TMAH-Dual Doped for interdigitate Al/n-Si/Al UMSM photodetector. TMAH-Dual Doped is a mixture of TMAH, Silicic Acid and Ammonium Persulfate (AP). The reactant is determined, addition of silicic acid into the TMAH solution to study the behavior of the solution on aluminum and silicon. The previous research found that the addition of 34 g / l silicic acid into TMAH 5 %wt resulted in the lowest Al etching rate, but the surface silicon was very rough and difficult to repeat fabrication process. So, the amount of AP is added into the reactant and temperature at 80 °C. The results showed that the conditions of adding AP 11.5 g/l will result in a surface of silicon etched with a roughness of less than 10 nm, which makes it easier to repeat the next time. And still, the advantages of low aluminum etching rate. In this condition, the etching rate of aluminum is 0.17  $\mu\text{m/hr}$ , with a low aluminum etching rate, results in a reduction in the formation of a silicon dioxide layer of protective masks. TMAH-Dual Doped (TMAH 5% wt + 34 g / l silicic acid + AP 11.5 g / l) can be used in the process of fabricate an interdigitated Al/n-Si/Al UMSM photodetector. The interdigitated UMSM photodetector will have dark current over MSM photodetector and have more dark current as the number of electrodes increases. This is due to the increasing schottky contacts of photodetector. In the photocurrent, the UMSM photodetectors has a slightly higher photocurrent than the MSM, which is 3.34 times due to the increasing area of the U-shaped structure. And increasing the number of electrodes will result in more photocurrent. Due to the amount of area used to get more detect light. This thesis found that the number of electrodes was 6, resulting in a maximum of 139.06  $\mu\text{A}$ , which has a higher photocurrent than the UMSM photodetector with 2 electrodes or a single slit of 2.90 times. In conclusion, the result from this experiment can be used as the framework to fabricate the interdigitated Al/n-Si/Al photodetector in the future.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้จากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร. สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ช่วยให้คำชี้แนะแนวทาง ให้ความช่วยเหลือในการวางแผนการทำวิจัยตลอดจนให้ความรู้ และอบรมสั่งสอน ให้ประสบการณ์ในการดำเนินชีวิต การทำงานเป็นหมู่คณะ และการทำวิจัยแก่ข้าพเจ้า งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ที่ได้วางไว้ ข้าพเจ้าจึงขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาเป็นอย่างสูง ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. วิสุทธิ ฐิติรุ่งเรือง และ ดร. นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง ในการเมตตา ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ความสามารถ พร้อมทั้งอบรมสั่งสอนให้มีความรักสามัคคีในหมู่คณะ ตลอดจนให้โอกาสในการกล้าแสดงออก ความเป็นผู้นำ และถ่ายทอดประสบการณ์ในการใช้ชีวิตที่ดีแก่ข้าพเจ้าเพื่อนำไปเป็นแบบที่ดีในการดำเนินชีวิตต่อไป

ขอขอบพระคุณ รศ.ดร. ฐิตินัย แก้วแดง และ รศ. กานินิตย์ วงษ์เจริญ ในการแนะนำอาจารย์ที่ปรึกษาแก่ข้าพเจ้า และคอยปลุกฝังความมีคุณธรรม จริยธรรมที่ดี ตลอดจนคอยแนะนำและให้กำลังใจในการทำงานวิจัยของข้าพเจ้าให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้

ขอขอบพระคุณ ดร. อัมพร โพธิ์ไย, ดร. จิรวัดน์ ปราบเขต, ดร. วิน บรจจปรุ , คุณอวิรุทธ์ ศรีสุวรรณ และ เจ้าหน้าที่วิจัยที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในการทดลองบางส่วน ตลอดจนคำแนะนำต่างๆที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณยุทธนา แจ็งอรุณ และคุณวุฒิไกร คำอ่อน ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณเพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกคน ที่คอยช่วยเหลือทั้งในด้านงานวิจัย และการดำเนินชีวิต ตลอดจนเป็นกำลังใจให้โดยตลอดมา อันเป็นประโยชน์ในการทำงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณ บิดา มารดา และครอบครัวของข้าพเจ้า ที่คอยให้กำลังใจในยามที่ท้อแท้ และคอยสนับสนุน ส่งเสริม ในด้านการเรียนและทุนในการศึกษาโดยตลอดมา จนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

คุณประโยชน์อันพึงเกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมศาสตร์อิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และประสบการณ์ต่างๆ จนกระทั่งจบการศึกษา

ทีฆัมพร จันทร์เพ็ญ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ III อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII
รายการคำย่อ.....	XIII
รายการสัญลักษณ์.....	XV
รายการคำศัพท์เทคนิค.....	XVII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ในการศึกษา.....	5
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	6
1.4 ขั้นตอนของการศึกษา.....	6
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	7
บทที่ 2 ทฤษฎี.....	8
2.1 แสง.....	8
2.1.1 พฤติกรรมของแสง.....	9
2.1.2 คุณสมบัติของแสง.....	10
2.1.3 พฤติกรรมสารกึ่งตัวนำเมื่อโดนแสงตกกระทบ.....	11
2.2 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง.....	12
2.2.1 ความหมายและชนิดของตัวตรวจวัดแสง.....	12
2.2.2 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM.....	13
2.2.3 หลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักกี.....	14
2.2.3.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสขั้วตักกี.....	14
2.2.3.2 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักกีในสภาวะ สมดุล.....	16
2.2.3.3 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักกีขณะได้รับ แรงดันไบอัส.....	17
2.2.3.4 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักกีเมื่อมีแสง ตกกระทบ.....	18
2.2.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอย สัมผัสขั้วตักกี.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ IV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

หน้า

2.3	การเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM เป็น UMSM.....	20
2.3.1	กระบวนการกัด.....	21
2.3.2	ประเภทของกระบวนการกัด .....	21
2.3.2.1	การกัดแบบแห้ง.....	21
2.3.2.2	การกัดแบบเปียก.....	23
2.3.3	สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซโทรปิก .....	25
2.3.4	ปฏิกิริยาเคมีของสารละลาย TMAH ที่มีต่อพื้นผิวซิลิคอน .....	27
2.3.4.1	โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน .....	27
2.3.4.2	ปฏิกิริยาเคมีในการกัดซิลิคอน .....	29
2.3.5	สารเคมีที่นิยมเติมลงในสารละลาย TMAH เพื่อปรับปรุงคุณภาพใน การกัด .....	30
2.3.5.1	ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ .....	31
2.3.5.2	คู่สารเจือของสารละลาย TMAH.....	31
บทที่ 3	การออกแบบ และกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง.....	35
3.1	การออกแบบโครงสร้างแบบร่องรูปถ้วย และการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้า ของตัวตรวจวัดแสง .....	35
3.1.1	การออกแบบโครงสร้างแบบร่องรูปถ้วย .....	35
3.1.2	การออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าแบบช่องเดี่ยว และแบบอินเตอร์ดิจิตัล .....	37
3.2	กระบวนการสร้าง.....	38
3.2.1	กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน .....	38
3.2.2	กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม .....	39
3.2.3	กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	39
3.2.4	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	40
3.2.4.1	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ.....	41
3.2.4.2	กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า.....	41
3.3	การเตรียมสารเคมีเพื่อใช้ในกระบวนการกัดขึ้นงาน .....	42
3.4	กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al .....	44
3.5	กระบวนการขึ้นเตอริง .....	46
3.6	กระบวนการตัดแผ่นและเชื่อมต่อสายไฟ .....	46
3.7	กระบวนการทดสอบ .....	47
3.7.1	การทดสอบลักษณะทางกายภาพ .....	47
3.7.2	การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสงตกกระทบและไม่ได้รับแสงตกกระทบ .....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อผู้ใช้ได้เห็นใบเซอร์รองที่แนบมา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ Vong Anging ถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	50
4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ถูกกัด.....	50
4.1.1 การเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต ลงในกรดซิลิกและ สารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ .....	50
4.1.1.1 การศึกษาลักษณะผิวซิลิคอนที่ถูกกัด .....	51
4.1.1.2 การศึกษาอัตราการกัดซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์.....	55
4.1.2 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพของซิลิคอนที่ถูกกัดระหว่างการใช้ สารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เติมด้วยไอโซโพรพิล แอลกอฮอล์ และ TMAH-Dual Doped.....	60
4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	64
4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท.....	66
4.3.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท ขณะที่ไม่ได้ รับแสงตกกระทบ .....	67
4.3.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเท เมื่อมีแสง ตกกระทบ .....	70
4.3.2.1 ผลของการเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยกระบวนการกัดแบบเปียกด้วย สารละลาย TMAH-Dual Doped ที่มีต่อกระแส-แรงดันของตัว ตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	71
4.3.2.2 ผลของการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าที่มีต่อกระแส-แรงดันของตัว ตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	73
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ.....	76
เอกสารอ้างอิง.....	79
ภาคผนวก ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์ .....	84
ประวัติผู้เขียน.....	91

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VI อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ข้อมูลความแตกต่างของการกัดแบบเปียก และการกัดแบบแห้ง.....	25
2.2 การเปรียบเทียบข้อมูลการกัดของสารเคมีที่ใช้ในการกัดเปียกแบบแอนไอโซโทรปิก .....	26
3.1 เงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในกระบวนการกัดชิ้นงาน เพื่อหาเงื่อนไขในการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	42
3.2 ปริมาณสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟตปริมาณ ที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 %wt. + Silicic acid 34 g/l เพื่อหาเงื่อนไขในการสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	42
4.1 ข้อมูลขนาดความกว้างฐาน และความสูงของพีระมิดโดยเฉลี่ย ที่ทำการทดลองโดย ใช้ปริมาณสาร AP ที่แตกต่างกัน .....	54
4.2 ข้อมูลอัตราการกัดของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กัดโดย สารละลายเคมีที่ต่างกัน.....	60
4.3 ค่ากระแสที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ ของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ทั้งแบบ MSM และ UMSM ที่จำนวนขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน .....	69
4.4 ค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัล โดยมีจำนวนขั้วไฟฟ้าที่ต่างกัน .....	75

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่อาศัยกระบวนการกัดเข้าช่วยในการเพิ่มพื้นที่รับแสง โดยที่ (ก) แบบพลาสมา MSM และ (ข) แบบ UMSM.....	2
1.2 ความสามารถในการกัดอะลูมิเนียม โดยสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอน ปริมาณต่างๆ.....	3
1.3 พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดย (ก) สารละลาย TMAH เติมด้วยผงซิลิคอน และ (ข) สารละลาย TMAH เติมด้วย IPA .....	3
1.4 ความสัมพันธ์อัตราการกัดอะลูมิเนียมกับปริมาณกรดซิลิซิกที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก และสารละลาย AP 7 กรัมต่อลิตร .....	3
1.5 ความสัมพันธ์อัตราการกัดอะลูมิเนียมกับปริมาณสารละลาย AP ที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก และกรดซิลิซิก 30 กรัมต่อลิตร.....	4
1.6 ความสัมพันธ์อัตราการกัดซิลิคอนและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดกับปริมาณสารละลาย AP ที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก และกรดซิลิซิก 30 กรัมต่อลิตร.....	4
1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดันไบอัส ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิตเท.....	5
2.1 แผนภาพขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีในวิทยานิพนธ์.....	8
2.2 คุณสมบัติของแสงเมื่อตกกระทบลงบนวัตถุใดๆ.....	10
2.3 ความสัมพันธ์ E-K ของสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง.....	11
2.4 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ (ก) พี-เอ็นโพโตไดโอด (ข) พินโพโตไดโอด (ค) อะวาลานซ์โพโตไดโอด (ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM .....	12
2.4 (ต่อ) โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ (ก) พี-เอ็นโพโตไดโอด (ข) พินโพโตไดโอด (ค) อะวาลานซ์โพโตไดโอด (ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM .....	13
2.5 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง (ก) ตัวตรวจวัดแสงแบบ MS (ข) ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM (ค) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM .....	13
2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้วตักก็.....	15
2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสขั้วตักก็.....	16
2.8 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักก็ในสภาวะสมดุล ความร้อน.....	16
2.9 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักก็ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัส.....	18
2.10 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักก็ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสและได้รับแสงตกกระทบ .....	18
2.11 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วตักก็เมื่อได้รับแสงตกกระทบ .....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้เรียนเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้拿去ใช้ประโยชน์ในการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ VIII อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า	
2.12	กระบวนการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิวโดยเบื้องต้น (ก) การสร้างชั้นของฟิล์มบางส่วนแรกบนเนื้อซิลิคอน (ข) เปิดพื้นที่ที่ต้องการจะสร้างชั้นต่อไป (ค) สร้างชั้นฟิล์มส่วนที่สองบางเคลือบ (ง) ทำการลอกชั้นฟิล์มบางในส่วนแรกออก.....	21
2.13	การกัดซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดแบบแห้ง โดยใช้ลำแสงของไอออนหรือพลาสมาในการกัด.....	22
2.14	การกัดซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดแบบแห้งโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของก๊าซในการกัด .....	22
2.15	การกัดซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดแบบแห้งด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาในการกัด .....	23
2.16	ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการกัดแบบเปียก .....	23
2.17	ลักษณะเฉพาะของการกัดเปียกในลักษณะต่างๆ (ก) การกัดเปียกลักษณะไอโซโทรปิก (ข) การกัดเปียกลักษณะแอนไอโซโทรปิก.....	24
2.18	การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก .....	28
2.19	(ก) โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนแบบ FCC และภาพ (ข) โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนที่ระนาบต่างๆ .....	28
2.20	การจับตัวของไอออนไฮดรอกซิลกับแขนที่ว่างของซิลิคอนในระนาบต่างๆ (ก) ซิลิคอนระนาบ (100) (ข) ซิลิคอนระนาบ (111).....	29
2.21	(ก) กลไกการเกิดความขรุขระหรือเนินของพีระมิดจากสารละลาย TMAH (ข) ระนาบของซิลิคอนที่ถูกกัดจนกลายเป็นพีระมิดเกิดขึ้น .....	30
2.22	โครงสร้างทางเคมีของไอโซพรินแอลกอฮอล์ .....	31
2.23	โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิสิก .....	32
2.24	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์กับกรดซิลิสิกที่ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 5%wt ที่อุณหภูมิ 80 °C.....	32
2.25	ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ของตัวตรวจวัดแสง ที่อุณหภูมิ 80 °C สร้างโดย (ก) สารละลาย TMAH 5%wt +Silicic 34 g/l (ข) ภาพตัดขวางจาก SEM ของสารละลาย TMAH 5%wt +Silicic 34 g/l .....	33
2.26	โครงสร้างทางเคมีของสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต .....	34
3.1	ภาพภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู.....	36
3.2	ลักษณะลวดลายขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบช่องเดี่ยว และกระจกต้นแบบสำหรับสร้างลวดลายของชั้นอะลูมิเนียม .....	37
3.3	ลักษณะลวดลายขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบอินเตอร์ดิจิตัล และกระจกต้นแบบสำหรับสร้างลวดลายของชั้นอะลูมิเนียม .....	38
3.4	เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม (ก) ลักษณะภายใน และ (ข) ลักษณะภายนอกของเครื่องอาร์เอฟ-สปีดเตอริง ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) .	39

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ (ก) ลักษณะภายใน และ (ข) ลักษณะภายนอก PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC).....	40
3.6 ขั้นตอนของการเตรียมสารเคมีสำหรับใช้ในกระบวนการกัดเพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	43
3.6 (ต่อ) ขั้นตอนของการเตรียมสารเคมีสำหรับใช้ในกระบวนการกัดเพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	44
3.7 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	45
3.7 (ต่อ) กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	46
3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการขึ้นเตอริง.....	46
3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการตัดแผ่นและเชื่อมต่อสายไฟ (ก) เครื่องตัดแผ่นซิลิคอน เวเฟอร์ (ข) กาวเงินนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับจุดเชื่อมต่อ.....	47
3.10 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน (ก) เครื่อง Tencor P-10 surface profilometer (ข) เครื่อง Optical Microscope: OM (ค) เครื่อง Scanning Electron Microscope: SEM (ง) เครื่อง Atomic Force Microscope: AFM.....	48
3.11 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM Al/n-Si/Al.....	48
3.12 ลักษณะตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al.....	49
4.1 ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งกัดโดย TMAH-Dual Doped เจือปนไฮโดรเจนต่างๆ ดังนี้ (ก) 7.0 g/l (ข) 9.0 g/l (ค) 9.5 g/l (ง) 10.0 g/l (จ) 10.5 g/l (ฉ) 11.0 g/l (ช) 11.5 g/l และ (ซ) 13.0 g/l.....	51
4.1 (ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งกัดโดย TMAH-Dual Doped เจือปนไฮโดรเจนต่างๆ ดังนี้ (ก) 7.0 g/l (ข) 9.0 g/l (ค) 9.5 g/l (ง) 10.0 g/l (จ) 10.5 g/l (ฉ) 11.0 g/l (ช) 11.5 g/l และ (ซ) 13.0 g/l.....	52
4.2 ตัวอย่างลักษณะรูปทรงและการวัดขนาดของฐานพีระมิดที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	53
4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดกับปริมาณสาร AP ในเจือปนไฮโดรเจนต่างๆ ที่ทำการเติมลงในสารตั้งต้น.....	54
4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของซิลิคอนที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped.....	56
4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped.....	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ X ง่ายอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped.....	57
4.7 การเปรียบเทียบระหว่างความลึกของอะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped.....	57
4.8 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดซิลิคอนที่กัดโดยใช้สารละลายที่แตกต่างกัน.....	59
4.9 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่กัดโดยใช้สารละลายเคมีที่แตกต่างกัน.....	59
4.10 แผนภูมิแห่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ที่กัดโดยใช้สารละลายเคมีที่แตกต่างกัน.....	60
4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยใช้สารละลาย (ก) TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol และ (ข) TMAH-Dual Doped ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	61
4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยใช้สารละลาย (ก) TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol และ (ข) TMAH-Dual Doped ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า.....	61
4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) แสดงการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยใช้สารละลาย (ก) TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol และ (ข) TMAH-Dual Doped.....	62
4.14 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจเทททำการกัดโดยใช้ TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 5,000 เท่า.....	63
4.15 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจเทททำการกัดโดยใช้ TMAH-Dual Doped ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 5,000 เท่า.....	63
4.16 การตรวจสอบปริมาณธาตุที่คงค้างอยู่บนพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยเครื่อง EDX โดย (ก)บริเวณที่ทำการตรวจสอบ และ (ข) ปริมาณธาตุที่พบอยู่บนพื้นที่ที่ตรวจสอบ.....	64
4.17 พื้นที่รับแสงที่ถูกเพิ่มขึ้นจากกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก.....	64
4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสตกคร่อมรอยสัมผัสช็อคกีกับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ.....	65
4.19 ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	65

## สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.20 ภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์ อิเล็กตรอนแบบส่องกราด .....	66
4.21 ภาพตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ ดิเจเทท ที่ผ่านการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงินเรียบร้อยแล้ว.....	67
4.22 ชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงภายใต้เงื่อนไข (ก) ไม่ได้รับแสงตกกระทบ และ (ข) ได้รับแสงตกกระทบ .....	67
4.23 กลไกการเกิดกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM .....	68
4.24 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจเททขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ .....	69
4.25 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ .....	71
4.26 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSM ที่สร้าง โดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ.....	71
4.27 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างแบบ UMSM ที่สร้างโดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped ขณะที่ได้รับ แรงดันไบอัส 10 โวลต์ .....	72
4.28 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่มีจำนวน ขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน ขณะที่มีความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 ลักซ์ และแรงดัน ไบอัส 10 โวลต์.....	73
4.29 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSM ที่มีจำนวน ขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน ขณะที่มีความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 ลักซ์ และแรงดัน ไบอัส 10 โวลต์.....	74
4.30 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (ก) 2 ขั้ว (ข) 4 ขั้ว และ (ค) 6 ขั้ว .....	74
4.31 เปรียบเทียบกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้า แตกต่างกัน.....	74

## รายการคำย่อ

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
AFM	Atomic Force Microscope	กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม
Al	Aluminum	อะลูมิเนียม
AP	Ammonium Peroxodisulfate	แอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต
APCVD	ATM-ospheric Pressure Reactor System	กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีที่ความดันบรรยากาศ
Ar	Argon	อาร์กอน
BOE	Buffer Oxide Etching	กรดกัดออกไซด์
CB	Conduction Band	แถบนำไฟฟ้า
CDE	Chemical Dry Etching	การกัดโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ
CF <sub>4</sub>	Tetrafluoromethane	เตตระฟลูออโรมีเทน
CH <sub>3</sub> COOH	Acetic acid	กรดอะซิติก
(CH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> NOH	Tetra-methyl Ammonium Hydroxide	เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
CVD	Chemical Vapor Deposition	การสร้างฟิล์มบางด้วยไอสารเคมี
DI	De-Ionization water	น้ำบริสุทธิ์
EDP	EthyleneDiamine Pyrocatechol	เอธิลีนไดแอมีน ไพโรคาทิกอล
EDX	Energy Dispersive X-ray Spectrometer	เครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ
ER	Etching Rate	อัตราการกัด
ERC	Electronics Research Center	ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์
FCC	Face Centered Cubic	เฟสเซ็นเตอร์คิวบิก
H <sub>2</sub>	Hydrogen	ไฮโดรเจน
HF	Hydrofluoric Acid	กรดไฮโดรฟลูออริก
HNO <sub>3</sub>	Nitric acid	กรดไนตริก
H <sub>2</sub> O	Water	น้ำ
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Hydrogen peroxide	ไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	Phosphoric acid	กรดฟอสฟอริก
Hr	Hour	ชั่วโมง
H <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>	Silicic acid	กรดซิลิสิก
IBE	Ion Beam Etching	การกัดโดยใช้ลำแสงของไอออน
IC	Integrated Circuit	วงจรรวม
IPA	Isopropyl Alcohol	ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XIII อังอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำย่อ (ต่อ)

อักษรย่อ	คำเต็มภาษาอังกฤษ	คำแปลภาษาไทย
K	Kinetic	พลังงานจลน์
KOH	Potassium Hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
LED	Light Emitting Diode	ไดโอดเปล่งแสง
LPCVD	Low Pressure CVD	กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีที่ความดันบรรยากาศต่ำ
MSM	Metal-Semiconductor-Metal	โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ
n-Si	n-type Silicon	ซิลิคอนชนิดเอ็น
NF <sub>3</sub>	Nitrogen Trifluoride	ไนโตรเจน ไตรฟลูออไรด์
NH <sub>4</sub> F	Ammonium Fluoride	แอมโมเนียมฟลูออไรด์
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>8</sub>	Ammonium Peroxodisulfate	แอมโมเนียมเปอร์ออกโซไดซัลเฟต
OH <sup>-</sup>	Hydroxide	ไฮดรอกไซด์
OM	Optical Microscope	กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง
PECVD	Plasma Enhanced CVD	กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีโดยหลักการของพลาสมา
PR	Photoresist	น้ำยาไวแสง
RF	Radio Frequency	คลื่นความถี่วิทยุ
RIE	Reactive Ion Etching	การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา
SEM	Scanning Electron Microscope	กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด
SF <sub>6</sub>	Sulfur Hexafluoride	ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์
Si	Silicon	ซิลิคอน
SiO <sub>2</sub>	Silicon Dioxide	ซิลิคอนไดออกไซด์
SiOH <sup>-</sup>	Silicon Hydroxide	ซิลิคอนไฮดรอกไซด์
TMAH	Tetra-methyl Ammonium Hydroxide	เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์
TMEC	Thai Microelectronics Center	ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์
UMSM	U-shaped MSM	โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะร่องรูปตัวยู
UV	Ultra Violet	อัลตราไวโอเล็ต
Vol.	Volume	ปริมาตร
Wt.	Weight	น้ำหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และXIVอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการสัญลักษณ์

$A$	คือ	พื้นที่ระหว่างรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ
$c$	คือ	ความเร็วแสง
$\chi_s$	คือ	ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี
$E_{photon}$	คือ	พลังงานโฟตอน
$E_0$	คือ	ระดับสุญญากาศ
$E_C$	คือ	แถบนำไฟฟ้า
$E_{FM}$	คือ	ระดับเฟอร์มิของโลหะ
$E_{FS}$	คือ	ระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ
$E_i$	คือ	ระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน
$E_V$	คือ	แถบวาเลนซ์
$f$	คือ	บริเวณรับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ
$\phi_{bn}$	คือ	กำแพงศักย์ข้อตัก
$\phi_m$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$\phi_s$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$g$	คือ	บริเวณรับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปถ้วย
$h$	คือ	ความลึกในการกัด
$h\nu$	คือ	พลังงานโฟตอน
$h_{plank}$	คือ	ค่าคงที่ของพลังค์
$I_0$	คือ	กระแสอิ่มตัว
$I_{dark}$	คือ	กระแสมืดหรือกระแสรั่วไหล
$I_{ms}$	คือ	กระแสไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ
$I_{photo}$	คือ	กระแสแสง
$I_{sm}$	คือ	กระแสไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ
$I_{total}$	คือ	กระแสรวม
$k$	คือ	ค่าคงที่ของโบสต์มันน์
$L$	คือ	ความยาวของขั้วไฟฟ้า
$\lambda$	คือ	ความยาวคลื่น
$N_D$	คือ	ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้ให้
$q$	คือ	ประจุอิเล็กตรอน
$\theta$	คือ	มุมเฉพาที่เกิดจากการกัด
$q\phi_m$	คือ	ฟังก์ชันงานของโลหะ
$q\phi_s$	คือ	ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ
$R$	คือ	ค่าคงที่รีซาร์ดสัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XV อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$S$  คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า

## รายการสัญลักษณ์ (ต่อ)

$T$  คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส

$V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์ภายใน

$W$  คือ ความกว้างของขั้วไฟฟ้า

$W_D$  คือ ความกว้างบริเวณปลอดพาหะ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และXVIอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค

### ภาษาไทย

### ภาษาอังกฤษ

กรดกัดออกไซด์	Buffer oxide etching
กรดกัดอะลูมิเนียม	Aluminum etching
กรดซิลิสิก	Silicic acid
กรดออร์โธซิลิก	Orthosilic acid
กระบวนการซินเตอร์ริง	Sintering process
กระบวนการสร้าง	Fabrication process
กระแสมืด	Dark current
กระแสแสง	Photocurrent
การกัด	Etching
การกัดแบบเปียก	Wet etching
การกัดเปียกแบบแอนไอโซโทรปิก	Anisotropic wet etching
การกัดเปียกแบบไอโซโทรปิก	Isotropic wet etching
การกัดแห้ง	Dry etching
การดูดกลืน	Absorption
การแพร่	Diffusion
การสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ	Bulk micromachining
การสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว	Surface micromachining
การสร้างโครงสร้างระดับจุลภาค	Micromachining
การส่องผ่าน	Transmission
การสะท้อน	Reflection
กำแพงศักย์ช็อตกีย์	Schottky barrier
กำแพงศักย์ภายใน	Built in voltage
ขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทท	Interdigitated electrodes
คู่อิเล็กตรอน-โฮล	Electron-hole pair
คู่สารเจือของสารละลาย TMAH	TMAH-Dual Doped
แคโทด	Cathode
ช่องรับแสงเดี่ยว	Single slit
ช่องว่างพลังงาน	Energy gap
ชิพ	Chip
เชิงราบ	Planar
ตัวตรวจวัดแสง	Photodetector
ตัวรีดิวซ์	Reduce agent

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และ XVII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายการคำศัพท์เทคนิค (ต่อ)

### ภาษาไทย

### ภาษาอังกฤษ

ตัวออกซิไดส์	Oxidizing agent
เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์	Tetramethyl Ammonium Hydroxide
แถบนำไฟฟ้า	Conduction band
แถบวาเลนซ์	Valence band
ทรานซิสเตอร์	Transistor
บริเวณปลอดพาหะ	Depletion region
ไบอัสตรง	Forward bias
ไบอัสย้อนกลับ	Reverse bias
ปฏิกิริยารีดอกซ์	Redox reaction
ปฏิกิริยารีดักชัน	Reduction reaction
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน	Oxidation reaction
พาหะส่วนมาก	Majority carrier
ฟังก์ชันงาน	Work function
โฟโตลิโธกราฟี	Photolithography
ร่องรูปตัวยู	U-shaped
รอยสัมผัสซีออกไซด์	Schottky contact
รอยสัมผัสโอห์มิก	Ohmic contact
รอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ	Metal-Semiconductor-Metal contact
ระดับเฟอร์มิ	Fermi level
ระดับสุญญากาศ	Vacuum level
วงจรรวม	Integrated Circuit
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	N-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	P-type semiconductor
สารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง	Indirect band gap
สารกึ่งตัวนำแบบแถบตรง	Direct band gap
สารไวแสง	Photoresist
แอโนด	Anode
แอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต	Ammonium Peroxodisulfate
ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์	Isopropyl Alcohol

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา แล XVIII อ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทและเป็นศูนย์กลางของการใช้ชีวิตประจำวันของเราเป็นอย่างมาก โดยในสมัยก่อนจะพบว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่พบเห็นในบ้านเรือนจะมีเพียงโทรทัศน์และวิทยุ ซึ่งอุปกรณ์ที่เหล่านี้ล้วนแล้วแต่มีหลอดสุญญากาศเป็นส่วนประกอบแทบทั้งสิ้น แต่ไม่กี่ปีต่อจากนั้นมีการประดิษฐ์และพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ 2 สิ่งที่สำคัญไม่ว่าจะเป็นทรานซิสเตอร์ (transistor) และวงจรรวม (integrated circuit) โดยในยุคสมัยใหม่ที่มีการพัฒนาอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อย่างต่อเนื่องและรวดเร็ว จะพบว่าในวงจรรวมหรือที่คนส่วนใหญ่เรียกว่าชิพ (chip) จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์มากกว่าหนึ่งพันล้านตัวที่สามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว แม่นยำ มีเสถียรภาพสูงและที่สำคัญคือ มีราคาถูก ทำให้สามารถเข้ามาแทนที่หลอดสุญญากาศได้อย่างถาวร จึงแสดงให้เห็นว่าในการประดิษฐ์อุปกรณ์เหล่านี้ จะต้องมีการพัฒนาอุปกรณ์ทั้งในส่วนเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิต และอุปกรณ์ที่จะต้องมีการตอบสนองต่อผู้บริโภคในปัจจุบันให้ทัน่วงที

โดยในโลกยุคปัจจุบันนั้น ปฏิเสธไม่ได้เลยว่าอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในชีวิตประจำวันเรียบร้อยแล้ว ไม่ว่าจะเป็นการสนทนา การอ่านข่าว การดูหนังฟังเพลงผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่และคอมพิวเตอร์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าในยุคปัจจุบันเป็นยุคที่เราต้องการติดตามข่าวสารอย่างรวดเร็ว ดังนั้นจึงมีการพัฒนาอุปกรณ์ที่ใช้ในการส่งข้อมูลและรับข้อมูลเกิดขึ้น เช่น การส่งผ่านข้อมูลแบบไร้สาย การส่งผ่านข้อมูลแบบใยแก้วนำแสง เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการส่งผ่านข้อมูลที่รวดเร็วนี้จำเป็นต้องมีอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับสัญญาณ ซึ่งตัวรับสัญญาณจะเปลี่ยนสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้าได้และส่งไปประมวลผลต่อไป อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณนั้นก็คือ โฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) หรือเรียกว่าตัวตรวจวัดแสง [1] จากที่กล่าวมาแล้วข้างต้นพบว่า ปัจจัยที่จะทำให้การส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ การทำงานที่รวดเร็ว และการขยายสัญญาณที่สูงของตัวตรวจวัดแสง ในวิทยานิพนธ์นี้จึงจะทำการศึกษาและพัฒนาคุณสมบัติในด้านเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงขึ้นมา

โดยทั่วไปแล้วตัวตรวจวัดจะจัดอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์ประเภท photodiode ซึ่งถ้าแบ่งตามโครงสร้างจะมีอยู่หลายประเภท [2] เช่น พี-เอ็น โฟโตไดโอด (p-n photodiode), พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode), อวาแลนซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode) และโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal: MSM) ตัวตรวจวัดแสงแต่ละประเภทจะมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกันไป ในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกที่จะทำการศึกษาและพัฒนาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal: MSM) ขึ้น

ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ที่ทำการศึกษาและพัฒนาในวิทยานิพนธ์นี้ จะเป็นการสร้างขั้วโลหะอะลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น (Al/n-Si/Al) โดยรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมและแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นนี้จัดอยู่ในกลุ่มของอุปกรณ์ประเภทช็อตติง [3-4] ดังนั้นเหตุผลที่เลือกศึกษาและ

พัฒนาตัวตรวจวัดแสงประเภทนี้คือ มีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย และเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ประเภทซ็อกเก็ตก็ จึงมีความจุไฟฟ้าต่ำ มีสภาพการตอบสนองที่ดี ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี และเนื่องจากมีโครงสร้างที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนจึงสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้โดยง่าย [5] ด้วยข้อดีเหล่านี้จึงเป็นเหตุผลให้เลือกที่จะศึกษาและพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้

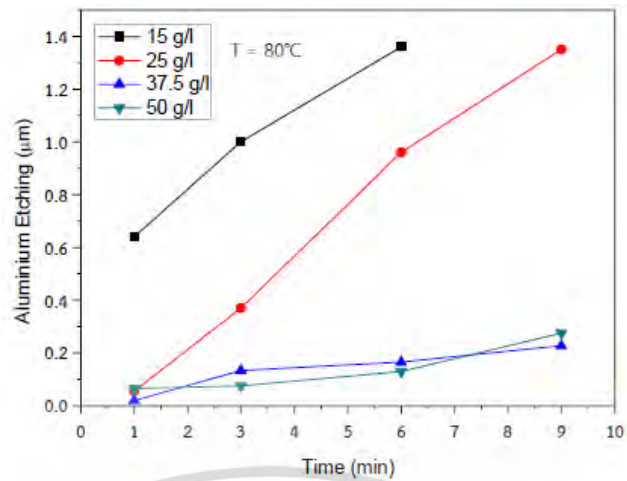
- ในปี พ.ศ. 2559 การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบบรูว์รูปร่างตัวยู(U-shaped MSM; UMSM) มีการนำกระบวนการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกโดยสารละลาย TMAH เข้ามาใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง เพื่อต้องการที่จะเพิ่มพื้นที่รับแสง ที่จะส่งผลให้มีกระแสที่เพิ่มขึ้นมากกว่าของตัวตรวจวัดแสง MSM แบบพลาเนอร์ และมีการเติมผงซิลิคอนเพื่อต้องการให้มีอัตราการกัดของซิลิโคนที่ลดลง โดยจะพบว่าเมื่อทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงให้มีลักษณะเป็นแบบ UMSM จะมีพื้นที่รับแสงเพิ่มมากขึ้นกว่าแบบพลาเนอร์ถึง 1.7 เท่า ดังรูปที่ 1.1 แต่อย่างไรก็ตามในการเติมผงซิลิคอนเพื่อลดอัตราการกัดซิลิโคนของตัวตรวจวัดแสงจะช่วยให้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่ลดลงตาม แต่ส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความสกปรกและมีความขรุขระเกิดขึ้น ดังรูปที่ 1.2 และ 1.3 (ก) ตามลำดับ [6-7]



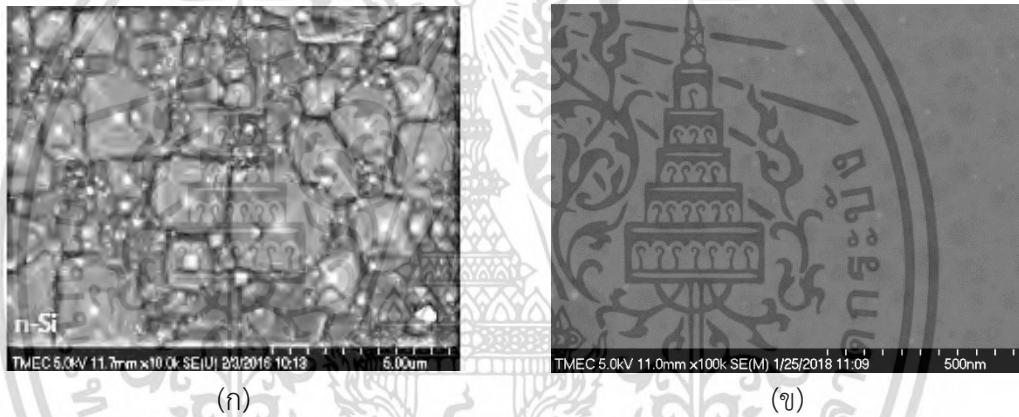
รูปที่ 1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่อาศัยกระบวนการกัดเข้าช่วยในการเพิ่มพื้นที่รับแสง โดยที่ (ก) แบบพลาเนอร์ MSM และ (ข) แบบ UMSM

- ในปี พ.ศ. 2560 มีการศึกษาการกัดพื้นผิวเรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบบรูว์รูปร่างตัวยู ในงานวิจัยที่กล่าวถึงนี้ได้พบปัญหาของพื้นผิวที่ขรุขระจากการกัดโดยสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยผงซิลิคอน จึงทำการแก้ปัญหาโดยการเติมสารลดแรงตึงผิว หรือไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol ; IPA) เพื่อต้องการให้พื้นผิวมีความเรียบทำให้ง่ายต่อการทำซ้ำในครั้งต่อไป พบว่าพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดโดยมีการเติมสารลดแรงตึงผิวลงในสารละลาย TMAH ส่งผลให้พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบขึ้น ดังรูปที่ 1.3 (ข) แต่อย่างไรก็ตาม ก็พบว่าอัตราการกัดของอะลูมิเนียมก็เพิ่มขึ้นเช่นกัน [8]
- จากนั้นพบบทความการศึกษาสารละลายเคมีที่เติมลงในสารละลาย TMAH ที่ส่งผลต่ออัตราการกัดของอะลูมิเนียมและความขรุขระของซิลิคอนที่ถูกกัด โดยบทความวิชาการนี้ได้ทำการศึกษาถึงสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (AP) และกรดซิลิซิก ที่เติมลงในสารละลาย TMAH โดยจะเรียกว่า TMAH-Dual Doped พบว่าเมื่อทำการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร AP และกรด ซิลิซิกที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก อัตราการกัดของอะลูมิเนียมมีแนวโน้มที่ลดลง และพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดจะมีความเรียบที่เพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 1.4, 1.5 และ 1.6 ตามลำดับ [10-11]

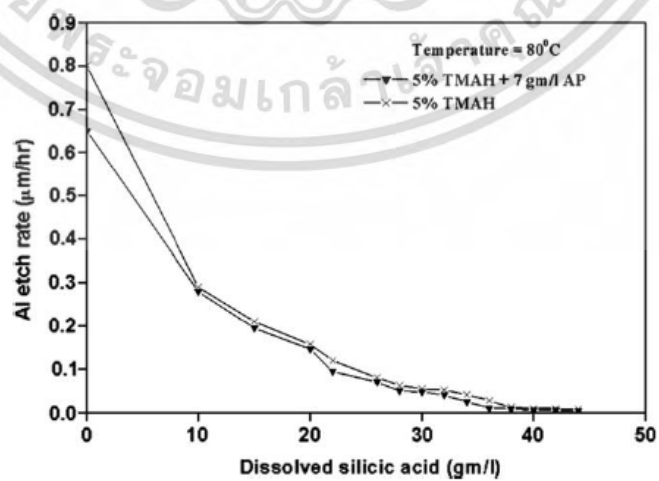
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.2 ความสามารถในการกัดอะลูมิเนียม โดยสารละลาย TMAH ที่เติมผงซิลิคอนปริมาณต่างๆ [6]

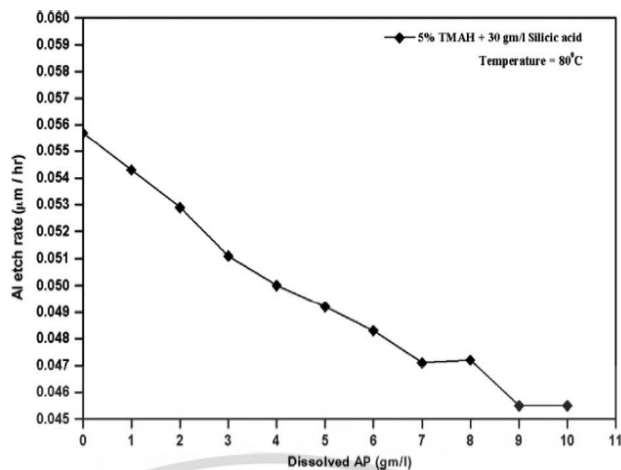


รูปที่ 1.3 พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดย (ก) สารละลาย TMAH เติมด้วยผงซิลิคอน และ (ข) สารละลาย TMAH เติมด้วย IPA [6,8]

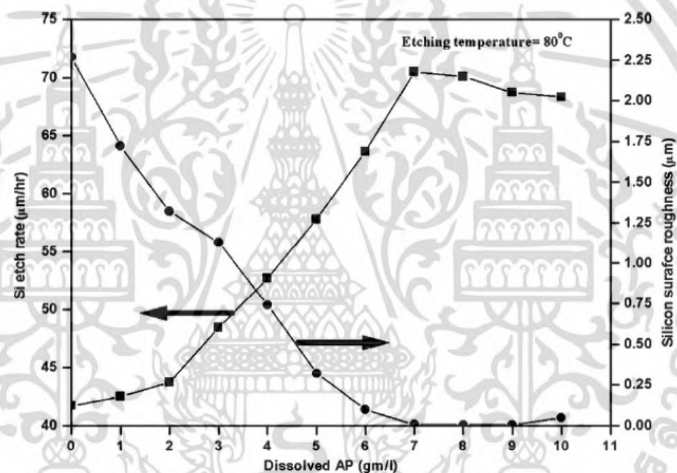


รูปที่ 1.4 ความสัมพันธ์อัตราการกัดอะลูมิเนียมกับปริมาณกรดซิลิซิกที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5% โดยน้ำหนัก และสารละลาย AP 7 กรัมต่อลิตร [11]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี การนำเอกสารนี้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



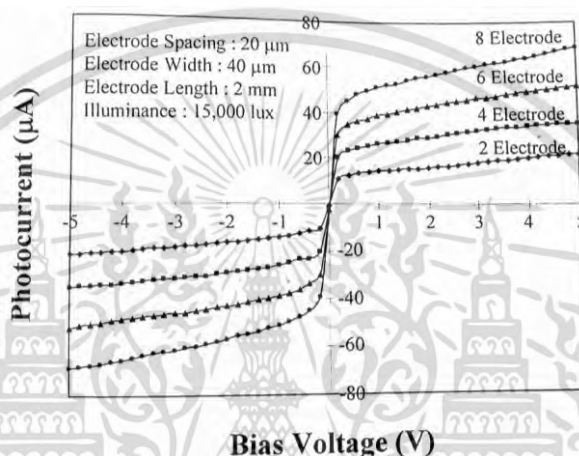
รูปที่ 1.5 ความสัมพันธ์อัตราการกัดอะลูมิเนียมเทียบกับปริมาณสารละลาย AP ที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก และกรดซิลิซิก 30 กรัมต่อลิตร [11]



รูปที่ 1.6 ความสัมพันธ์อัตราการกัดซิลิคอนและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดกับปริมาณสารละลาย AP ที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก และกรดซิลิซิก 34 กรัมต่อลิตร [11]

โดยที่ผ่านมาภายในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้นำกระบวนการกัดเข้ามาใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้า (electrodes) เป็น 2 ขั้ว หรือเรียกว่า แบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit) เพื่อศึกษากระแสแสงที่เพิ่มมากขึ้นเพียงเท่านั้น [6-9] จึงมีแนวความคิดจากงานวิจัยที่ผ่านมา ที่จะนำกระบวนการกัดเข้ามาใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทเทท (interdigitate electrodes) หรือลวดลายคล้ายส้อม (fork shape) เพื่อที่จะเพิ่มกระแสแสงตามจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้น และสามารถประยุกต์ใช้เป็นขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้กันในเชิงพาณิชย์ได้ ซึ่งขั้วไฟฟ้าแบบช่องรับแสงเดี่ยวจะมีขีดจำกัด คือ ถ้าต้องการเพิ่มกระแสแสงจะต้องใช้วิธีการเพิ่มความยาวของขั้วไฟฟ้าเพียงเท่านั้น ซึ่งการเพิ่มขั้วไฟฟ้าก็ไม่ได้ส่งผลดีในกรณีที่ต้องการพื้นที่ใช้งานที่จำกัด แต่ขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทเททนั้นสามารถเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าเพื่อให้เกิดช่องรับแสงที่เพิ่มมากขึ้นซึ่งจะทำให้ได้กระแสแสงที่เพิ่มมากขึ้นเช่นเดียวกัน [12] ดังรูปที่ 1.7 แต่อย่างไรก็ตามในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนำกระบวนการกัดเข้ามาใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตนั้น สารละลายเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดจะต้องสัมพันธ์กับอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่จะต้องมีความต่ำมาก เนื่องมาจากขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตมีความกว้างเพียงแค่ 60 ไมโครเมตร ดังนั้นถ้าใช้สารละลายเคมีที่มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมเร็วจะส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้ และจะต้องสัมพันธ์กับความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดซึ่งจะต้องมีความขรุขระที่น้อยที่สุดเพื่อสะดวกและง่ายต่อการทำซ้ำ ดังนั้นจากงานวิจัยและบทความวิชาการที่ได้ศึกษามา จึงมีแนวความคิดที่จะนำสารละลาย AP และกรดซิลิซิกเติมลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMMSM ขึ้น และทำการศึกษาลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต



รูปที่ 1.7 ความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและแรงดันไบอัส ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต [12]

## 1.2 ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอเงื่อนไขของสารเคมีที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM ชนิด Al/n-Si/Al และทำการศึกษาลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าพื้นฐานของตัวตรวจวัดแสง

1. ศึกษาเทคนิคการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ดิเจิต
2. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกกัดโดยการเติมคู่สารเจือของสารละลาย TMAH (TMAH-Dual Doped)
3. ศึกษาหาเงื่อนไขของสารเคมีที่เหมาะสมที่จะใช้เป็นสารละลาย TMAH-Dual Doped ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ดิเจิต
4. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ดิเจิต
5. ศึกษาลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ดิเจิต เมื่อไม่ได้รับแสงตกกระทบเพื่อหากระแสมืด และเมื่อได้รับความเข้ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงตกกระทบจากหลอดฮาโลเจนในช่วง 5,000 – 25,000 ลักซ์ เพื่อหากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง

### 1.3 ขอบเขตการวิจัย

เนื่องจากในงานวิจัยนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อศึกษาการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิด Al/n-Si/Al โดยอาศัยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic etching) เข้ามาใช้ในการกระบวนการสร้าง และศึกษาเงื่อนไขของสารเคมีที่ส่งผลต่อลักษณะทางกายภาพของวัสดุที่ถูกกัด ดังนั้นจึงกำหนดขอบเขตของงานวิจัย โดย

1. ทำการเตรียมแผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น หนา (100) ที่มีสภาพต้านทาน 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร และสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) จากนั้นทำการคำนวณหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบอัสค่าต่างๆ เพื่อทำการออกแบบกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มีความมากขึ้น

2. ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของสารเคมี ที่มีการเติมปริมาณสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate : AP) 7.0, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5 และ 13.0 กรัมต่อลิตร ลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนักและกรดซัลฟิวริก 34 กรัมต่อลิตร เพื่อศึกษาหาเงื่อนไขของสารละลาย TMAH-Dual Doped ที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้ในการกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัล

3. ทำการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัล โดยมีความกว้าง ระยะห่าง และความยาวของอิเล็กโทรด เท่ากับ 60, 40 และ 1,500 ไมโครเมตร ตามลำดับ และมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนของขั้วไฟฟ้าตั้งแต่ 2, 4 และ 6 ขั้ว ทั้งแบบ MSM และ UMSM เพื่อทำการเปรียบเทียบกระแสแสงที่เพิ่มมากขึ้นจากกระบวนการกัดให้เป็นร่องรูปตัวยู และในการศึกษาคูณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงจะทำการศึกษาทั้งภายใต้เงื่อนไขที่ไม่มีแสงตกกระทบ และมีแสงตกกระทบ

### 1.4 ขั้นตอนของการศึกษา

1. ศึกษาทฤษฎีและหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al
2. ศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซโทรปิก เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM
3. ศึกษาคุณลักษณะของสารละลาย TMAH-Dual Doped เพื่อประยุกต์ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัล
4. ออกแบบ และสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัล
5. ศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ที่กัดโดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัล

เอกสารนี้เป็นเอกสารอินเตอร์ดิจิทัลการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง วิเคราะห์ผลการทดลอง เปรียบเทียบผลของการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้มีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยู (UMSM) และการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง และสรุปผลการทดลอง

### 1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ทำการศึกษาการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงในการเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยอาศัยกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซโทรปิกด้วยสารละลายเคมีเข้ามาใช้ในกระบวนการสร้าง และศึกษาหาเงื่อนไขของสารเคมีที่เหมาะสมที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิตท ซึ่งจะแบ่งเนื้อหาออกเป็น 5 บท ดังนี้

บทที่ 1 บทนำ กล่าวถึงความจำเป็นมาและความสำคัญของตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างเป็นแบบพลาแนร์และแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งมีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิเจิตท และแนวความคิดที่จะพัฒนาตัวตรวจวัดแสงต่องานวิจัยนี้ ความมุ่งหมายและวัตถุประสงค์ของการศึกษา ขอบเขตการวิจัย และขั้นตอนของการศึกษาของงานวิจัยนี้

บทที่ 2 ทฤษฎี กล่าวถึงทฤษฎีของกระบวนการกัดและสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัด ทฤษฎีของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM รอยสัมผัสแบบช็อดทีย์ชนิด Al/n-Si/Al และกลไกการเกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง

บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง กล่าวถึงขั้นตอนของการออกแบบตัวตรวจวัดแสงให้มีโครงสร้างแบบ UMSM และมีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิตท มีการกำหนดเงื่อนไขของสารละลายเคมีที่จะใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM

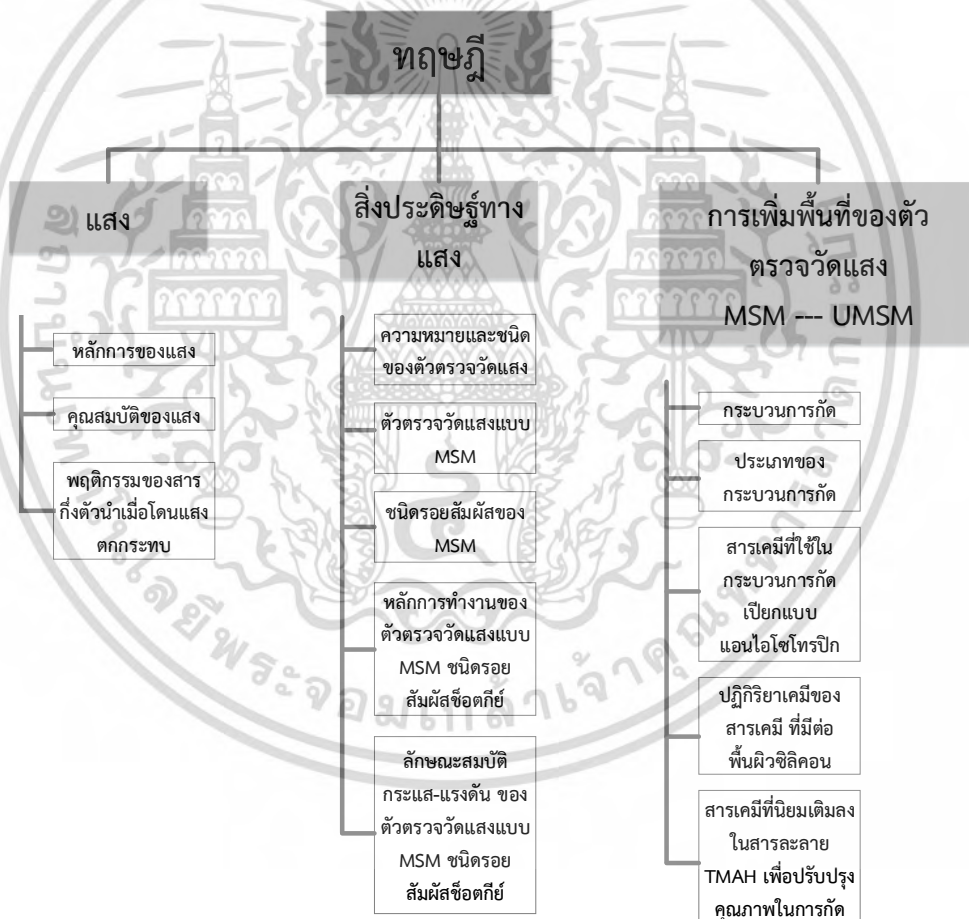
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์ผลการทดลอง กล่าวถึงการศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ ที่ถูกกัดโดยสารละลาย TMAH-Dual Doped เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM และมีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิเจิตท และทำการศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีการเพิ่มพื้นที่รับแสงและมีการเปลี่ยนแปลงจำนวนขั้วไฟฟ้าให้มากขึ้นกว่าแบบช่องรับแสงเดี่ยว (single slit)

บทที่ 5 สรุปผลงานวิจัยและข้อเสนอแนะ กล่าวถึงผลสรุปที่ได้จากการทดลองในครั้งนี้ และแนวทางที่จะพัฒนาคุณภาพและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงต่อไป

## บทที่ 2

# ทฤษฎี

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้ทำการสร้าง ปรับปรุง และพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งมีหลักการเช่นเดียวกับตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM แต่จะมีการอาศัยกระบวนการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาค (micromachining) เข้ามาใช้ในการกระบวนการสร้างเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแสง รวมถึงกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงต้องศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนของหลักการและคุณสมบัติพื้นฐานของแสง อุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดแสงเพื่อเปลี่ยนเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า หลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสง หลักการในการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโดยกระบวนการกัด รวมถึงสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัด เป็นต้น โดยในบทนี้จะอธิบายเกี่ยวกับทฤษฎีดังแผนภาพดังรูปที่ 2.1 ตามลำดับ



รูปที่ 2.1 แผนภาพขั้นตอนการศึกษาทฤษฎีในวิทยานิพนธ์

### 2.1 แสง

“แสง” เมื่อได้ยินคำว่า แสง ทำให้คนส่วนใหญ่นึกถึงแสงที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ดวงอาทิตย์ เป็นต้น ซึ่งแสงนั้นจะเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่มีมนุษย์สามารถรับรู้ได้ด้วยสายตา เมื่อจำแนกสิ่งที่ทำให้เกิดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งมอบไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสง หรือแหล่งกำเนิดแสงนั้น สามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ 1. แสงที่เกิดจากธรรมชาติ เช่น ดวงอาทิตย์ ฟ้ามุข ดาวหางบางดวง เป็นต้น 2. แสงจากสัตว์ ซึ่งสัตว์บางชนิดสามารถเปล่งแสงได้ เช่น หิ่งห้อย แมงดาเรือง เป็นต้น และ 3. แสงที่มนุษย์ประดิษฐ์ขึ้น เช่น แสงจากหลอดไฟ แสงจากแท่งเทียน แสงที่เกิดจากการเผาไหม้ เป็นต้น [13]

โดยแสงนั้นจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง มีความเร็วสูงถึง  $3 \times 10^8$  เมตรต่อวินาที ซึ่งในการเคลื่อนที่ของแสงนั้นจะมีวัตถุคอยขวางการเดินทางของแสง โดยวัตถุที่คอยขัดขวางการเดินทางของแสงนั้นสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ วัตถุโปร่งใส ซึ่งเป็นวัตถุที่ยอมให้แสงผ่านไปทั้งหมด เช่น น้ำใส กระจกใส อากาศ เป็นต้น วัตถุโปร่งแสง เป็นวัตถุที่แสงสามารถทะลุผ่านได้ แต่ไม่สามารถทะลุผ่านทั้งหมด เช่น น้ำขุ่น กระจกฝ้า หมอกควัน เป็นต้น และวัตถุทึบแสง จะเป็นวัตถุที่แสงไม่สามารถทะลุผ่านออกไปได้ เช่น ฝาผนัง เหล็ก วัสดุสารกึ่งตัวนำจำพวก ซิลิคอน เป็นต้น [13]

### 2.1.1 พฤติกรรมของแสง

แสง เป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าไม่ต้องอาศัยตัวกลางในการเคลื่อนที่ สามารถประพฤติตัวเป็นได้ทั้งคลื่นและอนุภาค ซึ่งมีปรากฏการณ์หรือการทดลองที่มารองรับแนวความคิดนี้อยู่หลายปรากฏการณ์ เช่น ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (Photoelectric Effect) ปรากฏการณ์คอมป์ตัน (Compton Effect) และสมมติฐานของเดอบรอยล์ (De Broglie's Hypothesis) เป็นต้น [14]

โดยแนวความคิดที่เกี่ยวกับพฤติกรรมของแสง ทั้ง 2 แนวความคิดนี้ มีการโต้เถียงกันเป็นเวลานานหลายปี โดยไอแซกนิวตัน (Isaac Newton) ได้เลือกว่าแสงมีพฤติกรรมเป็นอนุภาค และฮอยเกนส์ (Huygens) ได้บอกว่าแสงมีพฤติกรรมเป็นคลื่น โดยแนวความคิดของนิวตันที่บอกว่าแสงเป็นอนุภาคนั้น ไม่สามารถอธิบาย 2 ข้อที่สำคัญได้ คือ เมื่อแสงเคลื่อนจากตัวกลางหนึ่งไปยังอีกตัวกลางหนึ่งเกิดการสะท้อนบางส่วน และมีอีกบางส่วนที่เกิดการหักเห ส่วนอีกข้อหนึ่งคือ ปรากฏการณ์การแทรกสอดและการเลี้ยวเบนของแสง [15] และเมื่อพบปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก โดยจะเป็นปรากฏการณ์ที่แสงตกกระทบโลหะ แล้วอิเล็กตรอนที่ผิวของโลหะเกิดการหลุดออกมา เรียกว่าโฟโตอิเล็กตรอน (Photoelectron) [16] ปรากฏการณ์นี้จะบ่งบอกว่าแสงมีพฤติกรรมเป็นอนุภาค แต่อย่างไรก็ตาม เดอ บรอยล์ (De Broglie) ได้เสนอแนวความคิดที่ว่า “ถ้าแสงแสดงคุณสมบัติคู่เป็นได้ทั้งอนุภาคและคลื่นแล้ว สสารทั้งหลายแสดงคุณสมบัติของคลื่นได้เนื่องจากสสารประกอบด้วยอนุภาค” [14] โดยเดอ บรอยล์ ได้พยายามหาความสัมพันธ์ระหว่างคลื่นและอนุภาคของแสง จากแนวความคิดและปรากฏการณ์ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น โดยเดอบรอยล์ ได้สมมติฐานว่าถ้าแสงมีความถี่จะให้พลังงานโฟตอนออกมาได้ จากสมการที่ 2.1

$$E = hv = h \frac{c}{\lambda} \quad (2.1)$$

ดังนั้น เมื่อใช้ทฤษฎีสัมพัทธภาพของไอน์สไตน์ในสมการที่ 2.2 จึงสามารถหามวลของโฟตอนได้จากสมการที่ 2.3 ตามลำดับ

$$E = mc^2 \quad (2.2)$$

$$\frac{hc}{\lambda} = mc^2 \quad (2.3)$$

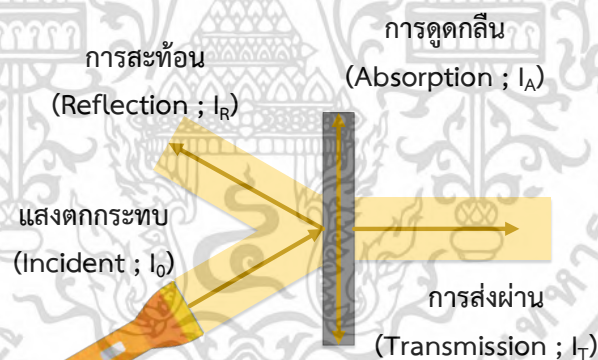
$$\lambda = \frac{h}{mc} = \frac{h}{p} \quad (2.4)$$

และเดอบรอยล์ ได้ให้ความเห็นว่า เมื่อสมการที่ 2.4 เป็นจริงสำหรับโฟตอน ก็ควรที่จะเป็นจริงสำหรับอนุภาคด้วยเช่นกัน ดังนั้นอนุภาคที่มีมวลเท่ากับ ( $m$ ) วิ่งด้วยความเร็ว ( $v$ ) ก็เป็นไปได้ที่จะประพฤติตัวเป็นคลื่น ( $\lambda$ ) ได้เช่นกัน ดังสมการที่ 2.5 จึงสามารถสรุปได้ว่าแสงมีพฤติกรรมเป็นทั้งคลื่นและอนุภาค [14]

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (2.5)$$

### 2.1.2 คุณสมบัติของแสง

อย่างไรก็ตามเมื่อแสงตกกระทบบนวัตถุใดๆ สามารถเกิดการสะท้อน (reflection) การดูดกลืน (absorption) และการส่องผ่าน (transmission) ของแสงได้ ดังรูปที่ 2.2 โดยเหตุการณ์ต่างๆ จะสัมพันธ์กับวัตถุที่คอยขัดขวางการเดินทางของแสง เช่น วัตถุโปร่งใส วัตถุโปร่งแสง และวัตถุทึบแสง



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติของแสงเมื่อตกกระทบลงบนวัตถุใดๆ

โดยในทางทฤษฎีแล้วเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านวัตถุโปร่งใส แสงจะเกิดการเลี้ยวเบนและหักเห น้อยมาก จึงทำให้แสงสามารถทะลุผ่านออกมาได้หมด และเมื่อแสงเคลื่อนที่ผ่านวัตถุโปร่งแสง แสงจะเกิดการหักเห และเกิดการกระเจิงในเนื้อของวัตถุมากกว่าภายในวัตถุโปร่งใส จึงทำให้แสงทะลุผ่านออกมาได้เพียงบางส่วนเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามเมื่อแสงตกกระทบวัตถุทึบแสง แสงจะไม่สามารถทะลุผ่านออกมาได้เลย โดยจะถูกดูดกลืนอยู่ภายในเนื้อของวัตถุแทน

ซึ่งในส่วนนี้จะสัมพันธ์กับในวิทยานิพนธ์ซึ่งทำการศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแสง เพื่อทำการตรวจวัดแสงในความยาวคลื่นที่ต้องการทดสอบ โดยอุปกรณ์ตรวจวัดแสงนั้นจะทำการสร้างโดยอาศัยความรู้พื้นฐานทางด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งสารกึ่งตัวนำในที่นี้คือ ซิลิคอน ซึ่งเป็นวัตถุทึบแสงจึงอาศัย

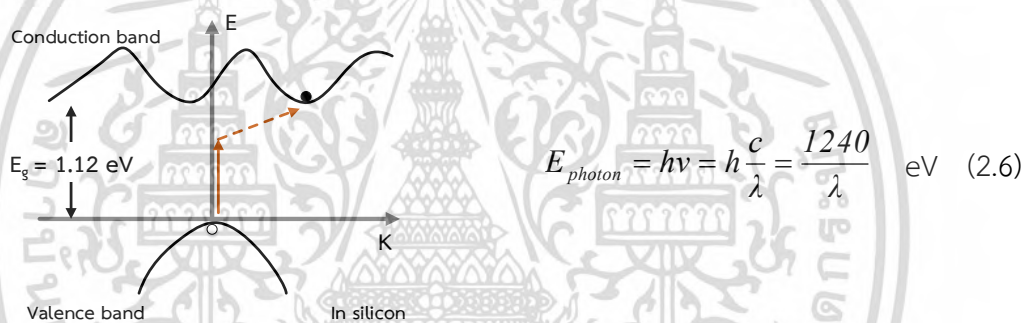
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หลักการของการดูดกลืนแสงดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ทำให้จำเป็นที่จะต้องศึกษาพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำเมื่อโดนแสงตกกระทบในหัวข้อที่ 2.1.3 ต่อไป

### 2.1.3 พฤติกรรมสารกึ่งตัวนำเมื่อโดนแสงตกกระทบ

พฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำเมื่อโดนแสงตกกระทบนั้น จะเกิดการดูดกลืนพลังงานโฟตอนของแสงแล้วกระตุ้นทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (electron-hole pairs) เกิดขึ้น และอาจเกิดการรวมตัวของคู่อิเล็กตรอน-โฮล โดยในสารกึ่งตัวนำนั้นจะแบ่งโครงสร้างของแถบพลังงานเป็น 2 ประเภท คือ สารกึ่งตัวนำแบบแถบตรง (direct band gap semiconductor) และสารกึ่งตัวนำแบบช่องไม่ตรง (indirect band gap semiconductor)

ในวิทยานิพนธ์นี้เลือกที่จะทำการศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นมาจากสารกึ่งตัวนำซิลิคอน ซึ่งสารกึ่งตัวนำซิลิคอนนี้จะเป็นสารกึ่งตัวนำประเภทแถบช่องไม่ตรง ดังนั้นเราจึงอธิบายเฉพาะส่วนของโครงสร้างแถบพลังงานแบบแถบช่องไม่ตรงเพียงเท่านั้น สารกึ่งตัวนำชนิดนี้จะมีจุดต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า (conduction band) และจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ (valence band) มีค่าโมเมนตัมที่แตกต่างกัน ดังความสัมพันธ์ในกราฟ E-K ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ความสัมพันธ์ E-K ของสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง

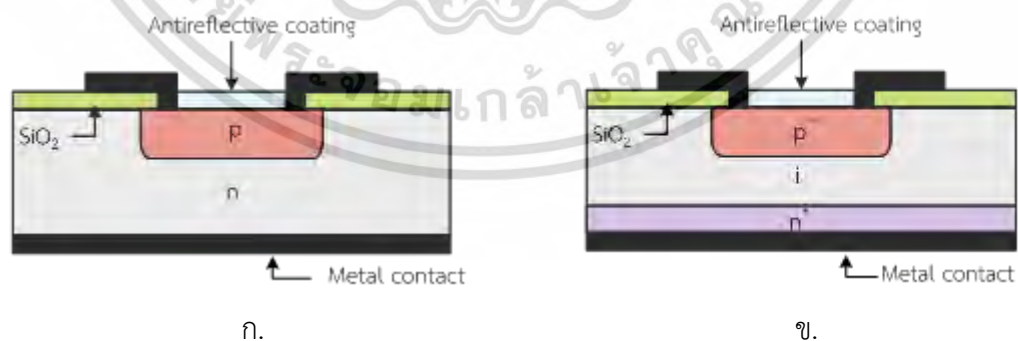
โดยซิลิคอนที่มีโครงสร้างสร้างของแถบพลังงานแบบแถบช่องไม่ตรงนั้น เมื่อมีพลังงานโฟตอนที่มีค่ามากกว่าช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ (ซิลิคอน มีค่าช่องว่างแถบพลังงานเท่ากับ 1.12 อิเล็กตรอนโวลต์) มากกระตุ้นจะทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ถูกกระตุ้นขึ้นไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากที่กล่าวไปแล้วว่า ซิลิคอนเป็นสารกึ่งตัวนำแถบช่องไม่ตรง อิเล็กตรอนจึงไม่สามารถถูกกระตุ้นไปยังยังแถบนำไฟฟ้าได้โดยง่ายถึงแม้จะมีพลังงานมากกระตุ้นอย่างเพียงพอก็ตาม โดยอิเล็กตรอนจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมถึงจะสามารถเปลี่ยนระดับพลังงานไปสู่แถบนำไฟฟ้าได้ และในทำนองเดียวกัน อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟาก็ไม่สามารถตกลงมายังแถบวาเลนซ์ได้โดยตรง โดยจะต้องมีค่าโมเมนตัมที่เหมาะสมก่อนจึงจะสามารถคายพลังงานและตกลงสู่แถบวาเลนซ์ได้ [1] เราจึงพบว่า ในทางอุตสาหกรรมจึงไม่ค่อยนำสารกึ่งตัวนำชนิดนี้ไปใช้ในการสร้างอุปกรณ์ทางด้านแสงจำพวก เลเซอร์ไดโอดหรือไดโอดเปล่งแสง แต่ในวิทยานิพนธ์นี้ เลือกที่จะศึกษาอุปกรณ์ตรวจวัดแสงที่สร้างจากซิลิคอน เพราะว่ามีราคาถูก สามารถจัดเตรียมได้ง่าย และที่สำคัญสามารถสร้างรวมกับวงจรรวมได้อย่างง่ายดาย

## 2.2 สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง

ในปัจจุบันสารกึ่งตัวนำสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางอิเล็กทรอนิกส์ได้อย่างกว้างขวาง ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของวิทีนพนธ์นี้ซึ่งต้องการนำสารกึ่งตัวนำมาใช้งานทางด้านแสง เพื่อใช้ในการตรวจวัดพลังงานโฟตอนของแสงและเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยสิ่งประดิษฐ์ทางด้านแสงนี้ มีอยู่ด้วยกัน 2 ประเภทหลักๆ คือ ประเภทแรกสิ่งประดิษฐ์ที่สามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ โดยอาศัยหลักการจากพลังงานโฟตอนของแสงตกกระทบลงบนอุปกรณ์และอาศัยกลไกทางไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานไฟฟ้า เช่น โฟโตดีเทคเตอร์ (photodetector) หรือตัวตรวจวัดแสง เซลล์แสงอาทิตย์ (solar cell) เป็นต้น และอีกประเภทหนึ่งคือสิ่งประดิษฐ์ที่เปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแสง ซึ่งจะมีหลักการที่ตรงข้ามกับสิ่งประดิษฐ์ประเภทแรก คืออาศัยการกระตุ้นด้วยไฟฟ้าภายในสารกึ่งตัวนำแล้วทำให้สารกึ่งตัวนำปลดปล่อยพลังงานโฟตอนของแสงออกมา ซึ่งอาจจะออกมาในรูปของแสงสีต่างๆตามชนิดของสารกึ่งตัวนำ ยกตัวอย่างเช่น เลเซอร์ไดโอด (laser diode) และไดโอดเปล่งแสง (light emitting diode: LED) เป็นต้น [1] แต่อย่างไรก็ตามในการสร้างหรือศึกษาสิ่งประดิษฐ์จำพวกเลเซอร์ไดโอดจำเป็นต้องอาศัยองค์ความรู้ทางด้านฟิสิกส์เป็นอย่างสูง ทำให้มีความสนใจในการศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงเนื่องจากตรงกับองค์ความรู้ทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์มากกว่า และที่สำคัญสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรรวมได้

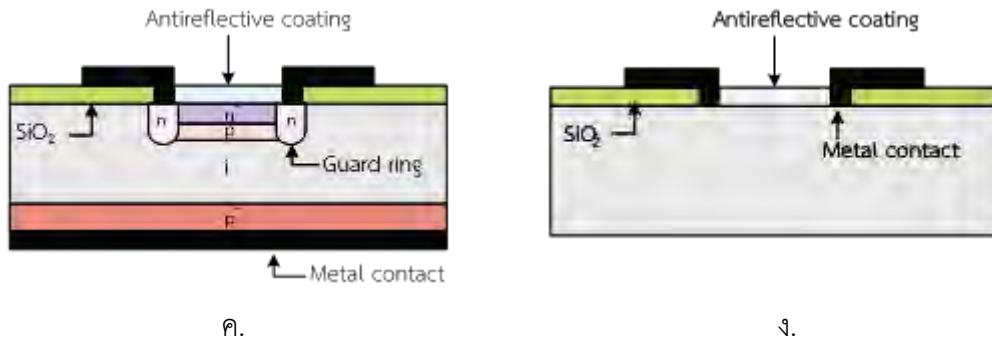
### 2.2.1 ความหมายและชนิดของตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการตรวจวัดความเข้มของแสง ซึ่งอาศัยหลักการของแสงเมื่อตกกระทบสารกึ่งตัวนำและเปลี่ยนเป็นพลังงานทางไฟฟ้า ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านแสงมากมายเช่น ใช้งานในระบบสื่อสารด้วยเส้นใยนำแสงเพื่อเป็นส่วนในการรับข้อมูลทางแสง และนำไปใช้เป็นเซนเซอร์ในการตรวจวัดแสงต่างๆ ตัวตรวจวัดแสงสามารถแบ่งตามโครงสร้างต่างๆได้เป็น 4 ประเภท คือ พี-เอ็น โฟโตไดโอด (p-n photodiode), พินโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode), อวาแลนซ์โฟโตไดโอด (avalanche photodiode) และโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal: MSM) แสดงโครงสร้างดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ (ก) พี-เอ็นโฟโตไดโอด (ข) พินโฟโตไดโอด (ค) อะวาแลนซ์โฟโตไดโอด (ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



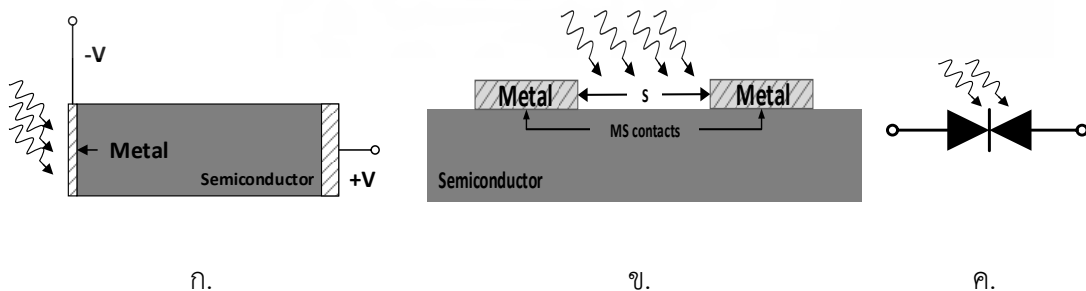
รูปที่ 2.4 (ต่อ) โครงสร้างภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิดต่างๆ (ก) พี-เอ็นไอโพลีไดโอด (ข) ฟิน โพลีไดโอด (ค) อะวาลานซ์โฟโตไดโอด (ง) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

โดยในวิทยานิพนธ์นี้เลือกที่จะทำการศึกษาและสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด MSM เนื่องจากมีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย และที่สำคัญมีกลไกทางไฟฟ้าในแนวเชิงราบทำให้ประยุกต์ใช้ในวงจรรวมได้ รายละเอียดของตัวตรวจวัดแสงแต่ละชนิดสามารถศึกษาข้อมูลจากหนังสือเซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์ [1] โดยรายละเอียดของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM แสดงในหัวข้อถัดไป

2.2.2 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM

ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM หรือแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ อาศัยหลักการของรอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal and Semiconductor contacts) มาใช้ในการศึกษาและสร้าง ซึ่งจะประกอบด้วยขั้วของโลหะ 2 ขั้ว สร้างอยู่บนสารกึ่งตัวนำ ซึ่งประยุกต์มาจากตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหรือซีดทีบีแบริเออร์โฟโตไดโอด [17-18] ดังรูปที่ 2.4 (ก) โดยจะมีความต้านทานและความจุไฟฟ้าที่ค่อนข้างต่ำสามารถทำงานที่ความถี่สูงๆได้ แต่อย่างไรก็ตามตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำนั้นก็มีโครงสร้างเป็นแนวตั้ง ทำให้ยากต่อการประยุกต์ใช้ในวงจรรวม ซึ่งถ้าสามารถประยุกต์ใช้ในวงจรรวมได้แล้วอาจจะทำให้อุปกรณ์มีประสิทธิภาพ เสถียรภาพที่ดียิ่งขึ้น และสามารถลดราคาให้ต่ำลงได้ จึงทำให้มีการประยุกต์เป็นตัวตรวจวัดแสงแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ ซึ่งเปรียบเสมือนการสร้างรอยสัมผัส 2 รอยสัมผัส หันชนกัน

โดยตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM นั้นมีพื้นที่รับแสง ที่ขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ (s) ที่ทำการสร้างบนสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM มีกลไกการเกิดกระแสไฟฟ้าในแนวตั้ง ซึ่งสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรรวมได้ ภาพภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และสัญลักษณ์ทางวงจรที่ใช้แทนโครงสร้าง MSM แสดงดังรูป ที่ 2.5 (ข) และ 2.5 (ค) ตามลำดับ



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสง (ก) ตัวตรวจวัดแสงแบบ MS (ข) ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM (ค) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของโครงสร้าง MSM

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3 หลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสง MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้ว

จากการศึกษาตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM นั้นจะเห็นได้ว่าจะมีรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำเกิดขึ้น โดยในทางทฤษฎีของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำนั้นแบ่งรอยสัมผัสออกเป็น 2 ชนิด คือ รอยสัมผัสแบบขั้วขั้ว โดยจะทำหน้าที่เปรียบเสมือนตัวเรกติไฟร์ (rectifier) ซึ่งจะยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทางเดียว และรอยสัมผัสแบบโอห์มิก (ohmic contact) ที่สามารถยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทาง [4] ในการที่จะแยกแยะรอยสัมผัสเป็นแบบใดนั้นขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญ คือ ฟังก์ชันงาน (work function) ของโลหะ ( $\phi_m$ ) ฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $\phi_s$ ) และค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (electron affinity) ของสารกึ่งตัวนำนั้นๆ ( $\chi_s$ ) โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะขอกล่าวถึงรอยสัมผัสแบบขั้วขั้วเพียงเท่านั้น เนื่องจากมีการใช้สารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นซึ่งจะมีฟังก์ชันงานที่สัมพันธ์กับฟังก์ชันงานของโลหะอะลูมิเนียมที่นำมาใช้เป็นขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

รอยสัมผัสแบบขั้วขั้วนั้นจะมีจุดเด่น คือ มีกำแพงศักย์ภายใน (built in voltage :  $V_{bi}$ ) ค่อนข้างต่ำ ทำงานด้วยพาหะส่วนมาก (majority carriers) และที่สำคัญคือมีความจุไฟฟ้าแฝงภายในโครงสร้างที่ต่ำจึงเหมาะแก่การนำไปใช้งานประเภทความถี่สูง

#### 2.2.3.1 กลไกการเกิดรอยสัมผัสขั้วขั้ว [1]

โดยการเกิดรอยสัมผัสแบบขั้วขั้วนั้นสามารถอธิบายจากแถบพลังงานได้ดังรูปที่ 2.6 แสดงแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำก่อนเกิดการสัมผัสกัน โดยจะใช้ระดับสุญญากาศ (vacuum level :  $E_0$ ) เป็นระดับอ้างอิงเพื่อเปรียบเทียบระดับพลังงานระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ ระดับสุญญากาศนี้จะนิยามว่าเป็นระดับพลังงานของอิเล็กตรอนที่หลุดออกไปจากเนื้อสารของแข็งและหยุดนิ่งอยู่ที่บริเวณผิวภายนอกของสาร หรือพลังงานของอิเล็กตรอนที่เป็นอิสระ (free electron) จากโลหะนั้นหรือสารของแข็งนั้นๆ

ทางด้านโลหะ ระดับเฟอร์มิ (Fermi level :  $E_{FM}$ ) หรือค่าเฉลี่ยของอิเล็กตรอนส่วนใหญ่ที่มีอยู่ในโลหะนั้น จะมีค่าสูงกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า ( $E_C$ ) ค่าความแตกต่างระหว่างระดับเฟอร์มิและระดับสุญญากาศเรียกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ มีค่าดังสมการที่ 2.7 ซึ่งค่าฟังก์ชันงานนี้เป็นสมบัติเฉพาะของสารแต่ละชนิดเท่านั้น มีค่าที่คงที่ ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงได้ เช่น ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ ขั้วโลหะอะลูมิเนียม มีค่าฟังก์ชันงานเท่ากับ 4.3 อิเล็กตรอนโวลต์

$$q\phi_m = E_0 - E_{FM} \quad (2.7)$$

ทางด้านสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ระดับเฟอร์มิจะอยู่สูงกว่าระดับกึ่งกลางของช่องว่างพลังงาน ( $E_i$ ) และอยู่ต่ำกว่าระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้า มีค่าเท่ากับความต่างของระดับสุญญากาศและระดับเฟอร์มิ ดังสมการที่ 2.8

$$q\phi_s = E_0 - E_{FS} \quad (2.8)$$

ส่วนค่าความแตกต่างของระดับสุญญากาศและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำเรียกว่าค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ สารกึ่งตัวนำซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.01 อิเล็กตรอนโวลต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

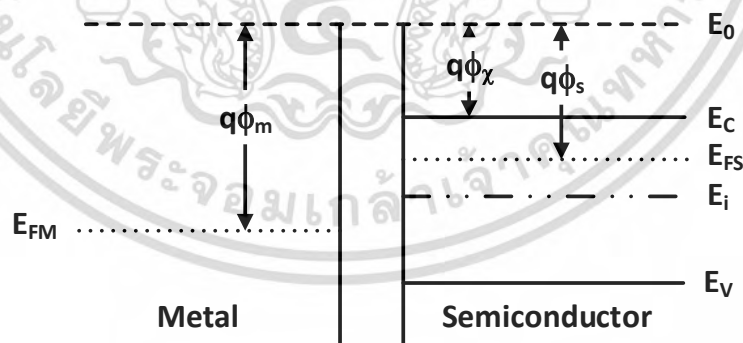
การเกิดรอยสัมผัสช็อคกีระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ( $q\phi_m > q\phi_s$ ) จะเห็นว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำอยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของโลหะ จึงเกิดการถ่ายเทพริจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะ และจะเกิดการสะสมอยู่เฉพาะบริเวณผิวของรอยสัมผัสเพียงเท่านั้น เนื่องจากโลหะในทางอุดมคติมีความต้านทานเป็นศูนย์ และไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากสารกึ่งตัวนำผ่านรอยสัมผัสไปยังโลหะจะทำให้เกิดไอออนบวกของอะตอมสารเจือผู้ให้ ( $N_D^+$ ) อยู่ที่ผิวสัมผัสด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งจะให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การแพร่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านการแพร่ของอิเล็กตรอนได้ ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อน ดังรูปที่ 2.7

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของโลหะและสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน ป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากด้านสารกึ่งตัวนำไม่ให้เคลื่อนที่ข้ามไปยังด้านโลหะ ซึ่งมีค่าเท่ากับระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.9

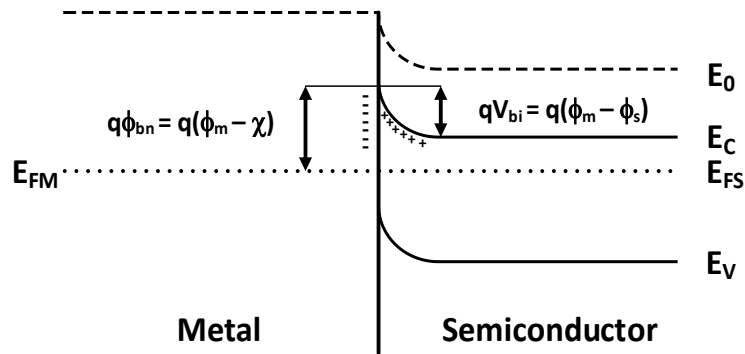
$$qV_{bi} = q(\phi_m - \phi_s) \tag{2.9}$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ของอิเล็กตรอนด้านโลหะที่เคลื่อนที่ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า กำแพงศักย์ช็อคกี (Schottky barrier :  $\phi_{bn}$ ) มีค่าดังสมการที่ 2.10 ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำที่ต่างชนิดกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ช็อคกีต่างกัน

$$q\phi_{bn} = q(\phi_m - \chi) \tag{2.10}$$



รูปที่ 2.6 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อคกี

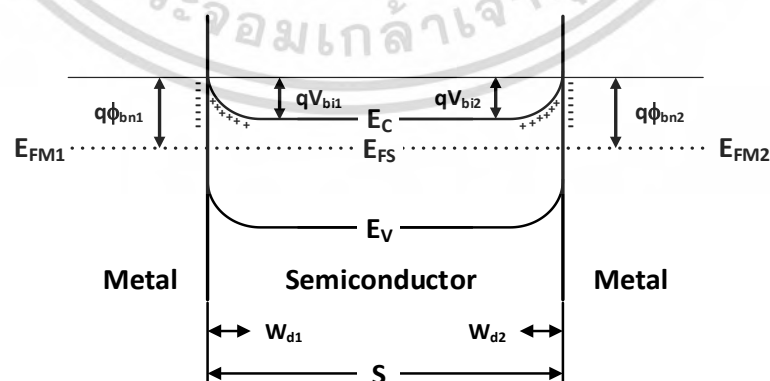


รูปที่ 2.7 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นหลังเกิดรอยสัมผัสชนิดซีอติ๊ก

### 2.2.3.2 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสซีอติ๊กในสถานะสมดุล [3],[5]

ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM นั้น จะประกอบด้วยรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำจำนวนสองรอยสัมผัส ต่อแบบหันหลังชนกัน (back to back) โดยในวิทยานิพนธ์จะใช้ขั้วโลหะคืออะลูมิเนียม และสารกึ่งตัวนำคือซิลิคอนชนิดเอ็น ซึ่งจะมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (spacing gap; s) เป็นพื้นที่ที่ใช้ในการรับแสงและเปลี่ยนสัญญาณทางแสงเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า โดยในทางทฤษฎีควรจะออกแบบให้มีระยะที่แคบมากๆ (short electrode gap) ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

ที่รอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำทั้งสองรอยสัมผัสจะเกิดบริเวณปลอดพาหะและกำแพงศักย์ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสซีอติ๊กที่ได้กล่าวในหัวข้อ 2.2.3.1 ซึ่งจะมีการกำหนดการไบอัสของขั้วโลหะทั้งสองโดยทางด้านซ้ายให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และด้านขวาให้เป็นขั้วแอโนด (anode) โลหะที่ใช้ในการสร้างจะใช้เป็นโลหะชนิดเดียวกันนั่นคือ โลหะอะลูมิเนียมเพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ซีอติ๊กที่ขั้วแคโทด ( $\phi_{bn1}$ ) และขั้วแอโนด ( $\phi_{bn2}$ ) มีขนาดที่เท่ากัน หรือ  $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$  กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด ( $V_{bi1}$ ) และขั้วแอโนด ( $V_{bi2}$ ) มีขนาดที่เท่ากัน หรือ  $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$  และความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (width of depletion region) ด้านแคโทด ( $W_{d1}$ ) และด้านแอโนด ( $W_{d2}$ ) มีขนาดเท่ากัน หรือ  $W_{d1} = W_{d2} = W_d$  จึงทำให้ขั้วทั้งสองมีลักษณะเป็นไปอย่างสมมาตร โดยแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ที่สถานะสมดุลความร้อน จะแสดงดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสซีอติ๊กในสถานะสมดุลความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2.3.3 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัสขั้วต่อก็ยขณะได้รับแรงดันไบอัส [3],[5]

ในอุปกรณ์ตรวจวัดแสงนั้น ในการที่จะให้อุปกรณ์สามารถทำงานได้จำเป็นต้องมีการให้แรงดันไบอัสแก่อุปกรณ์ ซึ่งเมื่อให้แรงดันไบอัสแก่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งจะกำหนดให้แรงดันไบอัสบวกเข้ากับขั้วแอโนดและแรงดันลบเข้ากับขั้วแคโทด ดังนั้นรอยสัมผัสด้านแอโนดจะเป็นลักษณะของการให้ไบอัสตรง (forward bias) ส่วนรอยสัมผัสด้านแคโทดจะเป็นลักษณะของการให้ไบอัสย้อนกลับ (reverse bias) โดยส่วนที่ได้รับการไบอัสย้อนกลับจะทำให้บริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด ( $W_C$ ) ขยายกว้างมากขึ้น และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น  $V_{bi} + V_I$  และเนื่องจากกำแพงศักย์ภายในที่สูงมากขึ้นนี้เอง จึงส่งผลให้อิเล็กตรอนจากทางด้านของสารกึ่งตัวนำไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีก็เพียงแต่อิเล็กตรอนส่วนน้อยจากด้านของโลหะที่มีพลังงานเพียงพอที่จะข้ามกำแพงศักย์ขั้วต่อก็ยไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางการไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านของโลหะ ( $I_{sm}$ ) (เนื่องจากทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้าจะตรงข้ามกับทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน [20]) ซึ่งจะมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสขั้วต่อก็ย ส่วนด้านแอโนดที่ทำการไบอัสตรง บริเวณปลอดพาหะทางด้านแอโนด ( $W_A$ ) แคบมากขึ้น เนื่องมาจากการไบอัสตรงทำให้ค่ากำแพงศักย์ลดลงเท่ากับ  $V_{bi} - V_2$  ทำให้อิเล็กตรอนทางด้านสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านของโลหะได้ จึงเกิดกระแสไฟฟ้าไหลในทิศทางจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ ( $I_{ms}$ ) แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากด้านแคโทดมาที่สารกึ่งตัวนำนั้นมีปริมาณที่น้อยมากอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยลงไปด้วย โดยกระแสในนี้คือกระแสมืดหรือกระแสรั่วไหล (dark current :  $I_{dark}$ ) ของโครงสร้าง MSM ซึ่งกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM นั้นจะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องมาจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก [4],[19]

โดยความกว้างของบริเวณปลอดพาหะรวม ( $W_T$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 2.11, 2.12 และ 2.13 ตามลำดับ

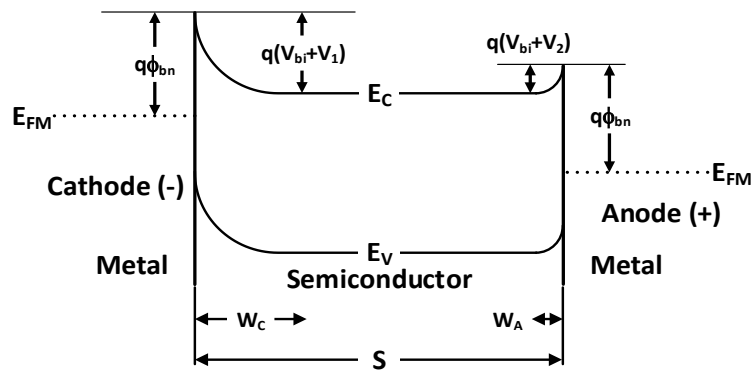
$$W_T = W_C + W_A \quad (2.11)$$

$$W_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (2.12)$$

$$W_A = \sqrt{\frac{2\varepsilon_s(V_{bi} + V_A)}{qN_D}} \quad (2.13)$$

ในวิทยานิพนธ์นี้ จะมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าที่มีขนาดกว้าง ดังนั้นจึงทำการพิจารณาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงอย่างเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงโดยละเอียดในหัวข้อถัดไป โดยแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ที่ได้รับแรงดันไบอัสจะแสดงดังรูปที่ 2.9

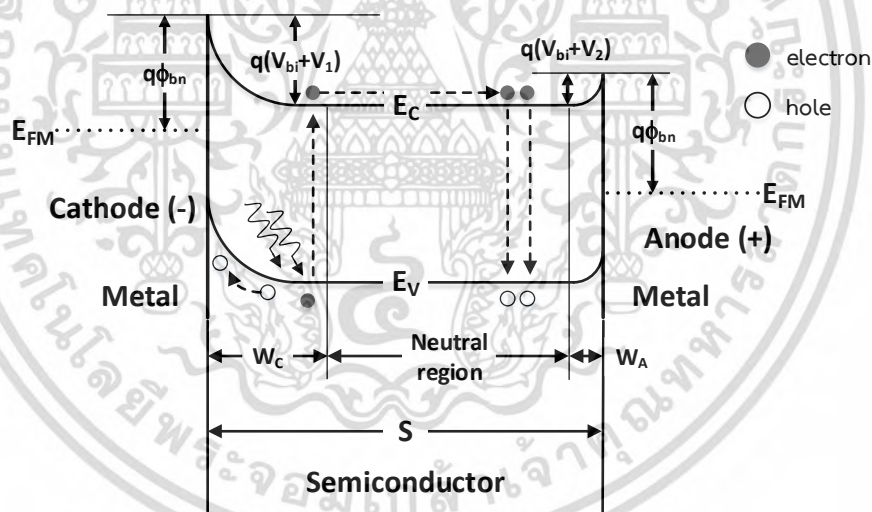
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัส肖ตกีในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัส

#### 2.2.3.4 ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัส肖ตกีเมื่อมีแสงตกกระทบ [3],[5]

ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM นั้นจะมีพื้นที่รับแสง บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วโลหะ เมื่อแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงมีพลังงานโฟตอนที่มีเพียงพอหรือมีพลังงานโฟตอนมากกว่าค่าช่องว่างของแถบพลังงาน ( $h\nu \geq E_g$ ) จะกระตุ้นให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลขึ้น โดยแถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM เมื่อได้รับแรงดันไบอัสและมีแสงตกกระทบแสดงดังรูปที่ 2.10



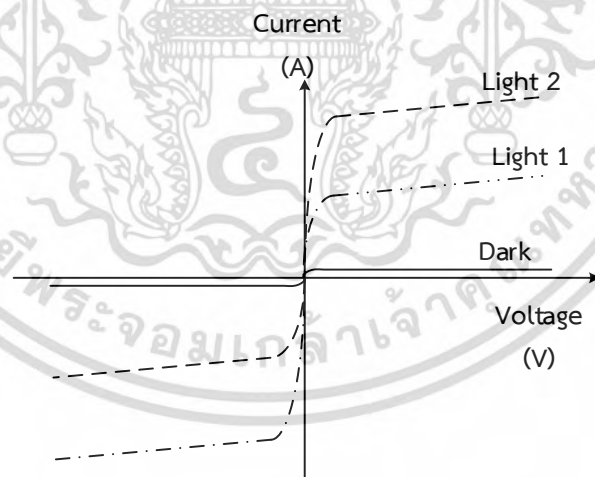
รูปที่ 2.10 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัส肖ตกีในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัสและได้รับแสงตกกระทบ

คู่ของอิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณหลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณหลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือเรียกว่ากระแสแสง (photocurrent :  $I_{photo}$ ) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล โดยในบริเวณนิวทรัล (neutral region) นั้นโฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่ของอิเล็กตรอน-โฮลเช่นเดียวกับบริเวณหลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงตกกระทบบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าที่ไม่เท่ากันในแต่ละจุด จึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ (diffusion) เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าแรงเข้าสู่ขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในเนื้อสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทรัล เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทรัลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในเนื้อสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้าง MSM ที่ระยะห่างระหว่างขั้วโลหะมีขนาดกว้าง (wide electrode gap) จึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [4],[21-22]

#### 2.2.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัส肖ตกี [12]

เมื่อให้แสงตกกระทบบลงบนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัส肖ตกี พบว่าลักษณะกระแสและแรงดันจะมีความสมมาตรกันทั้งด้านที่รับแรงดันไบอัสตรงและแรงดันไบอัสย้อนกลับ เนื่องจากโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำหันหลังชนกัน และกระแสแสงที่ได้จะมีความมากขึ้นเมื่อให้แสงตกกระทบบมีความเข้มแสงมากขึ้น เป็นไปตามพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับแสงตกกระทบบในหัวข้อที่ 2.1.3 และรูปที่ 2.11 แสดงลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัส肖ตกีเมื่อได้รับแสงตกกระทบบ



รูปที่ 2.11 ความสัมพันธ์กระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ชนิดรอยสัมผัส肖ตกีเมื่อได้รับแสงตกกระทบบ

## 2.3 การเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM เป็น UMSM

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าในวิทยานิพนธ์นี้ทำการสร้างและพัฒนาตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ซึ่งเป็นการอาศัยกระบวนการตัดหรือเฉือนวัสดุในสเกลระดับเล็กกว่าไมโครเมตรลงไป คือ การสร้างโครงสร้างระดับจุลภาค หรือที่เรียกว่า ไมโครแมชชีนนิ่ง (micro machining) เข้ามาช่วยในการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง [6-9]

โดยในกระบวนการตัดหรือเฉือนวัสดุทุกอย่างที่เคยได้รู้จักจะใช้เครื่องมือจำพวก สว่าน มีด สิว ในการเปิดพื้นที่หรือบริเวณของวัสดุที่เราต้องการ แต่อย่างไรก็ตามเครื่องมือที่กล่าวมานี้เหมาะกับการใช้งานกับวัสดุที่มีขนาดใหญ่เพียงเท่านั้น ซึ่งไม่มีความเหมาะสมสำหรับการเจาะหรือกัดพื้นที่ๆ มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรลงไปได้ จึงทำให้เทคโนโลยีจำพวกมาโครแมชชีนนิ่ง (macro machining) เดินทางมาถึงจุดอ้อมตัว จึงเริ่มมีการพัฒนาสร้างอุปกรณ์ที่ใช้ในการกัดหรือเจาะพื้นที่ๆ มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรได้ โดยเรียกเทคโนโลยีนี้ว่าไมโครแมชชีนนิ่ง ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถตอบโจทย์ความต้องการในการสร้างวัสดุที่มีขนาดเล็กระดับไมโครเมตรลงไปได้อย่างดี เช่น เครื่องจักรกลหรืออุปกรณ์ทางการแพทย์ที่มีขนาดเล็กมาก และที่สำคัญที่พบว่ามีให้นำเทคโนโลยีนี้ไปใช้เป็นอย่างมาก คือ การนำไปใช้ในการพัฒนาทางด้านวงจรรวม [23]

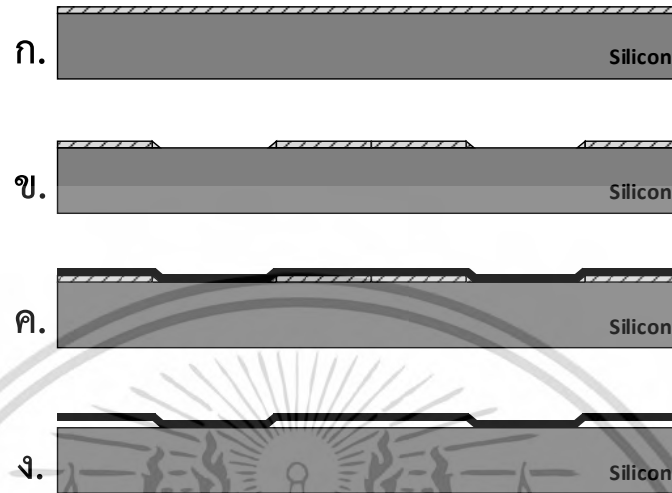
เนื่องจากวงจรรวมส่วนใหญ่จะสร้างบนวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเป็นหลัก ซึ่งในการนำเทคโนโลยีไมโครแมชชีนนิ่งไปใช้ในการสร้างวงจรรวมนั้น จึงต้องมีอุปกรณ์หรือลักษณะของการเจาะและกัด ให้ตรงตามจุดประสงค์ที่ต้องการจะทำ ดังนั้นจึงมีการแบ่งเทคโนโลยีของไมโครแมชชีนนิ่ง ออกเป็น 2 ประเภท คือ การสร้างโครงสร้างจุลภาคบนพื้นผิว (surface micromachining) และการสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ (bulk micromachining) [24-25]

การสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิว [25] เป็นการสร้างชั้นบางๆ ของวัสดุ หรือการกัดชั้นวัสดุบางส่วนที่ไม่ต้องการออก แต่จะไม่มีการกัดลงไปเนื้อวัสดุหรือเนื้อซิลิคอน และเนื่องจากชั้นของวัสดุที่สร้างขึ้นมานั้นอยู่ในระดับไมโครเมตร จึงส่งผลให้การสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิวนั้นมีความละเอียดมากกว่าการสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ ข้อดีของการสร้างโครงสร้างแบบนี้คือ สามารถใช้ในการสร้างวงจรรวมได้โดยง่าย เนื่องจากวงจรรวมจำเป็นต้องมีการสร้างชั้นของฟิล์มโลหะ หรือวัสดุไดอิเล็กทริก (dielectric material) บนฐานรองที่เป็นซิลิคอน ดังนั้นการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาค วัสดุที่ต้องการสร้างต้องมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานที่ต้องการ นอกจากนี้ต้องมีสมบัติเชิงกลที่เหมาะสมเช่นเดียวกัน เช่น ความเค้น และความเครียดของวัสดุ จะได้ไม่ส่งผลเสียกับชิ้นงานที่จะนำไปใช้งานเนื่องจากอาจจะมีการนำไปประยุกต์ใช้งานทางด้านเชิงกล วัสดุที่นิยมใช้ในการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิวสำหรับวงจรรวมเช่น ชั้นของโลหะ (metals) ฟิล์มบาง (thin films) โพลีเมอร์ (polymers) และโพลีซิลิคอน (polysilicons) เป็นต้น รูปที่ 2.12 แสดงกระบวนการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิวเบื้องต้น

การสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคในเนื้อวัสดุ [25] เนื่องจากในการสร้างวงจรรวมมีการใช้ฐานรองเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำซิลิคอนเป็นหลัก ดังนั้นในงานวิจัยบางประเภทจำเป็นต้องมีการเจาะหรือกัดลงไปเนื้อซิลิคอนหลายไมโครเมตรเพื่อสร้างเป็นอุปกรณ์ที่ต้องการ ซึ่งในการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคในเนื้อวัสดุสามารถที่จะกำจัดเนื้อซิลิคอนบางบริเวณที่ไม่ต้องการออกได้ ในการกำจัดเนื้อซิลิคอนที่กล่าวมานี้ สามารถทำให้เนื้อซิลิคอนบางส่วนมีลักษณะตามที่ต้องการได้ เช่น กันทำเป็นรูขนาดเล็ก หรือการทำเป็นหลุมขนาดใหญ่ รวมถึงกัดเนื้อซิลิคอนในปริมาณมากๆ ได้ โดยเทคนิคการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัด (etching) ที่ใช้ในการสร้างโครงสร้างแบบนี้สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ การกัดแบบแห้ง (dry etching) และการกัดแบบเปียก (wet etching) ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้ได้นำกระบวนการกัดของการสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุมาใช้ในการงานวิจัย ซึ่งจะอธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.12 กระบวนการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคบนพื้นผิวโดยเบื้องต้น (ก) การสร้างชั้นของฟิล์มบางส่วนแรกบนเนื้อซิลิคอน (ข) เปิดพื้นที่ที่ต้องการจะสร้างชั้นต่อไป (ค) สร้างชั้นฟิล์มส่วนที่สองบางเคลือบ (ง) ทำการลอกชั้นฟิล์มบางในส่วนแรกออก

### 2.3.1 กระบวนการกัด [26]

กระบวนการกัด (etching process) เป็นกระบวนการที่สำคัญที่ใช้ในการกำจัดส่วนของเนื้อซิลิคอนบางส่วนที่ไม่ต้องการออกจากฐานรอง (substrate) ซึ่งอยู่ในกระบวนการสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ (bulk micromachining) โดยทั่วไปสามารถแบ่งประเภทของกระบวนการกัดออกเป็น 2 ประเภท คือ การกัดแบบแห้ง (dry etching) ซึ่งจะเป็นการกัดโดยใช้พลาสมา และการกัดแบบเปียก (wet etching) เป็นการกัดโดยใช้สารเคมีเป็นหลัก โดยรายละเอียดประเภทของกระบวนการกัดแสดงในหัวข้อถัดไป

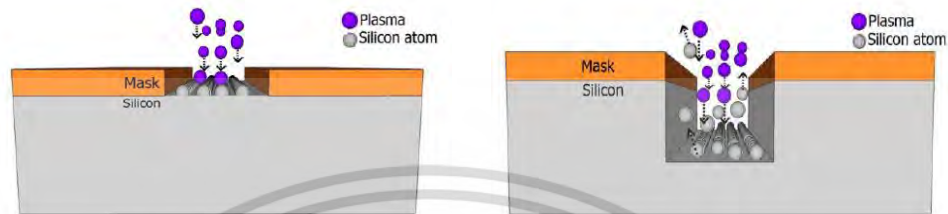
### 2.3.2 ประเภทของกระบวนการกัด

#### 2.3.2.1 การกัดแบบแห้ง

ความหมายของการกัดแบบแห้ง (dry etching) เป็นการกัดบางส่วนของฐานรองที่ไม่ต้องการออกโดยพลาสมาหรือก๊าซ ซึ่งอาศัยหลักการทางฟิสิกส์และทางเคมี สามารถแบ่งได้เป็น 3 ลักษณะคือ

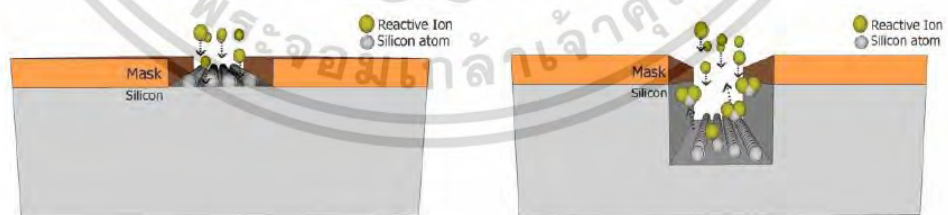
- การกัดโดยใช้ลำแสงของไอออนหรือพลาสมา (ion beam etching : IBE) [27] ซึ่งจัดอยู่ในกระบวนการกัดแบบแห้ง อาศัยหลักการทางฟิสิกส์คือ หลักการชนกันของไอออนของก๊าซเฉื่อยกับอะตอมของวัสดุฐานรอง ซึ่งวิธีนี้กระทำโดยจ่ายก๊าซเฉื่อยเข้าไปในระบบสุญญากาศและใช้สนามไฟฟ้าในการทำให้ก๊าซเฉื่อยแตกตัว ได้เป็นไอออนของก๊าซออกมา เรียกว่า พลาสมา (plasma) โดยอะตอมของฐานรองสามารถหลุดออกจากฐานรองได้เนื่องจากไอออนของก๊าซเฉื่อยที่มาชนนี้มีพลังงานมากถึง 1-2 กิโลอิเล็กตรอนโวลต์ มากกระทบกับอะตอมของซิลิคอนที่ฐานรองทำให้อะตอมของซิลิคอนหลุด
- เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออก ลักษณะการกัดจากกระบวนการนี้จะมีลักษณะแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic) เป็นการกัดอย่างเฉพาะเจาะจงในระนาบใดระนาบหนึ่ง อย่างไรก็ตามการกัดแห้งโดยวิธีนี้ไม่สามารถเลือกระนาบของฐานรองที่จะกัดได้ เนื่องจากไอออนของก๊าซที่มาชนนี้มาจากทิศทางตั้งฉากกับฐานรองและมีอัตราการกัดที่ค่อนข้างต่ำเนื่องจากต้องอาศัยการชนกันของไอออนจึงไม่ค่อยพบการกัดแห้งลักษณะนี้ในปัจจุบัน โดยลักษณะการกัดด้วยกระบวนการนี้แสดงดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การกัดซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดแบบแห้ง โดยใช้ลำแสงของไอออนหรือพลาสมาในการกัด [26]

- การกัดโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของก๊าซ (chemical dry etching : CDE) [27] อาศัยหลักการทางเคมี ซึ่งจะทำงานในระบบสุญญากาศเช่นเดียวกับการกัดโดยใช้พลาสมา โดยจะทำการจ่ายก๊าซที่เป็นสารประกอบเคมีต่างๆ เช่น ไนโตรเจน ไตรฟลูออไรด์ (nitrogen trifluoride :  $\text{NF}_3$ ), เตตระฟลูออโรมีเทน (Tetrafluoromethane :  $\text{CF}_4$ ) และ ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (sulfur hexafluoride :  $\text{SF}_6$ ) เป็นต้น และใช้คลื่นความถี่วิทยุ (radio frequency : RF) เป็นตัวแยกโมเลกุลของก๊าซเพื่อไปจับกับอะตอมของซิลิคอนบนฐานรอง ข้อดีของการกัดแห้งโดยวิธีนี้ คือ ผิวของวัสดุฐานรองจะไม่ได้รับความเสียหายมากนักจากการชนเนื่องจากวิธีนี้อาศัยโมเลกุลของก๊าซมาจับกับอะตอมที่ฐานรอง ลักษณะการกัดด้วยวิธีนี้จะมีลักษณะแบบไอโซโทรปิก (isotropic) ซึ่งจะเป็นการกัดอย่างสม่ำเสมอในทุกทิศทาง ทำให้นิยมนำวิธีการกัดแห้งลักษณะนี้ไปใช้ในการกัดหรือลอกชั้นของฟิล์มบางที่เคลือบทั้งแผ่นออก เช่น ฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ที่ด้านหลังแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ ลักษณะการกัดแห้งโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของก๊าซแสดงดังรูปที่ 2.14

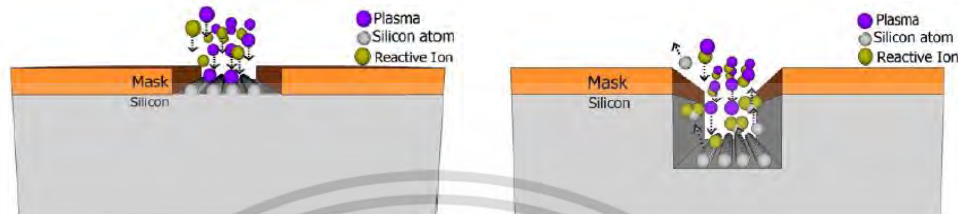


รูปที่ 2.14 การกัดซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดแบบแห้งโดยใช้ปฏิกิริยาเคมีของก๊าซในการกัด [26]

- การกัดด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยา (reactive ion etching : RIE) [27] อาศัยหลักการทางฟิสิกส์และเคมี โดยจ่ายก๊าซเข้าสู่ระบบและทำการสลายก๊าซตั้งต้นให้เป็นพลาสมาด้วยคลื่นความถี่วิทยุที่บริเวณขั้วแอโนดและขั้วแคโทด พลาสมาที่เกิดขึ้นจะประกอบด้วยไอออนที่มีประจุลบ และไอออนของก๊าซที่เป็นประจุบวก ไอออนของก๊าซที่แตกตัวจะถูกเร่งด้วยศักย์ไฟฟ้าให้เคลื่อนที่ไปชนกับฐานรอง ทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซตั้งต้นกับฐานรอง และอะตอมของซิลิคอนที่ฐานรองหลุด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน เมื่อผู้จัดทำเห็นประโยชน์ในการนำเอกสารนี้ไปใช้ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

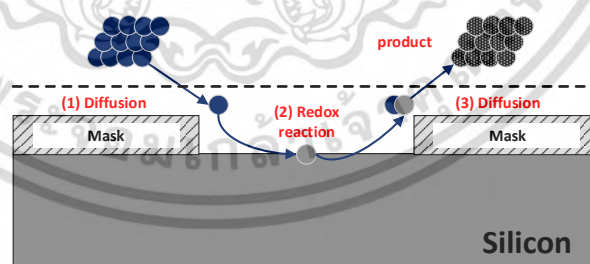
ออกมาอยู่ในรูปสารประกอบตัวใหม่ แต่อย่างไรก็ตามสารประกอบตัวใหม่ที่เกิดขึ้นมาไม่ส่งผลต่อแผ่นฐานรองเพราะในที่สุดจะถูกปั๊มสูญญากาศออกจากระบบสูญญากาศ ซึ่งในปัจจุบันจะพบว่ามี การกัดแห้งโดยใช้วิธีนี้เป็นส่วนใหญ่ เนื่องจากมีอัตราการกัดที่สูง และมีความสามารถในการเลือก กัดวัสดุได้โดยเปลี่ยนก๊าซตั้งต้นเพียงอย่างเดียว ลักษณะการกัดแห้งด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาแสดง ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 การกัดซิลิคอนด้วยกระบวนการกัดแบบแห้งด้วยไอออนที่ไวต่อปฏิกิริยาในการกัด [26]

### 2.3.2.2 การกัดแบบเปียก

การกัดแบบเปียก (wet etching) เป็นการกัดโดยใช้สารละลายเคมีเพื่อให้สารเคมีทำปฏิกิริยากับแผ่นซิลิคอนที่เป็นฐานรอง โดยปฏิกิริยาของสารเคมีที่เกิดขึ้นกับซิลิคอน อาศัยหลักการโดยทั่วไป อยู่ 3 ข้อ คือ (1) การแพร่ (diffusion) กระจายของสารละลายบนบริเวณส่วนที่ต้องการให้ถูกกัด (2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายกับบริเวณส่วนที่ต้องการให้ถูกกัด โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะ เรียกว่าปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) หรือปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะทำให้บริเวณส่วนที่ต้องการให้ถูกกัดจับตัวกับสารละลายและถูกดึงออกสู่ออกซิเดชัน หรือที่เรียกว่าการออกซิเดชันของวัสดุ และ (3) เกิดการแพร่กระจายของผิวหน้าของวัสดุที่ จับตัวอยู่กับสารละลาย ซึ่งอาจส่งผลให้เกิดปฏิกิริยาที่เปลี่ยนแปลงไป และเกิดผลิตภัณฑ์ (product) ใหม่เกิดขึ้น [28] ดังรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 ตัวอย่างของปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นจากการกัดแบบเปียก [29]

การกัดแบบเปียกสามารถแบ่งลักษณะของการกัดได้ 2 ลักษณะคือ การกัดแบบไอโซโทรปิก (isotropic etching) และการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก (anisotropic etching)

- การกัดเปียกลักษณะไอโซโทรปิก (isotropic etching) เป็นการกัดแบบสม่ำเสมอในทุกๆ ทิศทาง ซึ่งจะมีข้อเสียคือ ไม่เหมาะกับงานที่ต้องการความละเอียดมากๆ เพราะเนื่องจากมีคุณสมบัติ ในการกัดทุกๆ ทิศทาง จึงอาจทำให้สารเคมีเซาะบริเวณรอบข้างได้โดยง่าย ถ้าควบคุมปริมาณสารที่ใช้ กัดเป็นอย่างดีจะเห็นว่ารูปทรงที่โดนกัดโดยลักษณะนี้จะคล้ายรูปทรงกลม ดังรูปที่ 2.17 (ก) ดังนั้นถ้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มีความจำเป็นต้องใช้การกัดลักษณะนี้ ในขั้นตอนการออกแบบลวดลายต้องคำนึงถึงบริเวณที่ถูกละเอียดด้วย จึงพบว่าการกัดลักษณะเหมาะกับการใช้งานประเภทที่ต้องการลอกชั้นบางๆของฟิล์มออก การกัดเปียกแบบไอโซโทรปิกสามารถเตรียมสารเคมีได้โดยใช้อัตราส่วนผสมระหว่างกรดไฮโดรฟลูออริก, กรดไนตริก และกรดอะซิติก (hydrofluoric acid : nitric acid : acetic acid (HF : HNO<sub>3</sub> : CH<sub>3</sub>COOH))

- การกัดเปียกลักษณะแอนไอโซโทรปิก (anisotropic etching) เป็นการกัดในแต่ละระนาบที่ไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับสารเคมีและวัสดุฐานรอง โดยทั่วไปสารเคมีที่นิยมใช้ในการกัดลักษณะนี้คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีน ไพโรคาทิกอล (EDP) และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นต้น ดังนั้นเมื่อใช้สารเคมีเหล่านี้ในการกัดฐานรองที่เป็นซิลิคอนในระนาบ (100) พบว่าจะมีลักษณะเฉพาะคือ สามารถกัดซิลิคอนในระนาบ (100) มากกว่า ระนาบ (111) จึงส่งผลให้ฐานรองซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นเป็นรูปทรงเรขาคณิตที่ชัดเจนดังรูปที่ 2.17 (ข)



รูปที่ 2.17 ลักษณะเฉพาะของการกัดเปียกในลักษณะต่างๆ (ก) การกัดเปียกลักษณะไอโซโทรปิก (ข) การกัดเปียกลักษณะแอนไอโซโทรปิก [26]

อย่างไรก็ตามในวิทยานิพนธ์นี้ก็เลือกใช้การกัดเปียกมาใช้ในกระบวนการสร้างเนื่องมาจากมีค่าใช้จ่ายที่ถูก สามารถติดตั้งเครื่องมือและอุปกรณ์ได้ง่าย ไม่มีความเป็นอันตราย ดังแสดงในตารางที่ 2.1 และที่สำคัญที่สุดคือทำการเลือกการกัดเปียกลักษณะแอนไอโซโทรปิก เนื่องจากการกัดเปียกลักษณะนี้ให้รูปทรงทางเรขาคณิตที่แน่นอน สามารถคำนวณได้อย่างแน่นอนว่ามีพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มากขึ้นกว่าแบบพลาสมาถึง 1.7 เท่า ตามสมการตรีโกณมิติ ในบทที่ 3 ซึ่งตรงตามวัตถุประสงค์ของวิทยานิพนธ์ที่ต้องการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง ดังนั้นในหัวข้อต่อไปจึงขอกล่าวเฉพาะสารเคมีที่ใช้ในการกัดเปียกลักษณะแอนไอโซโทรปิกเพียงเท่านั้น

ตารางที่ 2.1 ข้อมูลความแตกต่างของการกัดแบบเปียก และการกัดแบบแห้ง

ประเภทของการกัด	การกัดเปียก (wet etching)	การกัดแห้ง (dry etching)
หลักการ	อาศัยการเกิดปฏิกิริยาบนผิวของฐานรอง	ใช้หลักการชนกันโดยไอออนและปฏิกิริยาเคมีของก๊าซที่ฐานรอง
เครื่องมือและอุปกรณ์	ภาชนะปิด ในสภาพแวดล้อมปกติ	ภาชนะปิดในระบบสุญญากาศ
ข้อดี	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าใช้จ่ายต่ำและสามารถเตรียมอุปกรณ์ง่าย</li> <li>- มีอัตราการกัดที่ค่อนข้างสูงตามชนิดของสารละลาย</li> <li>- มีความสามารถในการเลือกวัสดุฐานรองที่ถูกกัดได้ดี</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถกัดช่องขนาดเล็กหรือแคบ น้อยกว่า 100 นาโนเมตรได้</li> </ul>
ข้อเสีย	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่สามารถกัดช่องที่เล็กกว่า 1 ไมโครเมตรได้</li> <li>- มีผลกระทบต่อสารเคมีได้ง่าย</li> <li>- มีโอกาสพบสิ่งแปลกปลอมในสารละลายได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ค่าใช้จ่ายสูงและต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านในการเตรียมอุปกรณ์</li> <li>- ความสามารถในการเลือกวัสดุฐานรองที่ถูกกัดได้ไม่ดี</li> <li>- อุปกรณ์มีความอันตรายสูง</li> </ul>

### 2.3.3 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซโทรปิก

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าการกัดเปียกแบบแอนไอโซโทรปิกนั้นเป็นการกัดในแต่ละระนาบที่ไม่เท่ากัน สารเคมีที่นิยมนำมาใช้ในกระบวนการกัดลักษณะนี้ ยกตัวอย่างเช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีน ไฟโรคาทิกคอล (EDP) และเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) เป็นต้น อย่างไรก็ตามสารเคมีแต่ละชนิดจะมีคุณลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกันไป

ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ในวิทยานิพนธ์นี้ ถ้ามีการนำกระบวนการกัดแบบเปียกเข้ามาใช้ในการสร้างจะทำให้ใช้ต้นทุนในราคาที่ไม่สูงมากนัก ที่สำคัญการกัดด้วยสารเคมีจะมีความเหมาะสมกับวัสดุที่ใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง เช่น ซิลิคอนออกไซด์ ซิลิคอนและอลูมิเนียม เป็นต้น โดยสารเคมีที่ใช้ในการกัดถ้ามีความไม่เหมาะสมจะมีสิ่งที่ไม่เจือปน ปนเปื้อนหรือตกค้างบริเวณพื้นผิวของซิลิคอนได้ โดยสิ่งที่ตกค้างบนพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนี้สามารถส่งผลกระทบต่อกลไกทางไฟฟ้าได้ ข้อกำหนดที่สำคัญสำหรับสารเคมีที่นำมาใช้ในการกัด คือ จะต้องมีความสะดวกในการใช้งาน และ จะต้องมีความปลอดภัย ในปัจจุบันสารเคมีที่นำมาใช้ในการกัดแบบเปียกมากที่สุดจะแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม คือ (1) แอลคาไลเมทัลไฮดรอกไซด์ (alkali metal hydroxide) [30] (2) ไดแอมมีนเบส (diammines-based) [31] และ (3) ควอเทอริแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (quaternary ammonium hydroxide) [32] สารที่ใช้ในการกัดในกลุ่มของแอลคาไลเมทัลไฮดรอกไซด์ เช่น สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่มีอัตราการกัดซิลิคอนค่อนข้างสูงและสามารถ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุมัติฯ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กัดแบบแอนไอโซทรอปิกได้ แต่เป็นที่น่าเสียดาย ที่สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ไม่เหมาะสมกับการนำมาใช้ในกระบวนการสร้างวงจรรวม เพราะว่าจะมีการกัดส่วนของอลูมิเนียมไปด้วยและมีการบป้อนของต่างบางส่วนที่หลงเหลืออยู่บนผิวหน้าของวัสดุที่ถูกกัด สารละลายในกลุ่มของไดแอมมีนเบส (diammines-based) เช่น สารละลายเอธิลีน ไดแอมมีนไพโรคาทิกคอล (EDP) โดยทั่วไปจะใช้สำหรับการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของซิลิคอนผลึกเดี่ยว และถูกนำไปใช้อย่างมากในการสร้างโครงสร้างจุลภาคในเนื้อวัสดุ (bulk micromachining) อย่างไรก็ตามการใช้สารละลายเอธิลีนไดแอมมีนไพโรคาทิกคอล (EDP) ก็ไม่เหมาะสมเสมอไป เพราะว่ามีอันตรายและมีความเป็นพิษสูง สารละลายในกลุ่มของควอเทอร์นารีแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (quaternary ammonium hydroxide) สารละลายในกลุ่มนี้เช่น สารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ $((\text{CH}_3)_4\text{NOH})$  หรือ TMAH) เป็นสารละลายที่มีความเหมาะสมกับการนำมาใช้ในกระบวนการกัดมากที่สุดเพราะว่ามีอัตราการกัดของซิลิคอนค่อนข้างสูง ไม่มีการทิ้งไอออนตกค้างของสารละลายที่บริเวณผิวของวัสดุที่ถูกกัด ซึ่งมีความเหมาะสมกับกระบวนการสร้างวงจรรวมมากที่สุด

ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบข้อมูลการกัดของสารเคมีที่ใช้ในการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

สารละลายที่ใช้ในการกัด	เอธิลีนไดแอมมีนไพโรคาทิกคอล (EDP)	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH)	เตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH)
อัตราการกัดซิลิคอน (ไมโครเมตรต่อนาที)	0.75-1.25	1-2	1
อัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ (ไมโครเมตรต่อนาที)	1-80	1-10	0.05-0.25
อัตราส่วนการกัดของระนาบ (100) และ (111)	35	400	10-35
การเลือกกัดอะลูมิเนียม (Al selectivity)	กัด	กัด	ไม่กัด
ลักษณะของพื้นผิว	ขรุขระ	ขรุขระมาก	ปานกลาง
การทิ้งประจุตกค้าง	ไม่มี	มี	ไม่มี
ค่าใช้จ่าย	แพง	ถูก	ปานกลาง
การเตรียมสารเคมี	ง่าย	ยาก	ปานกลาง
ความปลอดภัย	ต่ำ	ปานกลาง	สูง

อย่างไรก็ตามในการที่จะเลือกสารเคมีที่จะใช้ในกระบวนการกัด จะต้องคำนึงถึงปัญหาสำคัญหลายๆอย่าง เช่น ความสะดวกในการใช้งาน, ปัญหาในเรื่องความเป็นพิษ, อัตราการกัด, ความเอกรวมนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เหมาะสมสำหรับกระบวนการสร้างวงจรรวม, การหยุดกั้ด, ความสามารถในการกั้ดวัสดุต่างๆ, วัสดุที่นำมาทำเป็นหน้ากัก และ ความหนาของชั้นหน้ากัก เป็นต้น จากปัญหาต่างๆที่กล่าวมาข้างต้น สารละลาย TMAH มีความเหมาะสมหลายอย่าง เช่น มีความสะดวกในการใช้งาน, ไม่มีปัญหาในเรื่องความเป็นพิษ และมีความเหมาะสมกับกระบวนการสร้างวงจรรวม [33] ดังตารางที่ 2.2

ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้สารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์มาใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงและทำการเติมสารละลายต่างๆเพื่อทำการปรับปรุงคุณสมบัติในการกั้ดให้ดียิ่งขึ้น เช่น การลดอัตราการกั้ดอะลูมิเนียม ความสามารถในการกั้ดซิลิคอน และความขรุขระของพื้นผิว เป็นต้น

### 2.3.4 ปฏิกริยาเคมีของสารละลาย TMAH ที่มีต่อพื้นผิวซิลิคอน

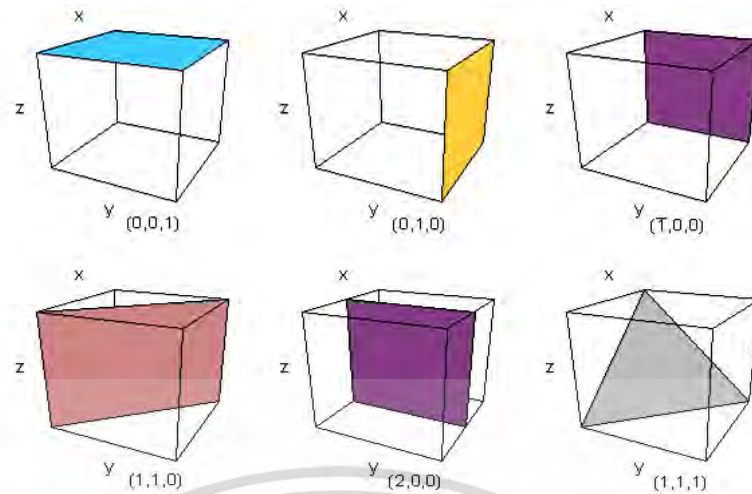
ในการใช้สารละลาย TMAH ในการกั้ดซิลิคอนนั้น เนื่องจากซิลิคอนเป็นวัสดุสารกึ่งตัวนำ ที่มีการจัดเรียงตัวของอะตอมในลักษณะต่างๆ ดังนั้นจึงต้องศึกษาโครงสร้างและการจัดเรียงตัวของซิลิคอนในหัวข้อที่ 2.3.4.1 ก่อน เพื่อต่อการเข้าใจ

#### 2.3.4.1 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน

เนื่องจากสมบัติทางฟิสิกส์ของผลึกขึ้นกับตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกดังนั้นจึงต้องระบุแน่นอนว่ากำลังศึกษาลักษณะส่วนใดของผลึกอยู่ การระบุลักษณะดังกล่าวจะบอกถึงตำแหน่งของทิศทางและระนาบของผลึกที่กำลังศึกษาอยู่นั้นมีเกณฑ์พื้นฐานดังนี้

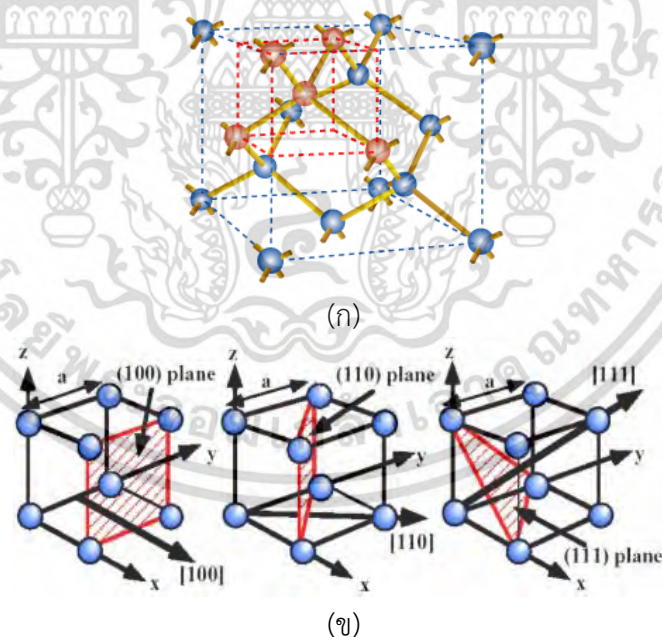
- การระบุตำแหน่ง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $(x,y,z)$  โดยสังเกตเครื่องหมาย “,” ซึ่งคั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ตัวอย่างเช่น จุด  $(1,2,3)$  หมายความว่า เป็นตำแหน่งอยู่ที่พิกัด  $x=1, y=2, z=3$
- การระบุทิศทาง ในกรณีทั่วไปจะเขียนเป็น  $[u\ v\ w]$  โดยสังเกตว่าใช้วงเล็บสี่เหลี่ยมและไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่าแต่ละค่า ถ้าเป็นทิศทางที่เป็นวงเล็บก็จะใส่เครื่องหมาย “-” หรือ บาร์ (bar) ไว้บนตัวเลขนั้นๆ เช่น ทิศทาง  $[\bar{1}]$  แสดงว่าในแนวแกน  $z$  มีค่าเป็นลบ

- การระบุชื่อระนาบ จะใช้อักษร  $(hkl)$  โดยให้สังเกตการใช้วงเล็บ และไม่มีเครื่องหมาย “,” คั่นอยู่ระหว่างค่า  $(hkl)$  เรียกว่า ดัชนีมิลเลอร์ (Miller indices) ระนาบของผลึกเป็นสิ่งที่สำคัญที่สุดในการศึกษาผลึก เพราะในแต่ละระนาบจะประกอบไปด้วยอะตอมไอออนหรือโมเลกุลเรียงตัวกันอยู่บนระนาบนั้น อาจกล่าวได้ว่าระนาบแต่ละระนาบจะมีความแตกต่างกันเช่นเดียวกับทิศทาง จุดที่ระนาบหนึ่งๆ ตัดแกนผลึกจะได้อาจมาจากค่าส่วนกลับของดัชนีมิลเลอร์ เช่น ระนาบ  $(010)$  นั้นจะตัดแกน  $(x,y,z)$  ที่จุด  $(1/0, 1/1, 1/0)$  หรือที่จุด  $(\infty, 1, \infty)$  นั่นเอง (ระยะอนันต์หมายถึงระนาบนั้นขนานกับแกนนั้น และไปตัดแกนนั้นที่ระยะอนันต์) ดังแสดงในรูปที่ 2.18 ซึ่งสรุปความสัมพันธ์ระหว่างระนาบต่างๆ กับระยะตัดแกนอ้างอิง [34]



รูปที่ 2.18 การบอกชื่อระนาบต่างๆ ของผลึก [34]

แต่อย่างไรก็ตามซิลิคอนจะมีโครงสร้างอะตอมเป็นแบบ Face Centered Cubic (FCC) มีระยะห่างระหว่างอะตอม (lattice constant) เท่ากับ 5.43 อังสตรอม และมักพบว่ามี การนำซิลิคอนเวเฟอร์ระนาบ (100) ไปใช้ในการสร้างวงจรรวมหรืองานทางด้านอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเป็นหลัก ลักษณะโครงสร้างอะตอมของซิลิคอนแสดงดังรูปที่ 2.19 (ก) และโครงสร้างอะตอมของซิลิคอนที่ระนาบต่างๆ แสดงดังรูปที่ 2.19 (ข)

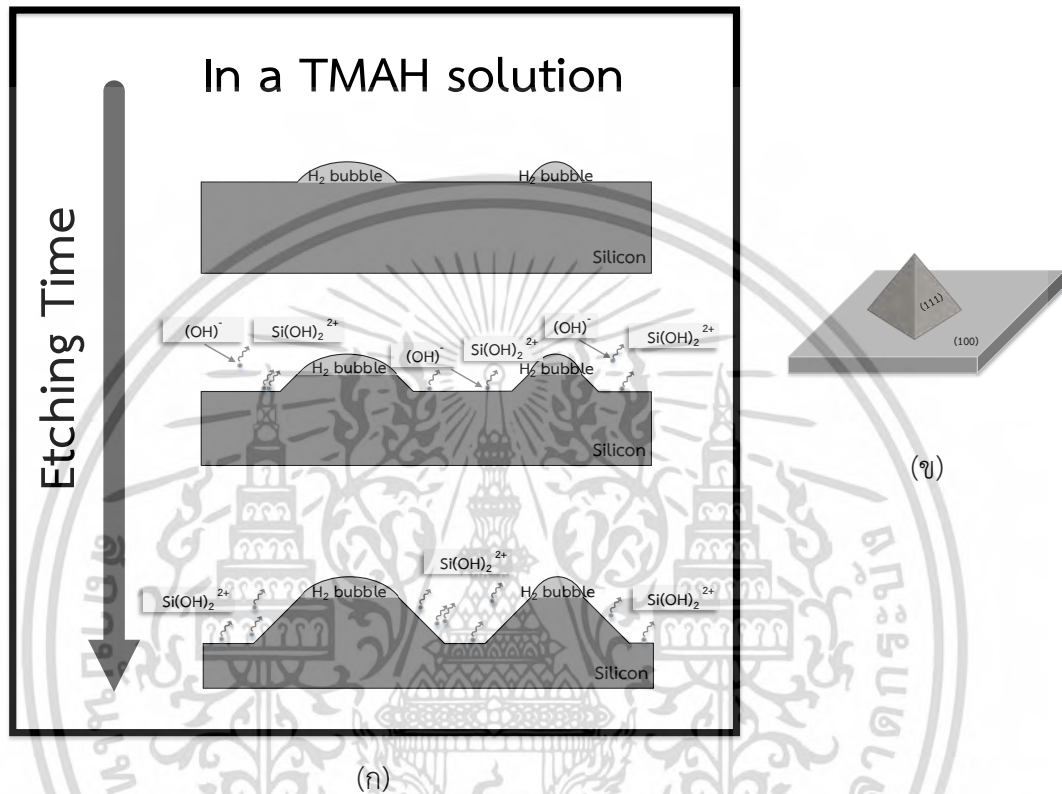


รูปที่ 2.19 (ก) โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนแบบ FCC และ (ข) โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนที่ระนาบต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากการกัดแบบเปียกโดยสารละลาย TMAH จะส่งผลให้เกิดความขรุขระของพื้นผิวที่ถูกกัดได้ ซึ่งเกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการกัดมาปกคลุมบางส่วนของพื้นผิวเป็นลักษณะจุดเล็กๆ ทำหน้าที่เป็นชั้นที่ป้องกันการกัด ดังนั้นสารเคมีจึงไม่สามารถทำปฏิกิริยากับส่วนนี้ได้หรือทำปฏิกิริยาได้น้อย จึงส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความขรุขระลักษณะเหมือนเนินของพีระมิดขึ้น โดยกลไกของการเกิดพีระมิดจากสารละลาย TMAH แสดงได้ดังรูปที่ 2.21



รูปที่ 2.21 (ก) กลไกการเกิดความขรุขระหรือเนินของพีระมิดจากสารละลาย TMAH (ข) ระนาบของซิลิคอนที่ถูกกัดจนกลายเป็นพีระมิดเกิดขึ้น [37]

ดังนั้นสิ่งที่เป็นปัญหาสำหรับกระบวนการกัดแบบเปียก สำหรับใช้ในการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง คือ อัตราการกัดของวัสดุที่ใช้ทำขั้วไฟฟ้า และการควบคุมความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด ซึ่งเนินของพีระมิดที่เกิดขึ้นเหล่านี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย คือ ข้อดี จะช่วยในการเพิ่มความสามารถในการดูดกลืนแสงให้มากยิ่งขึ้น แต่ข้อเสีย คือ ในการสร้างชิ้นงานแต่ละครั้งอาจจะไม่ได้เงื่อนไขที่เหมือนกันทุกครั้ง

ดังนั้นจึงมีการเติมสารละลายต่างๆลงในสารละลาย TMAH เพื่อที่จะแก้ปัญหา 2 อย่างข้างต้นคือในด้านอัตราการกัด และด้านความขรุขระพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

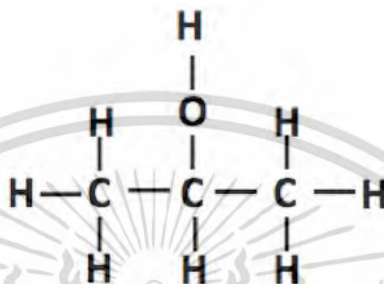
### 2.3.5 สารเคมีที่นิยมเติมลงในสารละลาย TMAH เพื่อปรับปรุงคุณภาพในการกัด

จากที่ผ่านมามีการศึกษาและการทดลองต่างๆ โดยการเติมสารเคมีลงในสารละลาย TMAH เพื่อปรับปรุงคุณภาพทั้งในด้านอัตราการกัดอะลูมิเนียม ซิลิคอน และการควบคุมความเรียบของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด จึงพบว่าสารเคมีที่ช่วยแก้ไขปัญหาลักษณะนี้ได้คือ การเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลาย TMAH และการเติมคู่สารเจือลงในสารละลาย TMAH

เอกสารนี้เป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.3.5.1 ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [8]

ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol : IPA) จัดอยู่ในกลุ่มสารลดแรงตึงผิวประเภทหนึ่ง ซึ่งสามารถนำมาใช้ทางการแพทย์และการทดลองทางวิทยาศาสตร์ได้ โดยทางการแพทย์ ใช้ในการฆ่าเชื้อโรค และการทดลองทางวิทยาศาสตร์ ช่วยในการลดแรงตึงผิวของสารละลายทำให้ช่วยเพิ่มความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาเคมีได้ดียิ่งขึ้น โดย IPA นั้นจะมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่มีสี มีกลิ่นค่อนข้างรุนแรง และโครงสร้างทางสารเคมีของ IPA จะมีหมู่ของไฮดรอกซิลต่อที่โครงสร้างของคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 2.22 รายละเอียดเพิ่มเติมสามารถศึกษาได้จาก [8]



รูปที่ 2.22 โครงสร้างทางเคมีของไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ [39]

### 2.3.5.2 คู่สารเจือของสารละลาย TMAH

คำว่าคู่สารเจือของสารละลาย TMAH (TMAH-Dual Doped) เกิดจากการนำสารละลาย 2 ชนิดผสมลงในสารละลาย TMAH ซึ่งจะทำให้เกิดข้อสงสัยของคำว่า โด๊ป (dope) ซึ่งในทางปกติจะเป็นการเติมของแข็งลงในของแข็ง แต่ในที่นี้เป็นกรเติมสารละลายทั้ง 2 ชนิดลงในสารละลาย TMAH เนื่องมาจากการอ้างอิงในบทความวิชาการ [10-11]

สารละลายทั้ง 2 ชนิดนี้ คือ กรดซิลิซิก (Silicic acid) และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium Persulfate : AP)

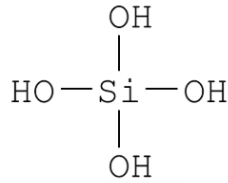
- กรดซิลิซิก (Silicic acid) หรือกรดออร์โธซิลิก (orthosilic acid) [38] มีลักษณะเป็นเกล็ดสีขาว ไม่มีกลิ่น อยู่ในรูปของแข็ง เป็นชื่อทั่วไปของกลุ่มสารประกอบเคมีที่มีซิลิคอน ออกไซด์ และกลุ่มของไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบ โดยทั่วไปสารประกอบเคมีในกลุ่มนี้ จะมีสูตรทางเคมี คือ  $(\text{SiO}_x(\text{OH})_{4-2x})_n$  โดยกรดซิลิซิกเกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชัน (hydration reaction) หรือการที่สารเคมีจับตัวกับน้ำอยู่ในรูปสารประกอบผลิตภัณฑ์ใหม่เกิดขึ้น ดังสมการเคมีที่ 2.19



จากสมการเคมีที่ 2.6 จะเห็นว่าควอตซ์ ( $\text{SiO}_2$ ) เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันกับโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) จึงได้ผลิตภัณฑ์ใหม่ที่เกิดขึ้นมา คือ กรดซิลิซิก ( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ) โดยทั่วไปกรดซิลิซิกสามารถละลายในน้ำกลายเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ได้ ซึ่งจะสัมพันธ์กับปฏิกิริยาการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH ในสมการเคมีที่ 2.17 โดยซิลิคอนไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับไอออนของไฮดรอกซิลกลายเป็นกรดออร์โธซิลิก (orthosilic acid) ได้เช่นกัน ในปัจจุบันมักจะเห็นการนำกรดซิลิซิกไปใช้ทางการแพทย์ซึ่งจะมีประโยชน์ คือ เนื่องจากเป็นสารประกอบของซิลิคอนดังนั้นจึงสามารถส่งผลให้พีซีมีความ

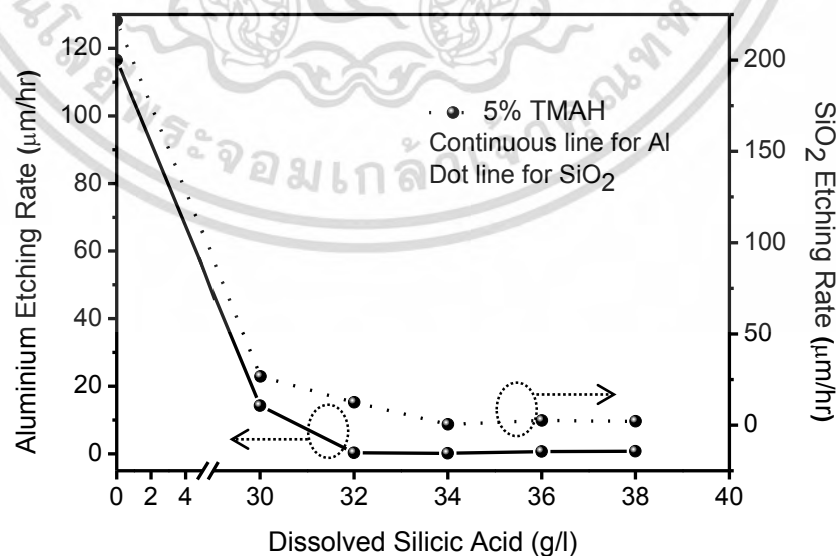
แข็งแรง ทนต่อสภาพอากาศต่างๆได้ดี ช่วยรักษาหน้าดิน เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามก็มีบทความวิจัยที่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาก็เท่านั้น เมื่อผู้เขียนได้เห็นเว็บไซต์นี้จึงมีความไม่แน่ใจว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มักนำกรดซิลิซิกมาใช้ในด้านกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน เนื่องจากมีอะตอมหลักเป็นซิลิคอนเหมือนกัน จึงส่งผลให้เกิดอัตราการกัดวัสดุ อื่นๆ เช่นอะลูมิเนียม ได้ช้าลงด้วย [35] โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก แสดงดังรูปที่ 2.23



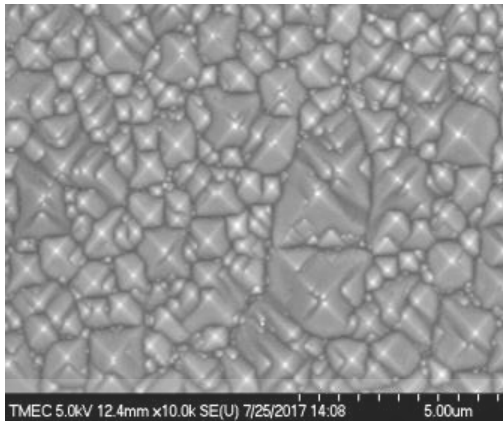
รูปที่ 2.23 โครงสร้างทางเคมีของกรดซิลิซิก [38]

การทดลองเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับ TMAH-Dual Doped นั้น [35] ขั้นตอนที่สำคัญคือการเตรียมสารตั้งต้นให้เหมาะสม ในงานวิจัยนี้ทำการเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟตลงในสารตั้งต้น โดยสารตั้งต้นคือกรดซิลิซิกในสารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ งานวิจัยที่ผ่านมาของห้องวิจัยมีการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกรดซิลิซิกในสารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สำหรับในการสร้างตัวตรวจวัดแสง พบว่าเมื่อทำการเติมกรดซิลิซิก ปริมาณ 34 กรัมต่อลิตร ลงในสารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 5 % โดยน้ำหนัก มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์น้อยที่สุดเท่ากับ 0.23 และ 0.41 ไมโครเมตรต่อชั่วโมงตามลำดับ ดังรูปที่ 2.24 ทำให้ได้เงื่อนไขที่เหมาะสมในการนำมาสร้างตัวตรวจวัดแสงต่อไป แต่อย่างไรก็ตามเมื่อนำมาตรวจสอบลักษณะพื้นผิวโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดก็พบว่าพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความขรุขระ และมีเนินของฟิโรรีตกระจายอยู่ ดังรูปที่ 4.2 ทำให้ยากต่อการควบคุมความสม่ำเสมอของฟิโรรีตเหล่านี้ ในการสร้างครั้งต่อไปจึงทำการเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟตลงในสารตั้งต้นเพื่อทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพต่อไป โดยจะกล่าวในหัวข้อที่ 4.1.1

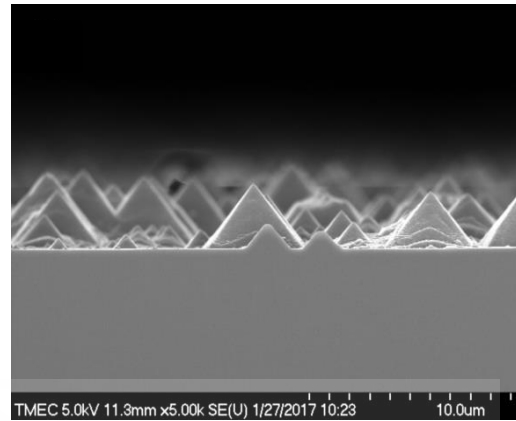


รูปที่ 2.24 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์กับกรดซิลิซิกที่ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH 5%wt ที่อุณหภูมิ 80 °C

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยเท่านั้น ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



(ข)

**รูปที่ 2.25** ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) ของตัวตรวจวัดแสง ที่อุณหภูมิ 80 °C สร้างโดย (ก) สารละลาย TMAH 5%wt +Silicic 34 g/l (ข) ภาพตัดขวางจาก SEM ของสารละลาย TMAH 5%wt +Silicic 34 g/l

- แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (Ammonium persulfate: AP) หรือแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต (Ammonium peroxodisulfate: AP) [36] สาร AP นั้นจะมีลักษณะเป็นผงสีขาว ไม่มีกลิ่น มีสูตรเคมีคือ  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$  มีความสามารถในการกัดกร่อนและเป็นสารเคมีที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) ได้ดี ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาออกซิเดชัน

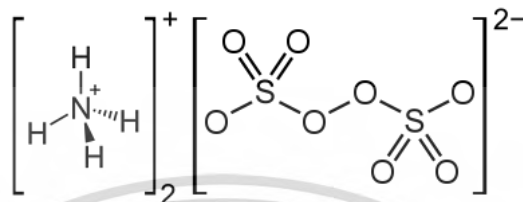
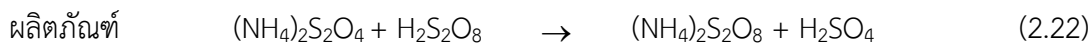
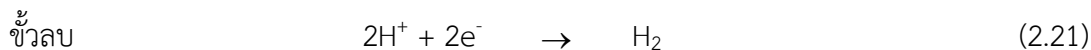
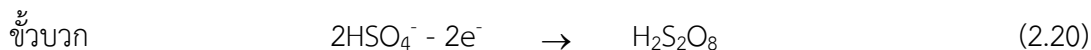
ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) หมายถึงปฏิกิริยาที่โมเลกุลหรืออะตอมมีการสูญเสียอิเล็กตรอนจากวงโคจรให้กับโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชัน (reduction) จะเกิดคู่กัน สารที่ทำหน้าที่เป็นตัวให้อิเล็กตรอนเรียกว่า ตัวรีดิวซ์ (reducing agent) และเรียกรวมสารที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอนนี้ว่า ตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) โดยปฏิกิริยาออกซิเดชันมักจะเกี่ยวข้องกับออกซิเจน นอกจากนี้ออกซิเดชันยังหมายถึงการเสียไฮโดรเจนอะตอมออกจากโมเลกุลอีกด้วย [40]

สาร AP เมื่อโดนอุณหภูมิที่สูงหรือความร้อน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ง่ายเนื่องจากมีสมบัติการดูดซึมน้ำได้ดี สาร AP สามารถละลายได้ดีในน้ำที่มีอุณหภูมิสูงแต่จะเกิดการจับตัวเมื่อนำไปละลายในน้ำที่มีอุณหภูมิต่ำหรือสถานที่ที่มีความชื้น สาร AP ไม่สามารถติดไฟได้แต่สามารถปลดปล่อยออกซิเจนได้ซึ่งมีความสามารถในการสนับสนุนการเผาไหม้ให้ดียิ่งขึ้น ดังนั้นในการเก็บรักษาจะต้องจัดเก็บในสถานที่ค่อนข้างแห้ง สะอาด มีการระบายอากาศได้ดี และควรเก็บให้พ้นจากบริเวณที่สามารถติดไฟได้ง่าย และในการผสมสาร AP เข้ากับสารละลายตัวอื่นควรจะต้องศึกษาข้อมูลให้ดีเสียก่อนเพื่อหลีกเลี่ยงการสลายตัวของแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตและทำให้เกิดการระเบิด

สาร AP สามารถเตรียมได้จากกระบวนการอิเล็กโทรลิซิส (electrolysis) ของแอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulfate) การเจือจางของกรดซัลฟิวริก และอาศัยการตกผลึก เมื่อจุ่มขั้วไฟฟ้าบวกและลบลงในสารละลาย จะเกิดการสร้าง เปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต (peroxodisulfate) โดยโมเลกุลของ  $\text{HSO}_4^-$  ที่ขั้วบวก จากนั้นจะทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียมซัลเฟตเพื่อสร้างแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ดังสมการเคมีที่ 2.20 ,2.21 และ 2.22 ตามลำดับ สุดท้ายนำสารที่ได้ผ่านการกรองการตกผลึกการแยกด้วยแรงเหวี่ยงและการอบแห้งเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์แอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต โครงสร้างทางเคมี

ของสาร AP แสดงดังรูปที่ 2.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.26 โครงสร้างทางเคมีของสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต [36]

จากการเติมสารเคมีต่างๆลงในสารละลาย TMAH เพื่อปรับปรุงคุณภาพในการกัด ในวิทยานิพนธ์นี้จึงทำการศึกษาการเติมคู่สารเจือของสารละลาย TMAH เพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแบบ UMSM ซึ่งในกลุ่มวิจัยยังไม่เคยศึกษามาก่อน ศึกษาเพียงการเติมไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ลงในสารละลาย TMAH เท่านั้น

อย่างไรก็ตามการเติมกรดซัลฟิวริกและสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตลงในสารละลาย TMAH จะมีปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับพื้นผิวของซิลิคอน ที่ส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบอย่างเห็นได้ชัด และมีอัตราการกัดของอะลูมิเนียมที่น้อยลง ซึ่งปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นนี้อธิบายโดยละเอียดในบทที่ 4 ต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## การออกแบบ และกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (metal-semiconductor-metal; MSM) มีจุดเด่นที่สำคัญคือ มีกระบวนการสร้างที่ค่อนข้างง่าย ไม่มีความยุ่งยากซับซ้อน สามารถสร้างได้โดยใช้ต้นแบบเพียง 1 แผ่นเท่านั้น ในงานวิจัยนี้ได้มีการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าที่มีลักษณะแบบช่องเดี่ยวซึ่งเป็นลวดลายที่ง่ายที่สุดในการวิเคราะห์ข้อมูล และลวดลายขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลที่นิยมนำมาใช้เป็นลวดลายกันอย่างแพร่หลาย มีการนำกระบวนการทางด้านการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาค (micromachining) เข้ามาช่วยในการกัดพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสงให้เป็นแบบแอนไอโซทรอปิกหรือร่องรูปตัวยู (U-shaped) เทคนิคทางด้านการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคที่นำมาประยุกต์ใช้คือการกัดเปียก (wet etching) โดยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ซึ่งเป็นกระบวนการกัดที่มีความปลอดภัยสูงและสามารถจัดเตรียมอุปกรณ์ได้ง่าย จุดประสงค์ที่สำคัญของการอาศัยเทคนิคทางด้านการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาคเข้ามาช่วย คือ ความต้องการที่จะเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงเพื่อส่งผลให้ตัวตรวจวัดแสงสามารถขยายสัญญาณได้มากยิ่งขึ้น และสามารถนำไปใช้ในวงจรที่ใช้รับและขยายสัญญาณทางแสงได้

ในบทนี้จะกล่าวถึงเทคนิคการออกแบบตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู การออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าทั้งสองแบบดังที่กล่าวมาข้างต้นเพื่อใช้ศึกษาผลของการเพิ่มช่องรับแสงที่มีผลต่อลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขั้นตอนของกระบวนการสร้าง กระบวนการเตรียมสารละลายเคมีเพื่อใช้ในกระบวนการกัดแบบเปียก โดยสารละลายเคมีที่ใช้คือสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ เติมด้วยกรดซิลิซิก (silicic acid) และสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (AP) ปริมาณต่างๆ การออกแบบขั้นตอนการศึกษาหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนของกระบวนการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ และทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al ที่มีโครงสร้างแบบ UMSM ต่อไป

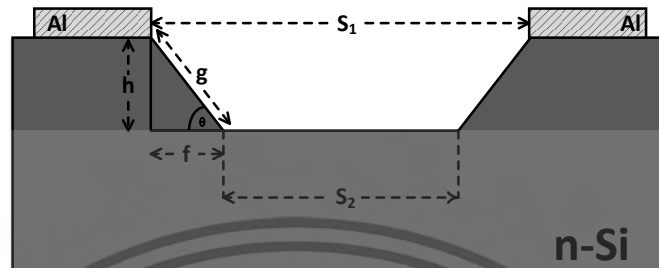
### 3.1 การออกแบบโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู และการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

#### 3.1.1 การออกแบบโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

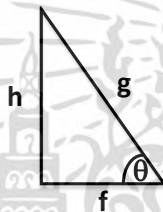
ในการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM จะต้องคำนึงถึงปัจจัยที่สำคัญ 2 ประการ คือ 1.บริเวณพื้นที่รับแสงที่เพิ่มมากขึ้นระหว่างตัวตรวจวัดแสงที่มีโครงสร้างแบบเชิงราบ (planar) และแบบร่องรูปตัวยู (U-shaped) 2.ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (width of depletion region) ที่สามารถครอบคลุมถึงได้

ในกรณีของพื้นที่รับแสงที่เพิ่มมากขึ้นนั้น จะพิจารณาที่บริเวณ  $g$  และ  $f$  เท่านั้น (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) โดย  $g$  จะเป็นบริเวณ ที่เพิ่มขึ้นมาจากลักษณะการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งจะมีค่ามากกว่าบริเวณ  $f$  ซึ่งเป็นลักษณะแบบ planar แต่ในการคำนวณเพื่อหาจำนวนเท่าของพื้นที่รับแสงนั้น จะนำสมการตรีโกณมิติเข้ามาใช้ในการคำนวณ โดยใช้ความลึกของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด ( $h$ ) นำมาคำนวณหาค่า  $f$  และ  $g$  ตามความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3.1) และ (3.2) เมื่อทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้มีความลึกค่าต่างๆ เพื่อหาบริเวณรับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ และบริเวณรับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู พบว่าบริเวณรับแสงแบบร่องรูปตัวยูจะมากกว่าบริเวณรับแสงแบบเชิงราบประมาณ 1.7 เท่า [7-9] โดยทำให้ทราบข้อมูลโดยเบื้องต้นเกี่ยวกับปัจจัยที่สำคัญในการออกแบบตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูดังที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 3.1 ภาพภาคตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู



$$\frac{h}{g} = \sin\theta \quad (3.1)$$

$$\frac{h}{f} = \tan\theta \quad (3.2)$$

โดย กำหนดให้  $h$  คือ ความลึกในการกัด

$f$  คือ บริเวณรับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ

$g$  คือ บริเวณรับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู

$\theta$  คือ มุมเฉาะที่เกิดจากการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก มีค่าเท่ากับ  $54.7^\circ$

ปัจจัยที่สำคัญ ข้อที่ 2. ระยะความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (width of depletion region) ที่สามารถครอบคลุมถึงได้ สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.3

$$W_D = \sqrt{\frac{2\varepsilon_S(V_{bi} - V_A)}{qN_D}} \quad (3.3)$$

กำหนดให้  $W_D$  คือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (width of depletion region)

$\varepsilon_S$  คือ ค่าเปอร์มิตติวิตีในสารกึ่งตัวนำ (permittivity of semiconductor)

$V_{bi}$  คือ กำแพงศักย์ภายใน (built in potential)

$V_A$  คือ แรงดันไบอัส (bias voltage)

$N_D$  คือ ความหนาแน่นอะตอมของสารเจือ (concentration of donor atoms)

$q$  คือ ประจุของอิเล็กตรอน (charge of an electron)

ความสำคัญของบริเวณปลอดพาหะ คือ การขยายตัวบริเวณปลอดพาหะเปรียบเสมือนพื้นที่ในการรับแสงเมื่อแสงตกกระทบที่บริเวณปลอดพาหะจะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Electron-hole Pair) คู่เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการค้นคว้าวิจัยใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

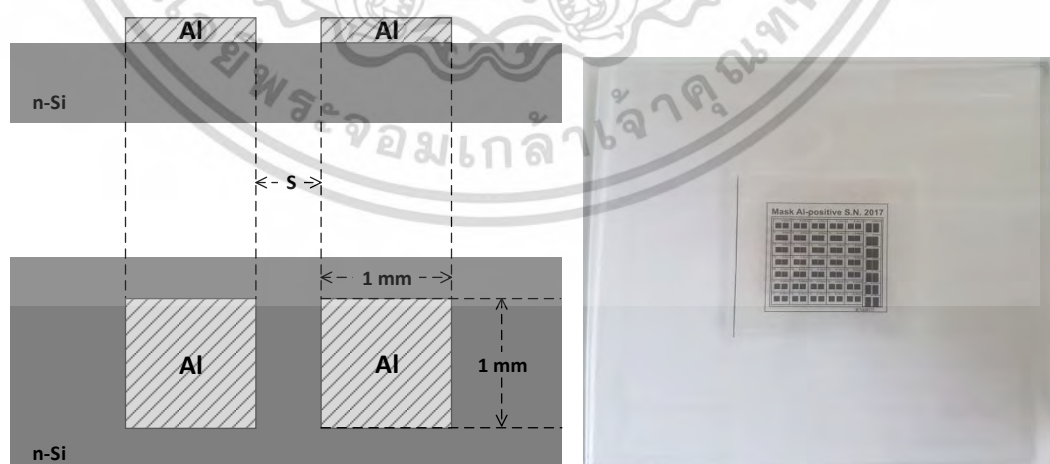
อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดภายในบริเวณปลอดพาหะจะถูกแยกออกโดยสนามไฟฟ้าทำให้ได้กระแสแสงขึ้น แต่เนื่องจากขั้วไฟฟ้าที่สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้มีระยะแบบกว้าง (wide electrode gap) จึงทำให้มีบริเวณนิวทรัล (neutral region) เกิดขึ้นด้วย ตามทฤษฎีของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ตามที่ได้กล่าวในบทที่ 2 จากสมการที่ 3.3 ในงานวิทยานิพนธ์นี้ใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ที่มีค่าสภาพต้านทานไฟฟ้า 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร จะพบว่า มีตัวแปร 4 ตัวที่มีค่าคงที่ คือ  $\epsilon_s$ ,  $V_{bi}$ ,  $N_D$  และ  $q$  ดังนั้นตัวแปรที่สำคัญที่มีผลต่อการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ คือ  $V_A$  เมื่อทำการไบอัสแรงดันไฟฟ้าสูงสุดที่ 10 โวลต์ บริเวณปลอดพาหะจะขยายตัวได้สูงสุดเท่ากับ 5.48 ไมครอน ทำให้สองปัจจัยนี้สัมพันธ์กัน คือ ต่อให้มีการกัดพื้นผิวของซิลิคอนลึกเท่าไรก็ตาม จำนวนเท่าของบริเวณรับแสงมีค่าเท่าเดิมไม่เปลี่ยนแปลงแต่ทั้งนี้ก็ต้องคำนึงถึงการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ ซึ่งถ้าทำการกัดลึกไปเกินกว่า 5.48 ไมครอน ก็จะไม่ผลต่อกระแสแสง นอกจากนี้ทำให้เสียเวลาในขั้นตอนของกระบวนการสร้างชิ้นงานอีกด้วย

### 3.1.2 การออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าแบบช่องเดี่ยวและแบบอินเตอร์ดิจิต [7-9],[12]

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al จัดอยู่กลุ่มประเภทอุปกรณ์ชอตกียไคโอต โดยมีการใช้ขั้วไฟฟ้าเป็นโลหะอะลูมิเนียมสัมผัสกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็น ทำให้เกิดเป็นรอยสัมผัสประเภทชอตกียขึ้น

ในขั้นตอนของการออกแบบลวดลายของขั้วไฟฟ้าแบบต่างๆ ถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะเปรียบเสมือนเป็นการกำหนดลักษณะการทำงานของคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ และจะต้องคำนึงถึงขีดจำกัดของห้องปฏิบัติการอีกด้วย โดยในงานวิจัยนี้ทำการออกแบบลวดลายโดยใช้โปรแกรม CorelDraw X5 Graphic จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ออกแบบไว้ ทำการสแกนด้วยเครื่องเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์มและนำไปติดลงบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับนำไปใช้ในกระบวนการถัดไป

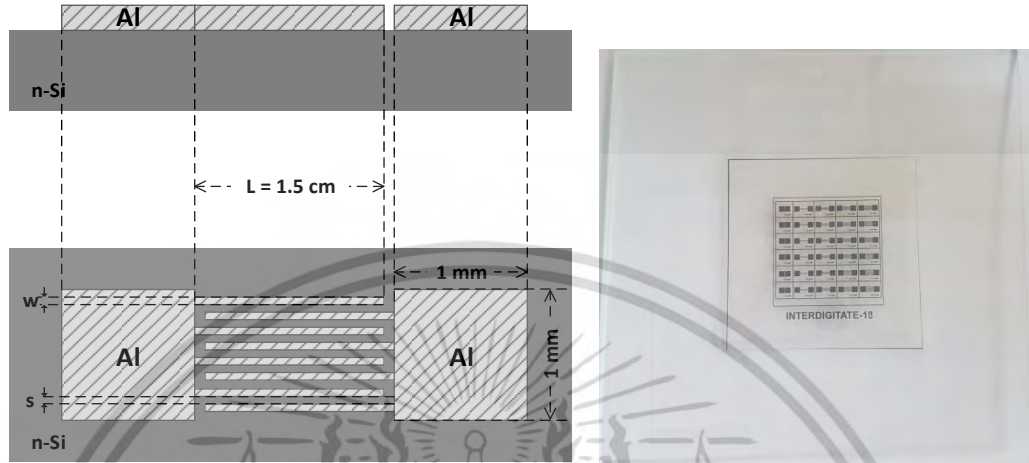
ลวดลายขั้วไฟฟ้าแบบช่องเดี่ยวของตัวตรวจวัดแสง แสดงดังรูปที่ 3.2 ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากับ  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  มีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (s) เท่ากับ 60 ไมโครเมตร



รูปที่ 3.2 ลักษณะลวดลายขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบช่องเดี่ยว และกระจกต้นแบบสำหรับสร้างลวดลายของชั้นอะลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลวดลายขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทของตัวตรวจวัดแสงแสดงดังรูปที่ 3.3 โดยลักษณะของซี่คล้ายกับส้อม (fork shape) หรือนิ้วมือ (finger shape) สลับกัน 2 ด้าน โครงสร้างแบบอินเตอร์ดิจิตเทจะมีตัวแปรที่สำคัญ 3 ตัวแปร คือ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า (S) ความกว้างขั้วไฟฟ้า (W) และความยาวอิเล็กโทรด (L) โดยมีจุดเชื่อมต่อ (bonding pad) ขนาด  $1 \times 1 \text{ mm}^2$  อยู่ด้านข้าง [12]



รูปที่ 3.3 ลักษณะลวดลายขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบอินเตอร์ดิจิตเท และกระจกต้นแบบสำหรับสร้างลวดลายของชั้นอะลูมิเนียม

### 3.2 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ชนิด Al/n-Si/Al คลอบคลุมตั้งแต่กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้าง จนถึง กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีสำหรับการขึ้นลวดลายขั้วไฟฟ้าบนแผ่นซิลิคอน โดยจะดำเนินการสร้างที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) และศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ขั้นตอนของกระบวนการสร้างจะเริ่มต้นหลังจากการออกแบบลวดลายขั้วไฟฟ้าเสร็จเรียบร้อยแล้ว เริ่มจากกระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน กระบวนการสร้างชั้นอะลูมิเนียม กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี จากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการกัดในหัวข้อถัดไป

#### 3.2.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นขั้นตอนที่สำคัญ ใช้เวลานาน และมีค่าใช้จ่ายที่สูงมาก เหตุผลที่การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนใช้เวลานาน คือ ต้องมีการกำจัดคราบไขมัน ฟูนละออง ออกไซด์บางส่วนเกิดจากสภาพแวดล้อมที่เราไม่ต้องการ รวมถึงเศษโลหะหนักต่างๆ โดยสิ่งสกปรกที่กล่าวมาแล้วข้างต้นอาจส่งผลต่อกระบวนการถัดๆ ไป รายละเอียดการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนแสดงดังนี้

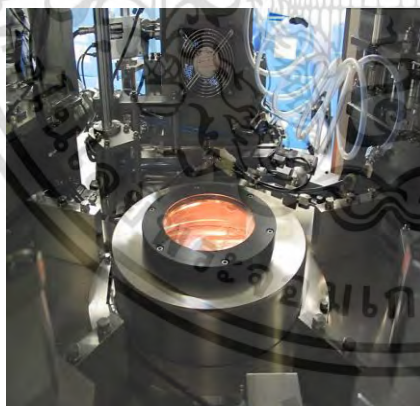
- อัลตราโซนิค (ultrasonic) ในน้ำบริสุทธิ์ (de-ionization water : DI) 2 ครั้ง เป็นเวลาครั้งละ 5 นาที เพื่อกำจัดฟูนละอองต่างๆ
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ต้มในกรดปिरันยา ( $3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$  : piranha) อุณหภูมิ 100-120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที เพื่อขจัดคราบไขมันและเศษโลหะหนักต่างๆ
- ล้างในน้ำ DI 2 ครั้ง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid : HF 5%) เพื่อกำจัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติ (native oxide)
- ล้างในน้ำ DI 2 ครั้ง
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และเข้าสู่กระบวนการสร้างชั้นต่อไป

### 3.2.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม

ในงานวิจัยนี้มีการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมหนาประมาณ 2 ไมครอน ด้วยเทคนิคสเปตเตอริงโดยเครื่องอาร์เอฟ-สเปตเตอริง (RF Sputtering) ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) เพื่อใช้ในการศึกษาอัตราการกัดอะลูมิเนียมและทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ซึ่งจะมีหลักการอย่างง่าย ๆ คือ อาศัยการดิสชาร์จไฟฟ้าทำให้ก๊าซ โดยทั่วไปจะใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) แตกตัวเป็นไอออน (ionization) ภายใต้บรรยากาศความดันต่ำของก๊าซ 1 – 10 ทอร์ ไอออนบวกของก๊าซเฉื่อยจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้าให้มีพลังงานสูง เข้าชนสารเคลือบหรือเป้า (target) ในที่นี้ใช้เป็นอะลูมิเนียม อนุภาคสารเคลือบจะมีการหลุดออกมาเนื่องจากการถ่ายเทโมเมนตัมของอนุภาคที่พุ่งเข้าชน ทำให้อนุภาคอะลูมิเนียมหลุดออกมาเกาะบนแผ่นฐานรองหรือแผ่นซิลิคอน โดยขั้นตอนการสร้างชั้นโลหะด้วยเทคนิคสเปตเตอริงจะทำให้ชั้นโลหะมีความคงทนและมีการยึดเกาะอย่างแน่นหลุดออกจากแผ่นฐานรองได้ค่อนข้างยาก เนื่องมาจาก อนุภาคอะลูมิเนียมที่หลุดออกมาเกาะฐานรองนั้นมีพลังงานค่อนข้างที่จะสูง [41] โดยเครื่องมือที่ใช้ในกระบวนการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม แสดงดังรูปที่ 3.4



(ก)



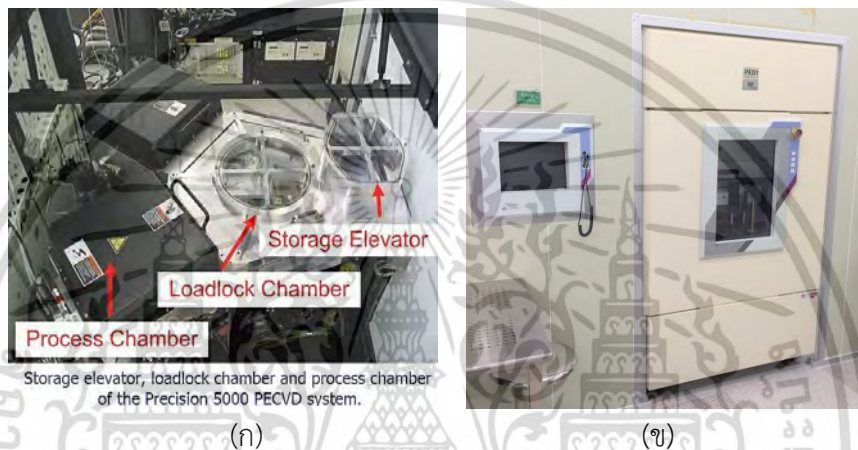
(ข)

**รูปที่ 3.4** เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียม (ก) ลักษณะภายใน และ (ข) ลักษณะภายนอกของเครื่องอาร์เอฟ-สเปตเตอริง ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) [42]

### 3.2.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

การศึกษากระบวนการสร้างตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al มีการสร้างส่วนของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อศึกษาอัตราการกัดอะลูมิเนียม และเป็นส่วนป้องกันการกัดอะลูมิเนียมไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัด ซึ่งในกระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์จะใช้เทคนิค PE-CVD(plasma enhanced chemical vapor deposition) ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) โดยระบบของเทคนิค PE-CVD มีการเพิ่มขั้วไฟฟ้าเข้าไปในตัวเคลือบซึ่งใช้ความดันไอต่ำ ความต่างศักย์ไฟฟ้าที่จ่ายระหว่างขั้วไฟฟ้าจะเหนี่ยวนำให้โมเลกุลของไอเคมีที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้านั้นแตกตัวเป็นพลาสมา เนื่องจากสารตั้งต้นที่แตกตัวและอยู่ในพลาสมามีความสามารถในการทำปฏิกิริยาที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปฏิกิริยาเคมีการสร้างสารเคลือบเกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าปกติมาก ตัวอย่างเช่นการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์สามารถสร้างได้ที่อุณหภูมิเพียง 400 องศาเซลเซียส ในขณะที่กระบวนการ LP-CVD และ AP-CVD ต้องใช้อุณหภูมิสูงถึง 750-900 องศาเซลเซียส [43] โดยเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ แสดงดังรูปที่ 3.5



รูปที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างชั้นฟิล์มบางซิลิคอนไดออกไซด์ (ก) ลักษณะภายใน และ (ข) ลักษณะภายนอก PE-CVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) ที่ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) [44]

### 3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโกราฟี

เป็นกระบวนการที่เริ่มต้นจากการเคลือบสารไวแสง (Photoresist) ลงบนชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์ทั่วทั้งแผ่น โดยใช้วิธีการหยดน้ำยาไวแสงลงบนแผ่นเวเฟอร์ จากนั้นทำการหมุนแผ่นเวเฟอร์เพื่อเกลี่ยให้น้ำยาไวแสงคลุมพื้นที่ทั่วแผ่น สารไวแสงหรือน้ำยาไวแสงนี้จะเปลี่ยนคุณสมบัติทางเคมีถ้าถูกแสง โดยในงานวิจัยนี้จะใช้น้ำยาไวแสงชนิดบวก จากนั้นนำแผ่นที่เคลือบสารไวแสงไปอบ ในเตาอบที่มีอุณหภูมิประมาณ 90 °C เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงยึดติดกับผิวหน้าของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้ดียิ่งขึ้น จะได้แผ่นเวเฟอร์ที่มีชั้นของสารไวแสงเคลือบอยู่ หลังจากนั้นจะนำไปฉายด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผ่านโฟโตมาสก์ (Photo Mask) ไปตกกระทบบนแผ่นเวเฟอร์เพื่อให้เกิดรูปแบบที่ต้องการบนแผ่นเวเฟอร์นี้ หลังจากฉายด้วยแสงอุตราไวโอเล็ตแล้วจะนำแผ่นเวเฟอร์ไปทำการล้างน้ำยา (Developer) เอาส่วนของน้ำยาไวแสงที่ไม่ต้องการออกไป

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกศึกษาลักษณะทางกายภาพ และส่วนที่สองศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ดังนั้นจึงมีการแบ่งการฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ (photo mask) 2 ส่วนแยกออกจากกัน เพื่อใช้ในการศึกษาแต่ละการทดลองดังที่กล่าวข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.4.1 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีเพื่อศึกษาลักษณะทางกายภาพ

- อบแผ่นซิลิคอนเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์ โดยใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 วินาที และ 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (mask aligner) โดยใช้เวลาในการฉายแสง เท่ากับ 25 วินาที
- ชื่นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาชื่นลวดลาย (AZ developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บางส่วนที่ไม่ต้องการออกเพื่อเปิดเป็นพื้นที่สำหรับการกัด โดยใช้กรดกัดออกไซด์หรือบัฟเฟอร์ออกไซด์เอทชิง (buffer oxide etching: BOE) ซึ่งเป็นสารละลายมีส่วนผสม  $\text{HF} : \text{NH}_4\text{F}$  ในอัตราส่วน 1 : 5 ซึ่งจะมีอัตราการกัด 1000 อังสตรอมต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- สกัดชั้นฟิล์มโลหะอะลูมิเนียมบางส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้กรดกัดอะลูมิเนียม (Al etching) มีส่วนผสม  $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{DI}$  ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 อุณหภูมิที่ใช้ในการกัดเท่ากับ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2.30 นาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และเตรียมเข้าสู่กระบวนการกัดต่อไป

### 3.2.4.2 กระบวนการโฟโตลิโกราฟีเพื่อศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้า

- กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออก เนื่องจากสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัดมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างน้อย ทำให้สามารถลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงได้
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบแผ่นซิลิคอนเพื่อไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ 5214E ด้วยเครื่องสปินเนอร์ โดยใช้ความเร็วรอบเท่ากับ 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 วินาที และ 2000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 30 วินาที
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) เพื่อให้หน้ายาไวแสงแห้ง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (mask aligner) โดยใช้เวลาในการฉายแสง เท่ากับ 15 วินาที
- ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer) 2 แก้ว แก้วละ 30วินาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- \* เนื่องจากการสร้างลวดลายขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิฟิเคชันที่มีลักษณะความกว้างของขั้วไฟฟ้า (W) ที่น้อยมาก ดังนั้นจึงเปลี่ยนน้ำยาไวแสงให้มีความหนาเพียงพอ ใช้เวลาในการฉายแสง และเวลาที่ใช้ในการจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลายให้เหมาะสม เพื่อที่แสงจะไม่ทำลายน้ำยาไวแสงออกและสามารถขึ้นลวดลายได้อย่างคมชัด
- อบครั้งที่สอง (post bake) เพื่อให้หน้ายาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
- สกัดชั้นฟิล์มโลหะอะลูมิเนียมบางส่วนที่ไม่ต้องการออก
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ลอกน้ำยาไวแสงออก โดยจุ่มในอะซิโตน เป็นเวลา 1 นาที
- ล้างในน้ำ DI 2 แก้ว
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน และเตรียมเข้าสู่กระบวนการกัดต่อไป

### 3.3 การเตรียมสารเคมีเพื่อใช้ในกระบวนการกัดขึ้นงาน

ในงานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วนคือ ส่วนแรกศึกษาลักษณะทางกายภาพ และส่วนที่สองศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al โดยสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดคือ สารละลายเตตระเมทอิกวอแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เติมด้วยกรดซัลฟิวริกและสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (TMAH + silicic acid + AP : TMAH-Dual Doped) ในการเตรียมสารเคมีจะทำการเติมสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณต่างๆ ลงในสารละลาย TMAH 5 %wt. + Silicic acid 34 g/l ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ส่งผลให้มีอัตราการกัดโลหะอะลูมิเนียมน้อยที่สุด ขั้นตอนการเตรียมสารละลายแสดงดังรูปที่ 3.6 เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการกัด และปริมาณสารละลายที่ใช้ในกระบวนการกัด แสดงดังตารางที่ 3.1 และ 3.2 ตามลำดับ

ตารางที่ 3.1 เงื่อนไขต่างๆที่ใช้ในกระบวนการกัดชิ้นงาน เพื่อหาเงื่อนไขในการสร้างตัวตรวจวัดแสง  
โครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการกัด	รายละเอียด
1. สารตั้งต้น	- TMAH 5 %wt. + Silicic acid 34 g/l
2. ปริมาณสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต	- 7.0, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5 และ 13.0 g/l ตามลำดับ
3. อุณหภูมิที่ใช้ในการกัด [11]	- 80 องศาเซลเซียส
4. ความเร็วรอบในการกวนสาร [11]	- 200 รอบต่อนาที

ตารางที่ 3.2 ปริมาณสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตปริมาณ ที่เติมลงในสารละลาย TMAH 5 %wt. + Silicic acid 34 g/l เพื่อหาเงื่อนไขในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

เงื่อนไขสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (g/l)	ปริมาณสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (g)	ปริมาณสารละลาย TMAH 5 %wt. + Silicic acid 34 g/l (ml)
7.0	1.050	150
9.0	1.350	150
9.5	1.425	150
10.0	1.500	150
10.5	1.575	150
11.0	1.650	150
11.5	1.725	150
13.0	1.950	150

โดยขั้นตอนการเตรียมสารละลายเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดแสดงดังต่อไปนี้

1. ทำการเตรียมซังสารตั้งต้น TMAH 5 %wt. และเติมด้วย silicic acid 34 g/l	
---	--

รูปที่ 3.6 ขั้นตอนของการเตรียมสารเคมีสำหรับใช้ในกระบวนการกัดเพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสง  
โครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

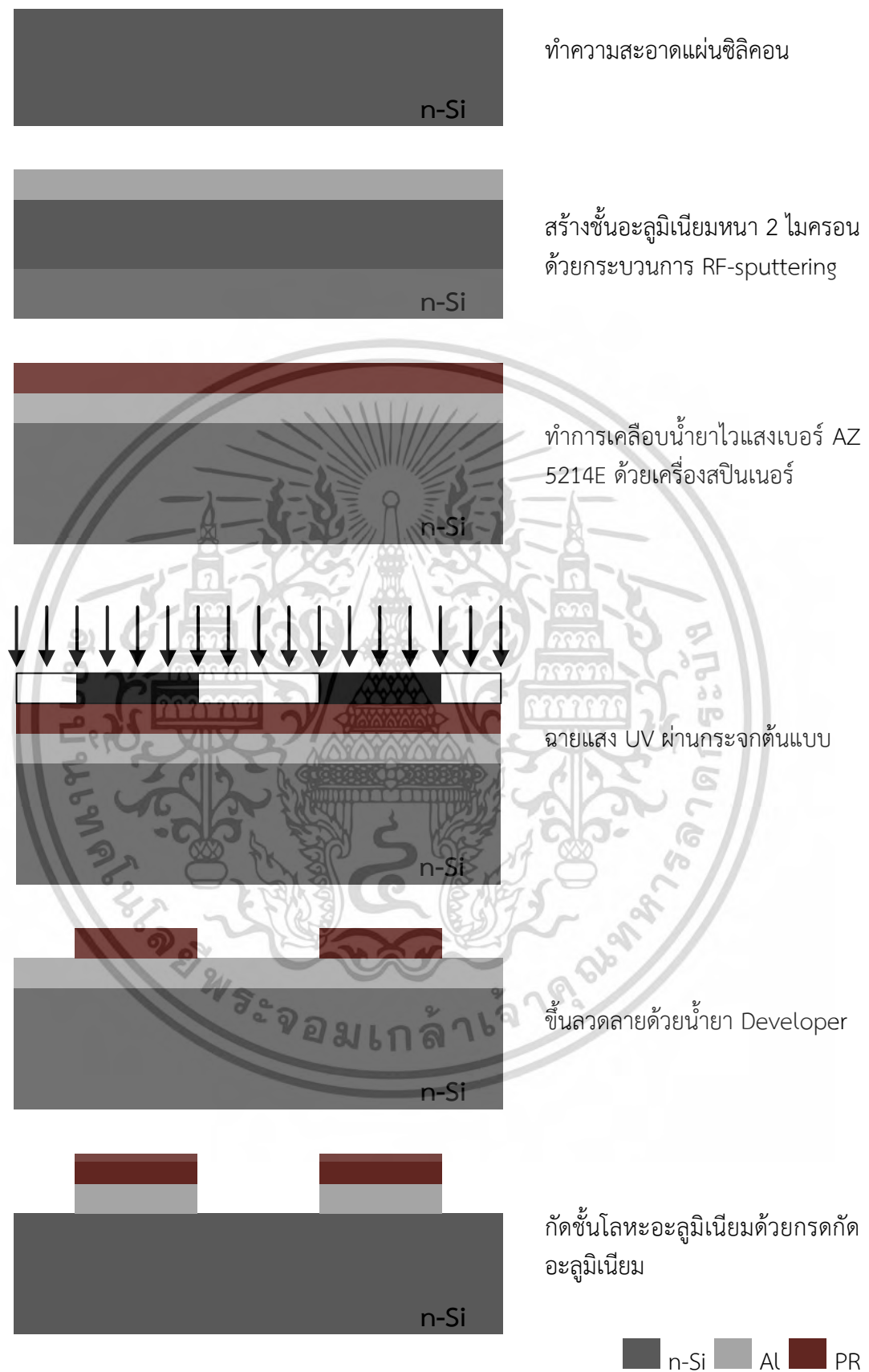
<p>2. ทำการผสมสารละลาย TMAH กับ silicic acid เข้าด้วยกัน โดยเมื่อผสมกันแล้วสารละลายจะมีลักษณะเป็นสีขาวขุ่น</p>	
<p>3. นำสารตั้งต้นมาให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส และรอบการกวนสาร 150 รอบต่อนาที เพื่อให้สารตั้งต้นละลายเป็นเนื้อเดียวกัน โดยสารตั้งต้นที่เป็นเนื้อเดียวกันแล้วจะมีลักษณะสีใสๆ ไม่มีตะกอนตกค้างอยู่</p>	
<p>4. นำสารตั้งต้นมาพักไว้ ให้อุณหภูมิเย็นลง และทำการเติมสาร AP ปริมาณต่างๆ ลงในขวด เพื่อเตรียมไว้ใช้ในกระบวนการทดลอง</p>	
<p>5. ก่อนเริ่มต้นกระบวนการกัด นำสาร AP ที่ได้ทำการเติมลงในสารตั้งต้น มาให้ความร้อนและทำให้เป็นสารละลายเนื้อเดียวกัน โดยเรียกสารนี้ว่า TMAH-Dual Doped และเข้าสู่กระบวนการกัดต่อไป</p>	

รูปที่ 3.6(ต่อ) ขั้นตอนของการเตรียมสารเคมีสำหรับใช้ในกระบวนการกัดเพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

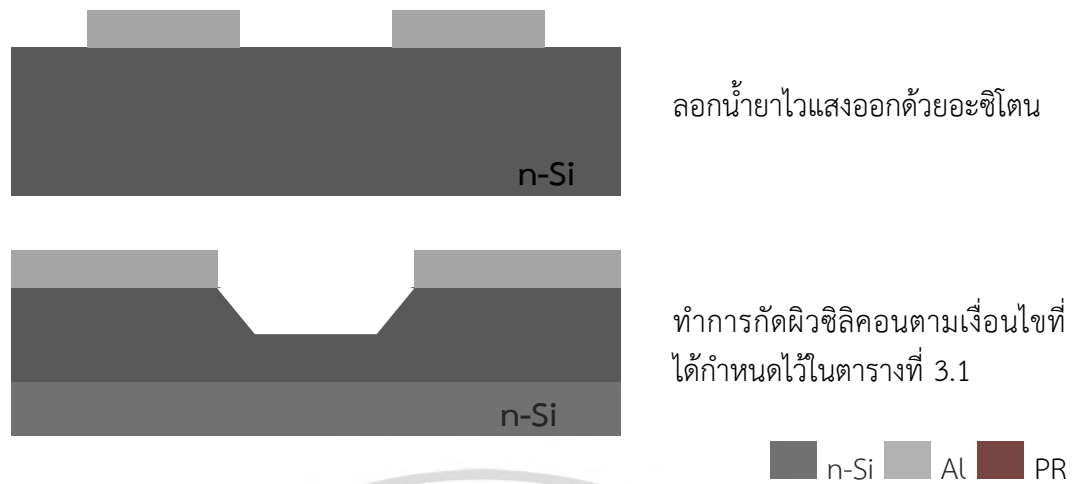
### 3.4 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

จากการสร้างชิ้นงานเพื่อตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ พบว่าในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ในครั้งต่อไป สามารถลดขั้นตอนในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงได้ ซึ่งรายละเอียดกล่าวไว้ในบทที่ 4 โดยกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al แสดงดังรูปที่ 3.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UM5M ชนิด Al/n-Si/Al เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7(ต่อ) กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

### 3.5 กระบวนการซินเตอร์ริง

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al จึงเข้าสู่กระบวนการ ซินเตอร์ริง (sintering process) ซึ่งจะเป็นการให้ความร้อนแก่โลหะ โดยมีจุดประสงค์เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะอะลูมิเนียมกับซิลิคอนมีสมบัติที่ดียิ่งขึ้น และช่วยทำให้ความต้านทานที่รอยสัมผัสมีค่าต่ำลง ซึ่งในงานวิจัยนี้ ทำการซินเตอร์ริงในชั้นบรรยากาศไนโตรเจน โดยกำหนดอัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจนเท่ากับ 1 ลิตรต่อนาที กำหนดอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และใช้เวลาในการซินเตอร์ริง 15 นาที [3] อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการ ซินเตอร์ริงแสดงดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการซินเตอร์ริง

### 3.6 กระบวนการตัดแผ่นและเชื่อมต่อสายไฟ

จากนั้นทำการตัดแผ่นแยกชิ้นงานออกจากกันเพื่อเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบลักษณะทางกายภาพและทำการเชื่อมต่อสายไฟ ซึ่งในการเชื่อมต่อสายไฟนั้นจะใช้กาวเงินนำไฟฟ้าเพื่อใช้ในการยึดติดระหว่างสายไฟเข้ากับเข้ากับจุดเชื่อมต่อ (bonding pad) โดยกาวเงินนำไฟฟ้าที่ใช้จะมีลักษณะเป็นของแข็ง และใช้สารละลายเคมี Butyl Acetate เป็นตัวทำละลาย เพื่อให้กาวเงินเปลี่ยนสถานะจากของแข็งเป็นของเหลว ทำให้สะดวกในการเชื่อมต่อสายไฟ ในการเชื่อมต่อสายไฟมีจุดประสงค์เพื่อ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ใช้สำหรับขั้นตอนการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al อุปกรณ์ที่ใช้ในการตัดแผ่นและเชื่อมต่อสายไฟแสดงดังรูปที่ 3.9



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการตัดแผ่นและเชื่อมต่อสายไฟ (ก) เครื่องตัดแผ่นซิลิคอนเวเฟอร์ (ข) กาวเงินนำไฟฟ้าสำหรับเชื่อมต่อสายไฟเข้ากับจุดเชื่อมต่อ

### 3.7 กระบวนการทดสอบ

#### 3.7.1 การทดสอบลักษณะทางกายภาพ

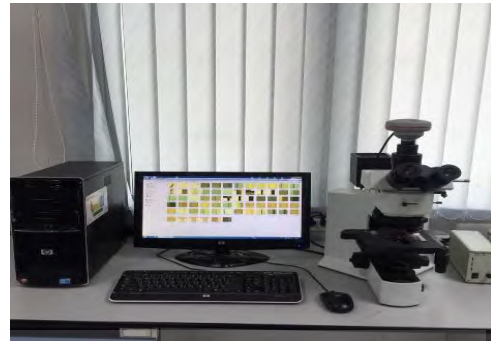
ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างตามเงื่อนไขต่างๆที่ได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 3.1 นำมาตรวจสอบลักษณะทางกายภาพ โดยใช้เครื่อง Tencor P-10 surface profilometer เพื่อตรวจสอบความลึกของซิลิคอน ความหนาของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์และอลูมิเนียมที่ถูกกัด และตรวจสอบความขรุขระ (surface roughness) ของพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัด กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope: OM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดเบื้องต้น กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) เพื่อวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดอย่างละเอียด และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) เพื่อทำการยืนยันข้อมูลลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดว่ามีลักษณะอย่างไร โดยภาพเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะทางกายภาพแสดงดังรูปที่ 3.10

#### 3.7.2 การทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al เมื่อได้รับแสงตกกระทบและไม่ได้รับแสงตกกระทบ

จากนั้นนำตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al มาทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ โดยทำการวัดภายใต้เงื่อนไขให้แสงตกกระทบตัวตรวจวัดแสง ความเข้มแสง 5,000 ถึง 25,000 ลักซ์ ซึ่งมีหลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสงและเงื่อนไขไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยทั้งสองเงื่อนไขมีการจ่ายแรงดันไบอัสเท่ากับ -10 ถึง 10 โวลต์ ทั้งนี้การทดสอบที่กล่าวข้างต้นมีจุดประสงค์ที่แตกต่างกันออกไป ดังที่จะกล่าวในบทที่ 4 และเครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 3.11



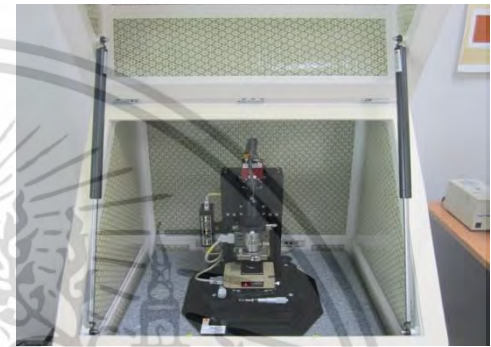
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 3.10 เครื่องมือที่ใช้ในการตรวจสอบลักษณะทางกายภาพของชิ้นงาน

(ก) เครื่อง Tencor P-10 surface profilometer

(ข) เครื่อง Optical Microscope: OM

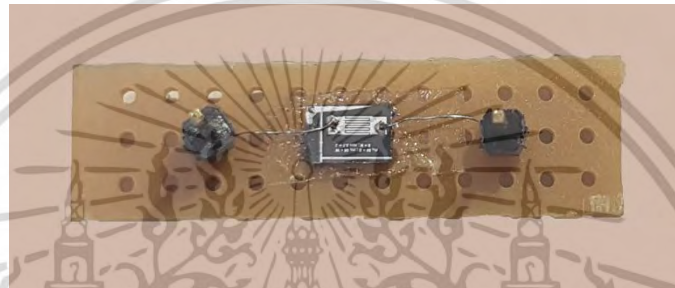
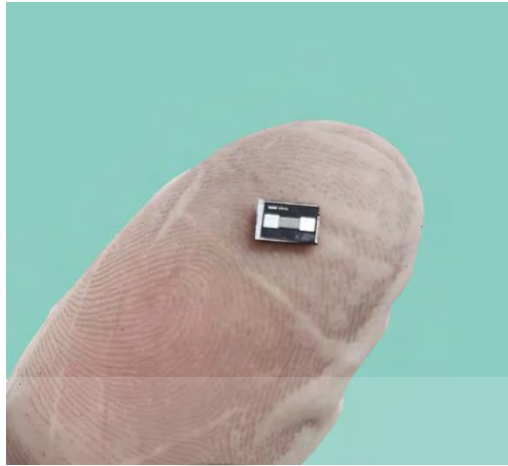
(ค) เครื่อง Scanning Electron Microscope: SEM

(ง) เครื่อง Atomic Force Microscope: AFM



รูปที่ 3.11 เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 ลักษณะตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง UMMSM ชนิด Al/n-Si/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในบทนี้กล่าวถึงผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งส่วนของผลการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ตามลำดับขั้นตอนของการศึกษา โดยในส่วนแรกจะเป็นการศึกษาเงื่อนไขของ สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดที่มีผลต่อลักษณะทางกายภาพเพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมในการสร้างตัว ตรวจจับแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al โดยเงื่อนไขในการทดลองกล่าวรายละเอียดไว้ในบท ที่ 3 และส่วนที่สอง ทำการศึกษาผลกระทบของแสงความเข้มต่างๆ ที่มีต่อลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิท (interdigitate) โดยมีจำนวน ขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2, 4 และ 6 ขั้ว ตามลำดับ มีขนาดความกว้าง ระยะห่าง และความยาวของขั้วไฟฟ้า เท่ากับ 60, 40 และ 1,500 ไมโครเมตร ตามลำดับ ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากงานวิจัยก่อนหน้านี้ [12] จากนั้นทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง MSM แบบ เชิงราบ (planar) และแบบร่องรูปตัวยู (U-shaped) เพื่อศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าที่ เกิดขึ้น

#### 4.1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ที่ ถูกกัด

ผลการทดลองในส่วนนี้ ได้แสดงถึงลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดแบบแอนไอโซ ทropic (anisotropic) โดยการเติมกรดซิลิซิกและสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตลงใน สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ โดยสามารถเรียกได้ว่าเป็นคู่สารเจือของสารละลาย TMAH (TMAH-Dual Doped) โดยในการเติมกรดซิลิซิกและสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟตนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการลดอัตราการกัดของชั้นโลหะอะลูมิเนียม และต้องการให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ ถูกกัดมีความขรุขระน้อยที่สุด เหตุผลที่ต้องการลดอัตราการกัดชั้นโลหะอะลูมิเนียมคือ ใน กระบวนการสร้างตัวตรวจจับแสงแบบร่องรูปตัวยู ได้ทำการสร้างชั้นของซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อทำ หน้าที่เป็นหน้ากักป้องกันการกัดชั้นของโลหะอะลูมิเนียม ดังนั้นถ้าสามารถลดอัตราการกัดของชั้น โลหะอะลูมิเนียมลงได้จะส่งผลให้สามารถลดขั้นตอนในการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลง และเหตุผล ที่ต้องการให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความขรุขระน้อยที่สุดนั้นคือ ทำให้สามารถสร้างชิ้นงานที่มี ลักษณะเหมือนเดิมได้จำนวนมากหรือสามารถทำซ้ำในเงื่อนไขนั้นๆ ได้

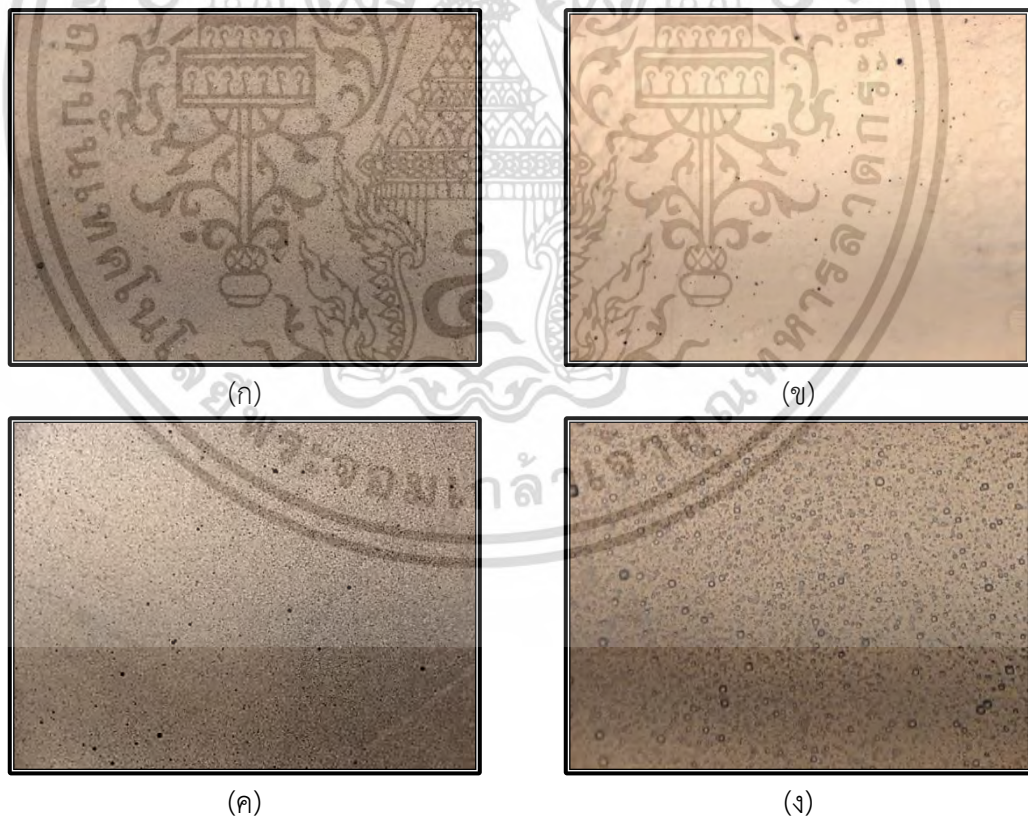
##### 4.1.1 การเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต ลงในกรดซิลิซิกและสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์

เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมของสารตั้งต้น คือ กรดซิลิซิกปริมาณ 34 กรัมต่อลิตร ในสารละลาย เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 5 % โดยน้ำหนัก [35] จึงทำการเติมสารแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate : AP) ปริมาณต่างๆ ดังนี้ 7.0, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5 และ 13.0 กรัมต่อลิตร ซึ่งในกระบวนการกัดจะใช้อุณหภูมิและรอบการกวนสารที่คงที่ ดังนั้นจะมี เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพียงปัจจัยที่เกิดจากปริมาณสาร AP เท่านั้น ที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวและอัตราการกัด จากนั้นทำการศึกษาปัจจัยของสารเคมีที่มีผลต่อลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม และศึกษาอัตราการกัดของซิลิคอน อะลูมิเนียม ซิลิคอนไดออกไซด์ จาก Tencor P-10 surface profilometer ในหัวข้อที่ 4.1.1.1 และ 4.1.1.2 ตามลำดับ

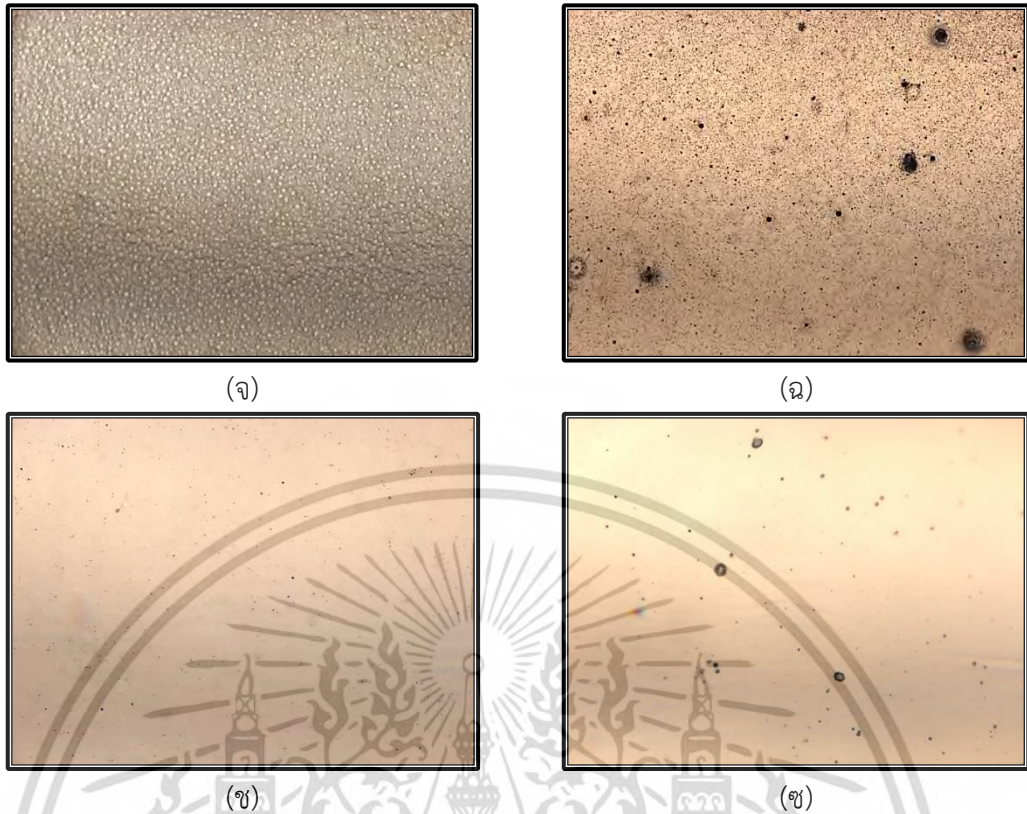
#### 4.1.1.1 การศึกษาลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัด

โดยปกติแล้วในกระบวนการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกโดยสารละลาย TMAH จะเกิดฟองของก๊าซไฮโดรเจนขึ้นในระหว่างการกัด โดยฟองของก๊าซไฮโดรเจนเหล่านี้ อาจจะมีบางส่วนที่มาเกาะบริเวณผิวหน้าของซิลิคอนทำหน้าที่เหมือนส่วนที่ป้องกันการกัดจึงทำให้สารเคมีไม่สามารถกัดบางส่วนเหล่านี้ได้ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการกัดทำให้เห็นพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความขรุขระหรือมีเนินของพีระมิดปรากฏอยู่อย่างกระจัดกระจาย อย่างไรก็ตามเมื่อเติมกรดซิลิซิกลงไปในสารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียว ก็ไม่ได้ส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนเรียบขึ้นแต่อย่างใด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเติมซิลิซิกเพียงอย่างเดียวไม่ได้ส่งผลต่อความเรียบของพื้นผิวแต่จะมีจุดเด่นอยู่ที่อัตราการกัดของวัสดุต่างๆ ที่จะกล่าวในหัวข้อถัดไป ดังนั้นจึงต้องการกำจัดฟองก๊าซไฮโดรเจนเหล่านี้ให้เหลือน้อยลงโดยการเติมสารละลาย AP ลงไป เพื่อศึกษาลักษณะพื้นผิวของซิลิคอน (ซึ่งในครั้งต่อไปจะเรียกว่า TMAH-Dual Doped เพื่อง่ายต่อการเข้าใจ)



รูปที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งกัดโดย TMAH-Dual Doped เงื่อนไขต่างๆ ดังนี้ (ก) 7.0 g/L (ข) 9.0 g/L (ค) 9.5 g/L (ง) 10.0 g/L (จ) 10.5 g/L (ฉ) 11.0 g/L (ช) 11.5 g/L และ (ซ) 13.0 g/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.1(ต่อ) ลักษณะพื้นผิวของชิลิคอนจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ซึ่งกัดโดย TMAH-Dual Doped เจือปนไฮดรอกไซด์ต่างๆ ดังนี้ (ก) 7.0 g/L (ข) 9.0 g/L (ค) 9.5 g/L (ง) 10.0 g/L (จ) 10.5 g/L (ฉ) 11.0 g/L (ช) 11.5 g/L และ (ซ) 13.0 g/L

ในวิทยานิพนธ์นี้การศึกษาลักษณะพื้นผิวของชิลิคอนที่ถูกกัดนั้น มีจุดประสงค์เพื่อต้องการหาเงื่อนไขที่ทำให้พื้นผิวของชิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบที่สุด ซึ่งการควบคุมพื้นผิวให้เรียบนั้นมีข้อดีคือ ทำให้ง่ายต่อการทำซ้ำ ไม่ว่าจะทำกี่ครั้งก็จะทำให้พื้นผิวมีลักษณะดั้งเดิมซึ่งจะแตกต่างจากพื้นผิวที่ขรุขระ และยังคงข้อดีของการกัดอะลูมิเนียมที่น้อยลงอยู่ ขั้นตอนการทดลองในหัวข้อนี้จะใช้เวลาอุณหภูมิ และรอบการกวนสารในการกัดที่เท่ากัน เพื่อลดปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อลักษณะพื้นผิวของชิลิคอน ซึ่งจะช่วยให้ง่ายต่อการวิเคราะห์ผลการทดลอง ลักษณะพื้นผิวของชิลิคอนที่กัดโดยใช้สารเคมี TMAH-Dual Doped เจือปนไฮดรอกไซด์ต่างๆจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope) แสดงดังรูปที่ 4.1

จากการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของชิลิคอนที่ถูกกัดโดย TMAH-Dual Doped พบว่าลักษณะพื้นผิวที่กัดโดยใช้เงื่อนไขที่แตกต่างกันมีลักษณะผิวเฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป โดยที่ การเติม AP ลงไปในสารตั้งต้น 11.5 กรัมต่อลิตร มีความเรียบของพื้นผิวที่เรียบที่สุด อย่างไรก็ตามการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงก็ตรวจสอบความขรุขระของพื้นผิวได้เพียงเบื้องต้นเท่านั้นเพราะหลักการของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงคือ อาศัยแสงตกกระทบลงบนพื้นผิวและสะท้อนเข้าตาผู้สังเกต ดังนั้นถ้าผู้สังเกตเห็นว่าพื้นผิวนั้นมีลักษณะมีดีกว่าปกติ แสดงว่าพื้นผิวมีความขรุขระมากกว่าเงื่อนไขอื่น เพราะพื้นผิวที่ขรุขระมากนั้นสามารถดูดกลืนแสงได้ดีทำให้แสงที่สะท้อนออกมานั้นน้อยกว่าเงื่อนไขอื่นๆ แตกต่างจากพื้นผิวที่เรียบทำให้สามารถสะท้อนแสงได้ดี ทำให้ผู้สังเกตเห็นภาพที่

ค่อนข้างสว่าง และภาพที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงทำให้สามารถสังเกตความขรุขระของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นผิวได้ว่ามีลักษณะเป็นรูปทรงพีระมิด และสามารถวัดขนาดความกว้างหรือความยาวของฐานพีระมิดเพื่อหาขนาดต่างๆของพีระมิดได้ โดยลักษณะและการวัดขนาดของฐานพีระมิดที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงดังรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ตัวอย่างลักษณะรูปทรงและการวัดขนาดของฐานพีระมิดที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

ดังนั้นเมื่อได้ขนาดของฐานพีระมิดที่วัดจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแล้ว สามารถคำนวณหาความสูงของพีระมิดได้จาก สมการของตรีโกณมิติ [45] ดังสมการที่ 3.2 ในบทที่ 3 โดยค่าของความกว้างของฐานและความสูงของพีระมิดที่วัดโดยใช้เงื่อนไขต่างๆแสดงดังตารางที่ 4.1

จากรูปที่ 4.1 เมื่อทำการทดลองโดยใช้เงื่อนไขของการเติมสาร AP ปริมาณ 7.0, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5 และ 13.0 กรัมต่อลิตร ลงในสารตั้งต้น พบว่า การเติมสาร AP ปริมาณ 11.5 กรัมต่อลิตร จะส่งผลให้พื้นผิวค่อนข้างเรียบ และมีลักษณะเนินของพีระมิดปรากฏอยู่เพียงเล็กน้อยเท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากเงื่อนไขอื่นซึ่งพบว่า ลักษณะของผิวมีความขรุขระ และมีพีระมิดขนาดใหญ่กระจัดกระจายอยู่ และเมื่อตรวจสอบข้อมูลที่ได้จากตารางที่ 4.1 จะพบว่าในเงื่อนไขที่ทำการเติมสาร AP ปริมาณ 11.5 กรัมต่อลิตร มีขนาดความกว้างของฐาน และความสูงของพีระมิดน้อยที่สุดประมาณ 1.00 และ 1.75 ไมโครเมตร ตามลำดับ และในเงื่อนไขของการเติมสาร AP ปริมาณ 7.00 กรัมต่อลิตร จะมีขนาดความกว้างของฐานและความสูงของพีระมิดมากที่สุดประมาณ 3.20 และ 5.61 ไมโครเมตร ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงยังไม่สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนว่าเงื่อนไขไหนส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบมากกว่ากัน เนื่องมาจากการวัดขนาดของพีระมิดที่ได้มาจากรูปที่ 4.1 เป็นเพียงข้อมูลที่ผู้สังเกตทำการเลือกที่จะวัดหาขนาดของพีระมิดในพื้นที่นั้นๆเท่านั้น ดังนั้นเมื่อสังเกตจากรูปที่ 4.1 ในเงื่อนไขที่ทำให้เกิดพีระมิดมีขนาดใหญ่ขึ้นนั้นก็อาจจะไม่ได้ส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระมากกว่าในเงื่อนไขอื่นๆ

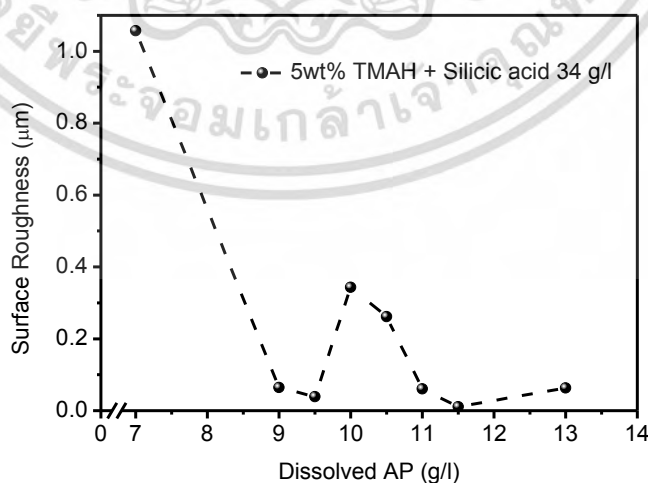
ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบความขรุขระพื้นผิวเพิ่มเติมเพื่อทำการยืนยันข้อมูล โดยใช้ step profilometer ซึ่งการวัดความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดโดยวิธีนี้จะได้ออกมาเป็นค่าตัวเลขแสดงความขรุขระของพื้นผิว ซึ่งความขรุขระของพื้นผิวจะวัดจากจุดต่ำสุดเปรียบเทียบกับจุดสูงสุดในหนึ่งพื้นที่ที่ทำการตรวจสอบ แสดงดังรูปที่ 4.3

ในรูปที่ 4.3 พบว่าลักษณะกราฟแสดงความขรุขระของพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัด โดยเงื่อนไขต่างๆ พบว่ากราฟที่ได้มีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยเงื่อนไขการเติม AP ที่ส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มากที่สุด คือ การเติม AP ปริมาณ 7.0 กรัมต่อลิตร โดยมีค่าประมาณ 1.057 ไมโครเมตร แต่ทั้งนี้เมื่อสังเกตกราฟในรูปที่ 4.3 ข้อมูลที่ได้จะมีจุดต่ำสุดที่ใกล้เคียงกันอยู่สองช่วง โดยช่วงแรกคือ การเติม AP ปริมาณ 9.5 กรัมต่อลิตร ทำให้พื้นผิวของซิลิคอนมีความขรุขระประมาณ 0.0391 ไมโครเมตร และช่วงที่สองคือการเติม AP ปริมาณ 11.5 กรัมต่อลิตร พื้นผิวของซิลิคอนจะมีความขรุขระประมาณ 0.0111 ไมโครเมตร โดยเหตุผลที่ทำการเรียกความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดโดยสาร AP ในเงื่อนไขต่างๆ เป็นช่วงๆ นั้น คือ เมื่อทำการเติมสาร AP ค่าหนึ่งจะทำให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีค่าที่ค่อนข้างสูง แต่เมื่อทำการเติมปริมาณสาร AP เพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้พื้นผิวมีความเรียบขึ้นและเรียบที่สุดที่การเติมสาร AP ปริมาณหนึ่งเท่านั้นและหลังจากนั้นการเติมสาร AP ที่มากขึ้นจะทำให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความขรุขระเพิ่มขึ้นโดยเป็นลักษณะแบบนี้อยู่ 2 ช่วง ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ข้อมูลขนาดความกว้างฐาน และความสูงของพีระมิดโดยเฉลี่ย ที่ทำการทดลองโดยใช้ปริมาณสาร AP ที่แตกต่างกัน

ปริมาณสาร AP ที่เติมลงในสารตั้งต้น (g/l)	ความกว้างของฐานพีระมิดโดยเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )	ความสูงของพีระมิดโดยเฉลี่ย ( $\mu\text{m}$ )
7.0	3.20	5.61
9.0	1.90	3.33
9.5	2.45	4.29
10.0	1.70	2.98
10.5	1.35	2.37
11.0	1.35	2.37
11.5	1.00	1.75
13.0	1.90	3.33

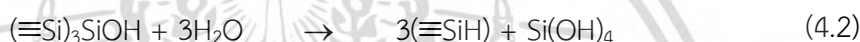
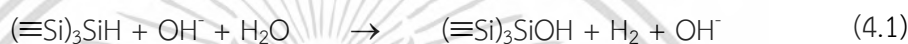


รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดกับปริมาณสาร AP ในเงื่อนไขต่างๆ ที่ทำการเติมลงในสารตั้งต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สาเหตุที่กราฟที่ได้มีลักษณะเป็น 2 ช่วง คือ เนื่องจากการทดลอง มีการกำหนดปริมาณสารตั้งต้นค่าหนึ่งเท่านั้น จึงทำให้ปริมาณสาร AP ที่ทำการเติมลงไป อาจเหมาะสมเพียงสำหรับซิลิซิก 34 กรัมต่อลิตร แต่ช่วงอื่นที่เปลี่ยนแปลงไป อาจเหมาะสมกับปริมาณสารตั้งต้นอีกค่าหนึ่งก็ได้ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากการวัดด้วย step profilometer สามารถยืนยันได้อย่างชัดเจนว่า การเติมสาร AP ปริมาณ 11.5 กรัมต่อลิตร ลงในสารตั้งต้น จะส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนมีความขรุขระน้อยที่สุด ประมาณ 0.0111 ไมโครเมตร

โดยสาเหตุที่ทำให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบหรือมีความขรุขระน้อยลง นั้นคือเกิดมาจากปฏิกิริยาเคมีของสารละลายแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (AP :  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) ในสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ที่มีต่อพื้นผิวซิลิคอน ซึ่งสารละลาย AP จะทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดส์ oxidizing agent โดยตัวออกซิไดส์ จะมีความหมายคือ เป็นตัวที่ทำหน้าที่รับอิเล็กตรอน [40],[46]



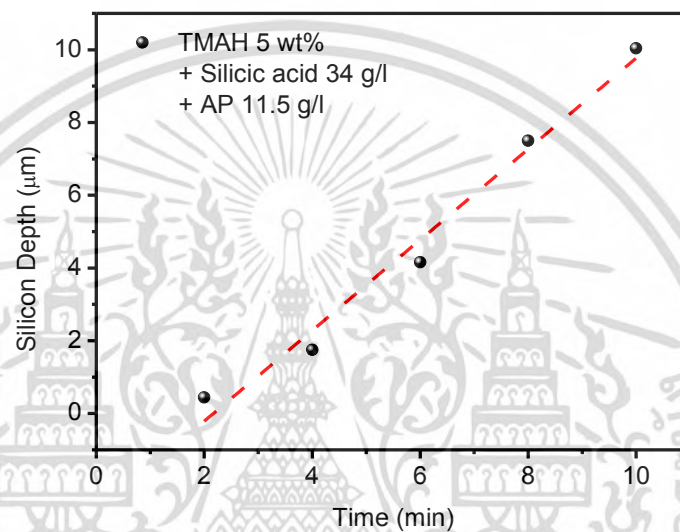
จากปฏิกิริยาเคมีในสมการเคมีที่ 4.1 และ 4.2 พบว่าในสารละลาย TMAH ระหว่างกระบวนการกัดจะเกิดปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนขึ้นจำนวนมาก และเมื่อทำการเติมปริมาณสารละลาย AP ฟองก๊าซไฮโดรเจนเหล่านี้สามารถลอยไปได้โดยการทำปฏิกิริยากับ ไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) และโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ดังสมการที่ 4.1 ถัดจากนั้น  $(\equiv\text{Si})_3\text{SiOH}$  ที่ได้จากสมการที่ 4.1 จะทำปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องกับโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์คือ หมูไฮดรตของกรดซิลิซิก ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) ดังสมการที่ 4.2 โดยปกติจะพบว่าไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จะทำหน้าที่เหมือนตัวเร่งปฏิกิริยา แต่จะลดพลังงานการกระตุ้นลงสำหรับในการแทนที่ของไฮโดรเจน ซึ่งกล่าวได้ว่าเมื่อเติม AP ลงไป โดย AP จะมีสมบัติเป็นเบส จึงทำให้เพิ่มปริมาณไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) ให้กับระบบ จึงเกิดการแทนที่ของไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) ทำให้เกิดการแตกตัวเป็นฟองก๊าซไฮโดรเจนไปเกาะบนพื้นผิวได้น้อยลง และไฮดรอกซิลไอออน ( $\text{OH}^-$ ) จะลดลงกลายเป็น  $\text{Si}(\text{OH})_4$  ซึ่งจะเกิดการรวมตัวกับน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ต่อไป และพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดจะเรียบที่สุดเมื่อทำการเติมสารละลาย AP ปริมาณ 11.5 กรัมต่อลิตร แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการเติมสารละลาย AP ลงไปในสารตั้งต้น จะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบขึ้น และการเติมกรดซิลิซิกจะเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้มีการกัดอะลูมิเนียมที่ช้าลง [47]

ดังนั้น ในงานวิจัยจึงสรุปได้ว่าสมควรที่จะนำเงื่อนไข การเติมสารละลาย AP ปริมาณ 11.5 กรัมต่อลิตร ที่เติมลงในกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l และสารละลาย TMAH % โดยน้ำหนัก มาใช้เป็น TMAH-Dual Doped เพื่อหาอัตราการกัดของอะลูมิเนียม ซิลิคอนไดออกไซด์ และซิลิคอนในหัวข้อถัดไป

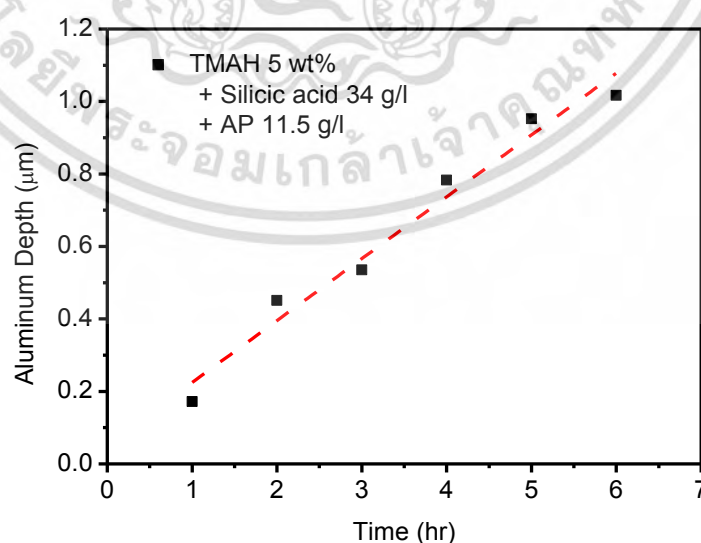
#### 4.1.1.2 การศึกษาอัตราการกัดซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษ้อัตราการกัดของ TMAH-Dual Doped ในการศึกษ้อัตราการกัดของซิลิคอน จะใช้เวลา 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที ตามลำดับ [11] โดยในส่วนของการหาอัตราการกัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่โดยไม่ผ่านการอนุมัติฯ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ พบว่าเนื่องจากการกัดโดยการเติมกรดซิลิซิก 34 กรัมต่อลิตร ลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก เพียงอย่างเดียวจะมีอัตราการกัดของ อะลูมิเนียม และซิลิคอน ไดออกไซด์ที่ค่อนข้างช้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงทำการกัดอะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์เป็นเวลา 1, 2, 3, 4 และ 5 ชั่วโมง ตามลำดับ [11] เพื่อศึกษาปริมาณของอะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกกัด ในการวิเคราะห์ข้อมูลการกัด จะตรวจสอบความลึกของวัสดุที่ถูกกัดดังกล่าวข้างต้นโดยใช้เครื่อง Tencor P-10 surface profilometer โดยกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด โดยสาร TMAH-Dual Doped แสดงดังรูปที่ 4.4, 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ

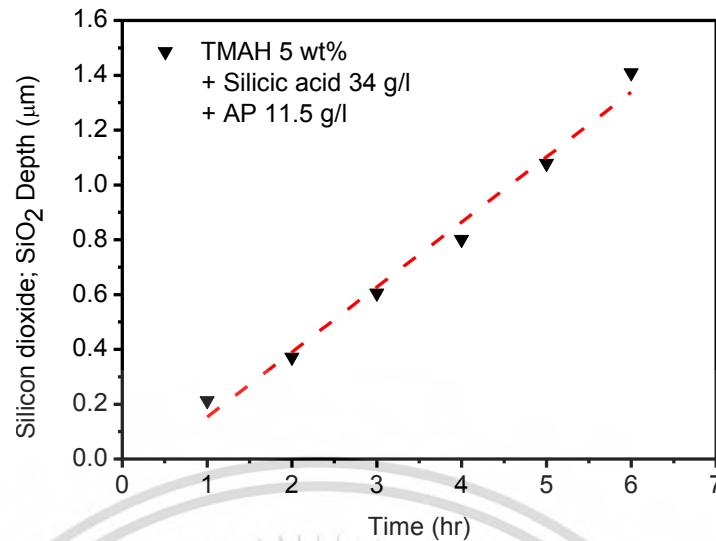


รูปที่ 4.4 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของซิลิคอนที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped



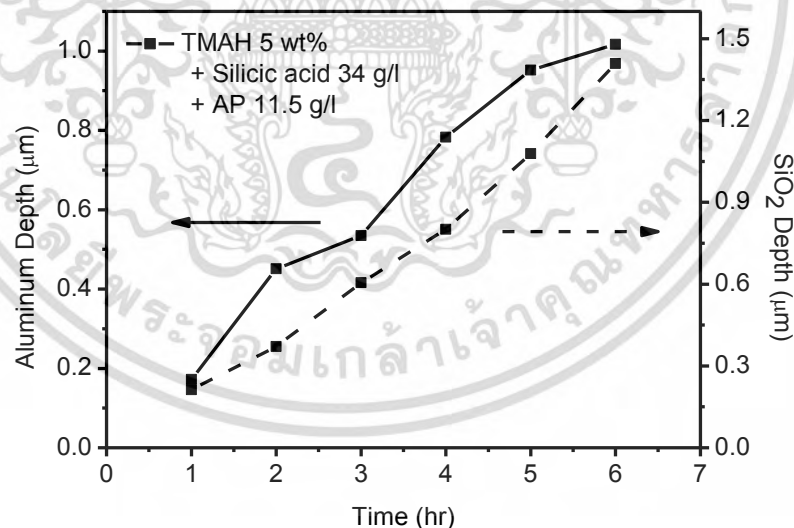
รูปที่ 4.5 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของอะลูมิเนียมที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างความลึกของซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped

ในรูปที่ 4.4 พบว่าเมื่อใช้เวลาในการกัดเพิ่มขึ้นส่งผลให้สามารถกัดซิลิคอนได้มากขึ้น ลักษณะกราฟที่ได้จะเป็นลักษณะเชิงเส้นและข้อมูลที่ได้แทบจะอยู่บนเส้นตรงทุกข้อมูล ดังนั้นจึงสามารถหาอัตราการกัดของซิลิคอนได้จากสมการเส้นตรง  $y = mx + c$  โดยจะได้อัตราการกัดของซิลิคอนที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped เท่ากับ 1.25 ไมโครเมตรต่อนาที



รูปที่ 4.7 การเปรียบเทียบระหว่างความลึกของอะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ที่ถูกกัดกับเวลาที่ใช้ในการกัด ที่กัดโดยสาร TMAH-Dual Doped

จากรูปที่ 4.5 และ 4.6 ซึ่งเป็นการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ โดยสาร TMAH-Dual Doped ลักษณะกราฟมีลักษณะเป็นเชิงเส้นเช่นเดียวกัน และรูปที่ 4.7 เป็นกราฟแสดงการเปรียบเทียบความสามารถในการกัดอะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งใช้เวลาในการกัดเท่าๆกัน เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยจากกราฟที่เป็นลักษณะเชิงเส้น และเป็นเส้นตรงจึงสามารถหาอัตราการกัดของอะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.17 และ 0.23 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในห้องปฏิบัติการได้มีการศึกษาหาอัตราการกัดซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กัดโดยใช้เงื่อนไขของสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก โดยที่ไม่มีการเติมสารใดๆ มีการเติมกรดซิลิซิก 34 กรัมต่อลิตรเพียงอย่างเดียว และเงื่อนไขของสารละลาย TMAH-Dual Doped โดยอัตราการกัดของวัสดุต่างๆ ที่กัดโดยสารละลายเคมีที่แตกต่างกัน จะมีอัตราการกัดที่แตกต่างกัน โดยพบว่าสารละลาย TMAH-Dual Doped มีอัตราการกัดของซิลิคอนมากกว่า และอัตราการกัดอะลูมิเนียม ซิลิคอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างน้อยกว่าการกัดโดยใช้สารละลายเคมีตัวอื่นๆ โดยความสามารถในการกัดวัสดุต่างๆ ถือว่าเป็นข้อดีที่นอกเหนือจากการทำให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบของสารละลาย TMAH-Dual Doped

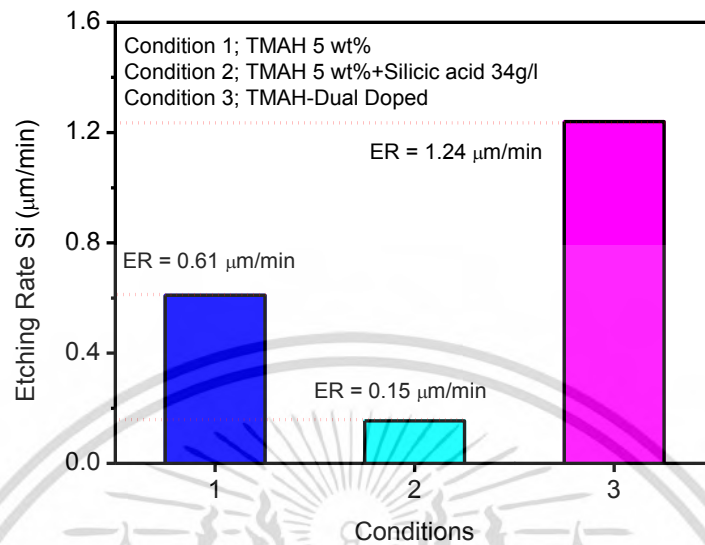
เหตุผลที่ทำให้สารละลาย TMAH-Dual Doped มีจุดเด่นทางด้านอัตราการกัดวัสดุต่างๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้ โดยในกระบวนการกัดจะเกิดปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นกับอะลูมิเนียม [47] ดังสมการเคมีที่ 4.3



จากสมการเคมีที่ 4.3 พบว่าเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างกรดซิลิซิกและอะลูมิเนียม ซึ่งจะมีผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมาจากปฏิกิริยาเคมีนี้คือ  $\text{Al}_2(\text{SiO}_3)_3$  โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นมานี้ไม่สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นในระหว่างกระบวนการกัดผลิตภัณฑ์นี้จะทำหน้าที่เหมือนชั้นหน้ากปกป้องกันการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ จึงส่งผลให้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ที่ค่อนข้างน้อยกว่าการกัดโดยใช้สารละลายเคมีตัวอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าในสารละลาย TMAH-Dual Doped กรดซิลิซิกเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลให้เกิดอัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ที่น้อยลง เมื่อทำการเติมสารละลาย AP ลงไปในสารตั้งต้น โดยจะพบว่าออกซิเจนจากสารละลาย AP มีมากกว่าจากน้ำ ดังนั้น AP จึงเป็นตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญในกระบวนการกัดซิลิคอนจึงส่งผลให้มีอัตราการกัดซิลิคอนที่ค่อนข้างสูง ในปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นจะเกิดอย่างต่อเนื่องก็ต่อเมื่อสารละลาย AP และความเข้มข้นหมู่ไฮดรอกซิลของกรดซิลิซิก ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) มีปริมาณที่มากพอ ถ้าปริมาณสารที่กล่าวข้างต้นมีปริมาณและความเข้มข้นมากพอ จะสามารถทำให้ลดจำนวนโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ลงได้ สาเหตุที่ต้องลดจำนวนโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ก็เพราะว่าโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) ที่มากเกินไปจะส่งผลให้เกิดอัตราการกัดของซิลิคอนที่ลดลง โดยปริมาณสารละลาย AP ที่เติมเข้าไปในสารตั้งต้น มีความสามารถในการดูดซับน้ำที่ดี จึงสามารถแยกโมเลกุลของน้ำ ( $\text{H}_2\text{O}$ ) บางส่วนออกจากหมู่ไฮดรอกซิลของกรดซิลิซิก ( $\text{Si}(\text{OH})_4$ ) (อาจเป็นสาเหตุทำให้มีตะกอนเกิดขึ้นได้) ทำให้เกิดปฏิกิริยาที่ผิวซิลิคอนได้มากขึ้นจึงส่งผลทำให้มีอัตราการกัดของซิลิคอนที่เพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้การกัดโดยใช้เงื่อนไขของสารเคมี TMAH-Dual Doped มีอัตราการกัดซิลิคอนมากกว่าการกัดโดยใช้สารเคมีอื่นๆ [46-47]

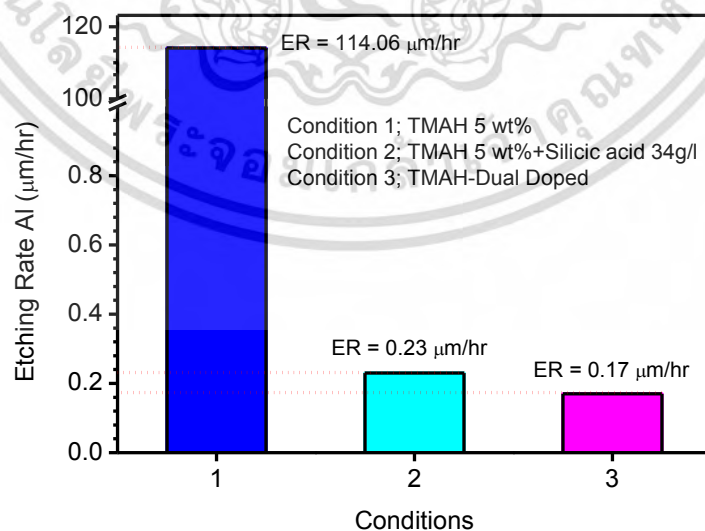
ดังนั้นเมื่อกัดโดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped จะส่งผลให้มีอัตราการกัดของซิลิคอน เท่ากับ 1.25 ไมโครเมตรต่อนาที่ อัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.17 และ 0.23 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง และด้วยอัตราการกัดของอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างน้อยทำให้สามารถลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อเป็นหน้ากปกป้องกันการกัดลงได้ โดยกราฟแผนภูมิแท่ง

แสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ เมื่อใช้สารเคมีที่แตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4.8, 4.9, 4.10 และตารางที่ 4.2



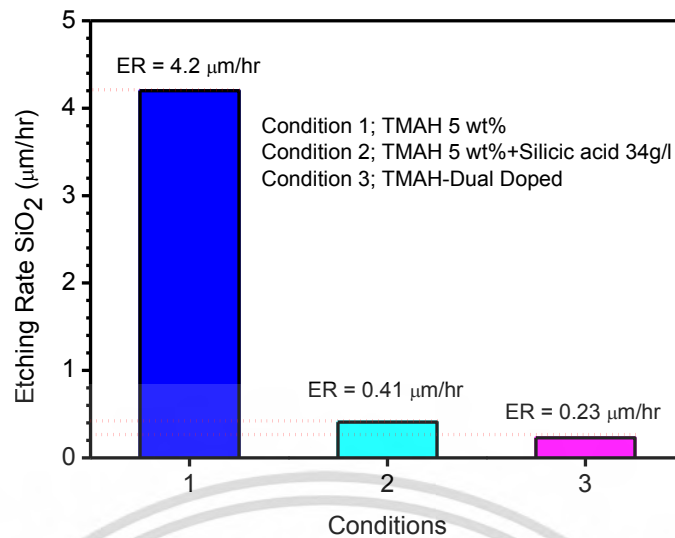
รูปที่ 4.8 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดซิลิคอนที่กัดโดยใช้สารละลายที่แตกต่างกัน

จากรูปที่ 4.8 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าอัตราการกัดซิลิคอน เมื่อมีการใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped จะมีอัตราการกัดซิลิคอนที่ค่อนข้างสูง ซึ่งเป็นข้อดีในกระบวนการกัด เนื่องจากในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงในงานวิจัยนี้ไม่จำเป็นต้องทำการกัดพื้นผิวของซิลิคอนที่ลึกมาก (อธิบายในหัวข้อที่ 4.3 ในบทที่ 4) ดังนั้นด้วยอัตราการกัดซิลิคอนที่ค่อนข้างรวดเร็วจึงทำให้สามารถลดระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัดลงได้



รูปที่ 4.9 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่กัดโดยใช้สารละลายเคมีที่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 แผนภูมิแท่งแสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดซิลิคอนไดออกไซด์ที่กัดโดยใช้สารละลายเคมีที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 4.2 ข้อมูลอัตราการกัดของซิลิคอน อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์ ที่กัดโดยสารละลายเคมีที่แตกต่างกัน

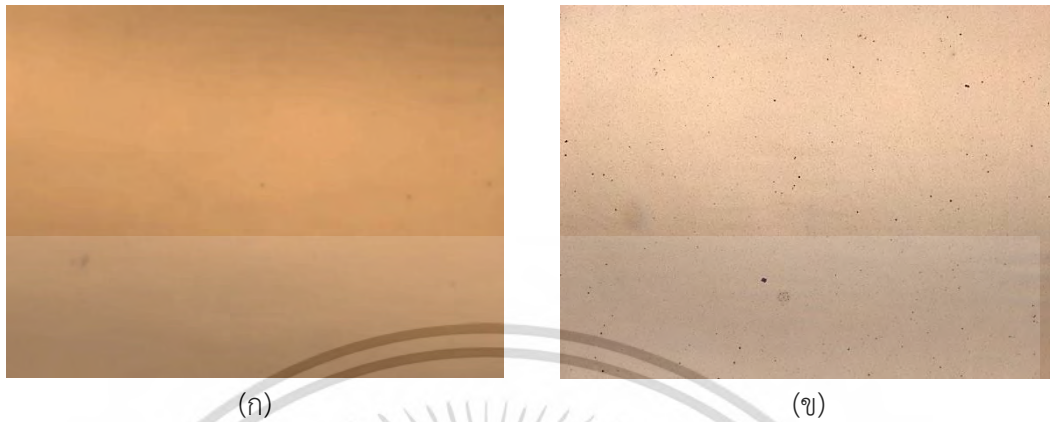
เงื่อนไขที่ใช้ในกระบวนการกัด	อัตราการกัดของซิลิคอน (µm / min)	อัตราการกัดของอะลูมิเนียม (µm / hr)	อัตราการกัดของซิลิคอนไดออกไซด์ (µm / hr)
TMAH 5 wt%	0.61	114.06	4.20
TMAH 5 wt% + Silicic acid 34 g/l	0.15	0.23	0.41
TMAH-Dual Doped	1.24	0.17	0.23

#### 4.1.2 การเปรียบเทียบลักษณะทาบกายภาพของซิลิคอนที่ถูกกัดระหว่างการใส่สารละลายเตตระเมทริวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เติมด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ และ TMAH-Dual Doped

จากงานวิจัยที่ผ่านมาในห้องปฏิบัติการมีการศึกษาลักษณะทาบกายภาพของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดโดยการใช้สารละลายเตตระเมทริวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ที่เติมด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ พบว่า ในเงื่อนไขของการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ 30 % โดยปริมาตร ลงในสารละลายเตตระเมทริวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 20 % โดยน้ำหนัก จะส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบที่ค่อนข้างใกล้เคียงกับการกัดโดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped [10-11] ดังนั้นจึงทำการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด และกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม แสดงดังรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13 ตามลำดับ



รูปที่ 4.11 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแสดงการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของซีลิกอนที่ถูกกัดโดยใช้สารละลาย (ก) TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol และ (ข) TMAH-Dual Doped ที่กำลังขยาย 500 เท่า



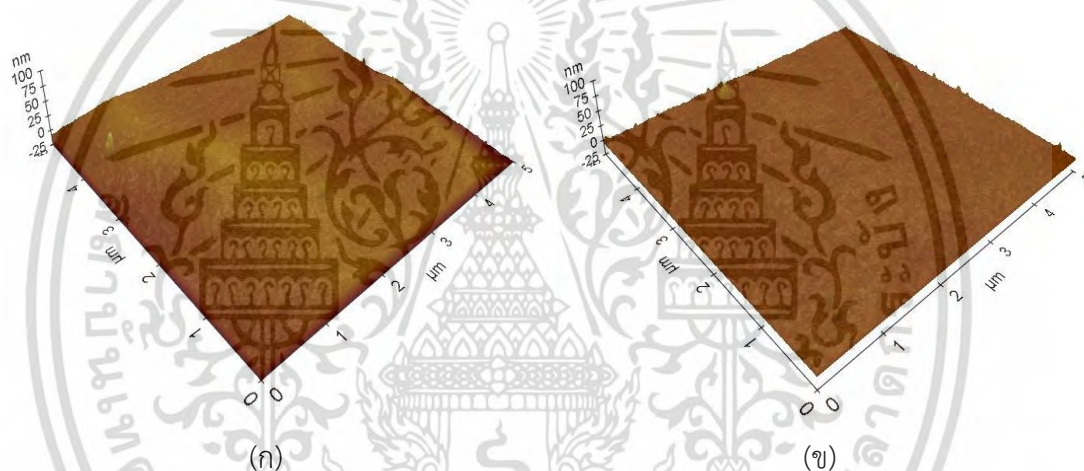
รูปที่ 4.12 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของซีลิกอนที่ถูกกัดโดยใช้สารละลาย (ก) TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol และ (ข) TMAH-Dual Doped ที่กำลังขยาย 100,000 เท่า

โดยการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของซีลิกอนที่ถูกกัดนั้น พบว่าเมื่อตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ดังรูปที่ 4.11 นั้นลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบแต่ไม่สามารถระบุได้ว่ามีความเรียบอยู่ในระดับเท่าไร เนื่องจากการใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงอาศัยเพียงแสงตกกระทบลงบนชิ้นงานและสะท้อนเข้าตาผู้สังเกต ดังนั้นเรื่องกำลังขยายจึงกลายเป็นข้อจำกัดที่สำคัญของการตรวจสอบลักษณะพื้นผิว จึงนำชิ้นงานของทั้งสองเงื่อนไขตรวจสอบลักษณะพื้นผิวซีลิกอนที่ถูกกัดโดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเพื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวที่รายละเอียดยิ่งขึ้น โดยหลักการของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่แตกต่างจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง คือ ใช้ลำของอนุภาคอิเล็กตรอนที่มีพลังงานสูงในการตรวจสอบพื้นผิวแทนการใช้แสงธรรมดา เนื่องจากความยาวของคลื่นอิเล็กตรอนนั้นสั้นกว่าความยาวคลื่นแสงถึงประมาณ 100,000 เท่า ทำให้กล้อง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ การค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จุลทรรศน์อิเล็กตรอนสามารถให้ประสิทธิภาพของกำลังขยาย และการแจกแจงรายละเอียดได้เหนือกว่ากล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง โดยสามารถแยกรายละเอียดของวัตถุที่เล็กขนาด 10 อังสตรอม หรือ 0.1 นาโนเมตร [48] ดังนั้นเมื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวแล้วจึงพบว่าพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขทั้งสองมีความเรียบอยู่ในระดับเดียวกัน จึงทำการยืนยันข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่ถูกต้องและแม่นยำ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM)

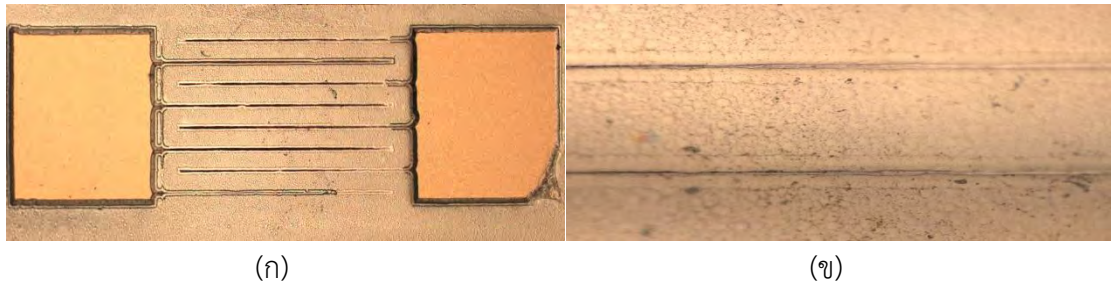
ในรูปที่ 4.13 เมื่อตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัด โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม ซึ่งจะอาศัยหลักการ ใช้หัวอ่านที่มีลักษณะเป็นเข็มที่มีขนาดเล็กประมาณ 10 นาโนเมตร ซึ่งเป็นตัววัดแรงดึงดูดหรือแรงผลักของอะตอมระหว่างหัวเข็มกับพื้นผิวของชิ้นงานเพื่อนำมาสร้างเป็นภาพ ในการตรวจสอบจะทำการสแกนภายในหนึ่งพื้นที่ที่ต้องการตรวจสอบเท่านั้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการตรวจสอบโดยกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมมีความละเอียดที่ค่อนข้างสูง สามารถยืนยันได้ว่า พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในช่วงระดับไม่เกิน 5-10 นาโนเมตร



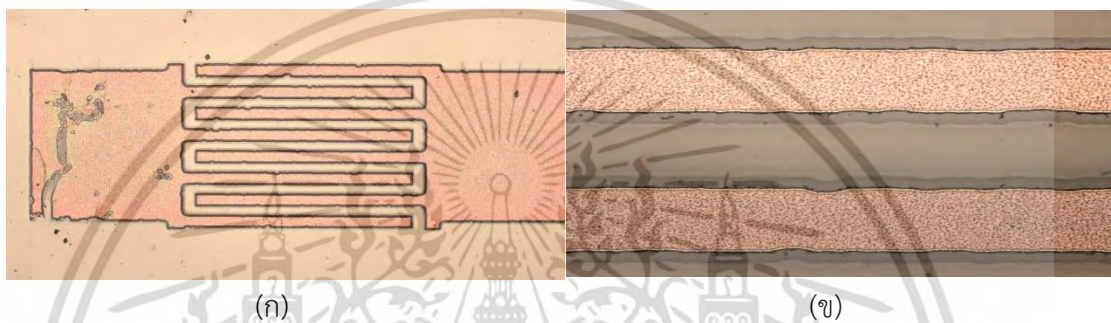
รูปที่ 4.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอม (Atomic Force Microscope: AFM) แสดงการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยใช้สารละลาย (ก) TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol และ (ข) TMAH-Dual Doped

แต่อย่างไรก็ตาม ถึงแม้ว่าการตรวจสอบลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดโดยเงื่อนไขทั้งสองจะพบว่ามีผิวที่ใกล้เคียงกัน แต่มีอยู่ 2 ปัจจัยหลักที่ทำให้ต้องใช้เงื่อนไขของสารละลาย TMAH-Dual Doped มาใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM คือ ปริมาณสารตั้งต้นที่ใช้และอัตราการกัดอะลูมิเนียม ในส่วนของปริมาณสารตั้งต้นนั้นสามารถเห็นได้อย่างชัดเจน เนื่องมาจากในกรณีของการใช้เงื่อนไขของสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เติมด้วยไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ จำเป็นต้องใช้ปริมาณ TMAH 25 % โดยน้ำหนัก ถึงจะทำให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบ [35],[49-51] ในขณะที่เงื่อนไขของสารละลาย TMAH-Dual Doped ใช้ปริมาณ TMAH เพียงแค่ 5 % โดยน้ำหนักเท่านั้น และในกรณีอัตราการกัดของอะลูมิเนียม สามารถยืนยันได้จากรูปที่ 4.14 และ 4.15 ซึ่งเป็นภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิท (interdigitate electrodes) ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

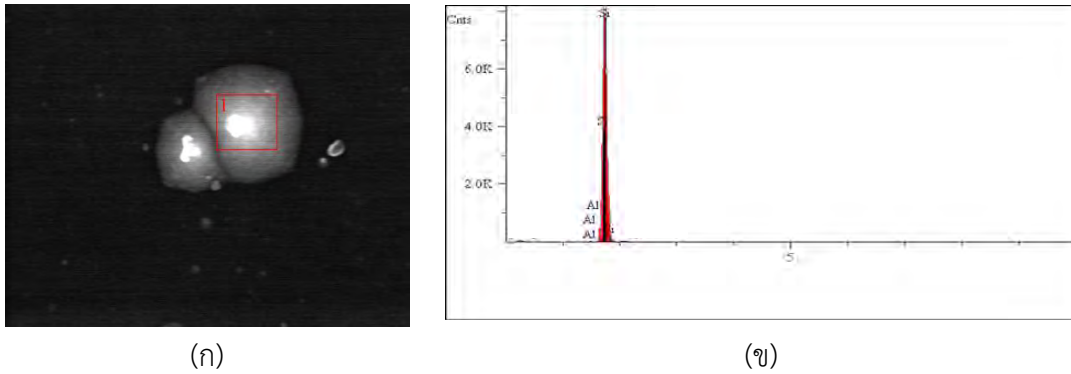


**รูปที่ 4.14** ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลทำการกัดโดยใช้ TMAH 20 %wt + IPA 30 %vol ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 5,000 เท่า



**รูปที่ 4.15** ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลทำการกัดโดยใช้ TMAH-Dual Doped ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ที่กำลังขยาย (ก) 500 เท่า (ข) 5,000 เท่า

ซึ่งพบว่าเมื่อทำการกัดโดยใช้เงื่อนไขของสารละลายทั้งสอง พบว่าในเงื่อนไขของการเติม ไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลายเตตระเมทิลอามโมเนียมไฮดรอกไซด์ขั้วไฟฟ้าที่ถูกกัดไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้หรือขั้วไฟฟ้าโดยสารเคมีเซาจนขาด เนื่องจากในเงื่อนไขนี้มีอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างสูง ซึ่งจะแตกต่างอย่างเห็นได้ชัดกับเงื่อนไขของ TMAH-Dual Doped ซึ่งมีอัตราการกัดของอะลูมิเนียมที่น้อยมาก จึงส่งผลให้ขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลของตัวตรวจวัดแสงสามารถคงสภาพอยู่ได้และมีความสมบูรณ์ของขั้วไฟฟ้าที่มากกว่าอย่างชัดเจน ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าเงื่อนไขของสารละลาย TMAH-Dual Doped มีความเหมาะสมในการนำมาใช้สำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ทั้งในเรื่องของลักษณะพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบสามารถทำซ้ำได้ และอัตราการกัดของอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างน้อยจนสามารถลดขั้นตอนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ได้ และที่สำคัญเมื่อทำการตรวจสอบปริมาณสารต่างๆที่คงค้างอยู่บนพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด จากเครื่องวิเคราะห์ธาตุเชิงปริมาณ (energy dispersive x-ray spectrometer; EDX) ดังรูปที่ 4.16 พบว่าจะสามารถสังเกตเห็นปริมาณของธาตุซิลิคอนเป็นหลักและมีเศษของอะลูมิเนียมที่อยู่บนผิวของซิลิคอนเพียงเล็กน้อยเท่านั้น แสดงให้เห็นว่า การใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรรวมได้เนื่องจาก สารเคมีนี้ไม่ทำให้เกิดประจุตกค้างบนพื้นผิวที่ถูกกัด

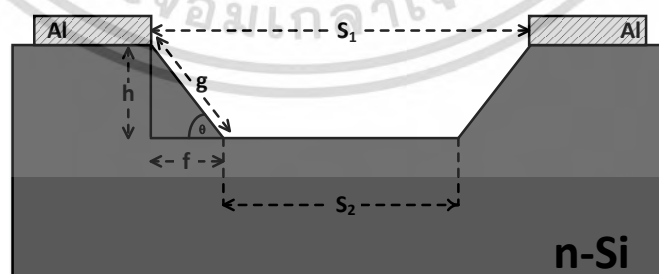


รูปที่ 4.16 การตรวจสอบปริมาณธาตุที่คงค้างอยู่บนพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยเครื่อง EDX โดย (ก) บริเวณที่ทำการตรวจสอบ และ (ข) ปริมาณธาตุที่พบอยู่บนพื้นที่ที่ตรวจสอบ

## 4.2 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูดิงหัวข้อที่ 4.1 ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการนำสารละลาย TMAH-Dual Doped มาใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ที่มีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงให้มีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูและเพื่อทำการประยุกต์ใช้กับขั้วไฟฟ้าที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM นั้น มีการออกแบบกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโดยอาศัยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกเข้ามาใช้ ซึ่งการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกนั้นจะส่งผลให้ตัวตรวจวัดแสงมีพื้นที่รับแสงมากกว่าแบบพลาสมา ถึง 1.7 เท่า [7-9] เนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีลักษณะการกัดในระนาบที่เฉพาะเจาะจง โดยจะมีความสามารถในการกัดซิลิคอนที่ระนาบ (100) มากกว่า ระนาบ (111) จึงส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นจะมีลักษณะของความชันที่เกิดขึ้นทำมุม  $54.7^\circ$  กับระนาบ (100) (มุมที่เกิดขึ้นนี้เป็นลักษณะเฉพาะของการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกโดยสารละลาย TMAH) [52] ดังรูปที่ 4.17

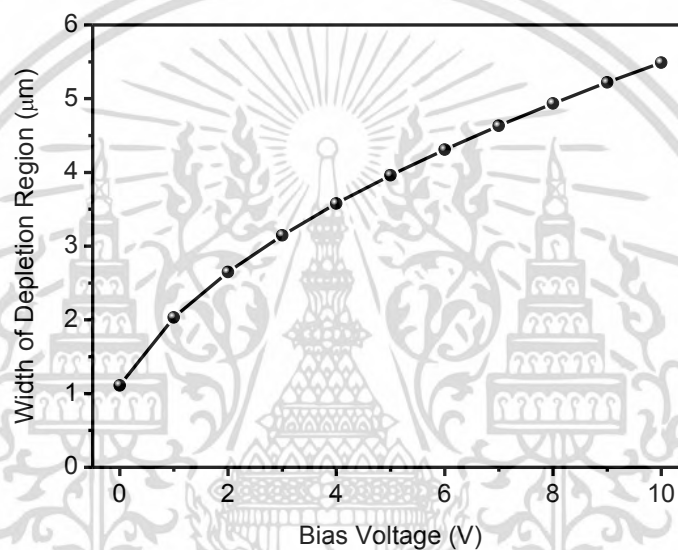


รูปที่ 4.17 พื้นที่รับแสงที่ถูกเพิ่มขึ้นจากกระบวนการกัดแบบแอนไอโซโทรปิก

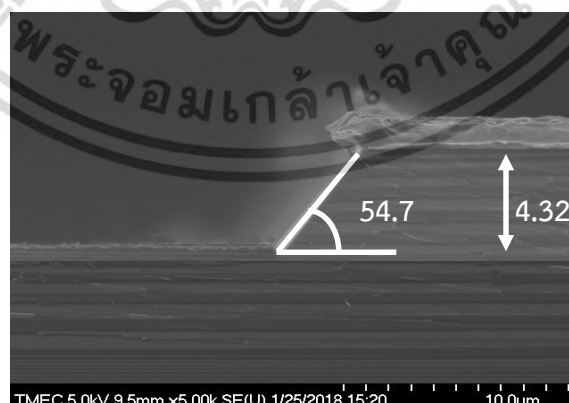
อย่างไรก็ตามในการนำกระบวนการกัดเข้ามาใช้ในกระบวนการสร้างนั้น มีตัวแปรที่สำคัญคือ ความลึกของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัด ซึ่งความลึกของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดจำเป็นต้องสอดคล้องกับ กลไกทางด้านไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงด้วย โดยกลไกทางด้านไฟฟ้าที่สำคัญที่ส่งผลต่อกระแสแสงของเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้เผยแพร่ขึ้นต้นการตีพิมพ์ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงคือ ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (width of depletion region) (ซึ่งจะได้กล่าวในหัวข้อถัดไป) ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่สามารถครอบคลุมถึงได้ จากสมการที่ 3.3 ในบทที่ 3 พบว่ามีตัวแปรที่ส่งผลต่อความกว้างของบริเวณปลอดพาหะอยู่เพียงหนึ่งตัวแปร นั่นคือ แรงดันไบอัสที่ตกคร่อมรอยสัมผัส肖ตกี (V<sub>d</sub>) ดังนั้นจึงทำการหาความกว้างของบริเวณปลอดพาหะที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงดันไบอัสที่ 0 ถึง 10 โวลต์ แสดงดังรูปที่ 4.18

จากรูปที่ 4.18 พบว่าบริเวณความกว้างของบริเวณปลอดพาหะจะแปรผันตามแรงดันไบอัสที่เพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ จะมีความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ ประมาณ 5.48 ไมโครเมตร ดังนั้นจึงมีการกำหนดความลึกของซิลิคอนที่ถูกกัดให้สัมพันธ์กับระยะที่บริเวณปลอดพาหะครอบคลุมถึงได้ จึงได้กำหนด ความลึกของซิลิคอนที่ถูกกัดให้มีค่าประมาณ 4-5 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4.19



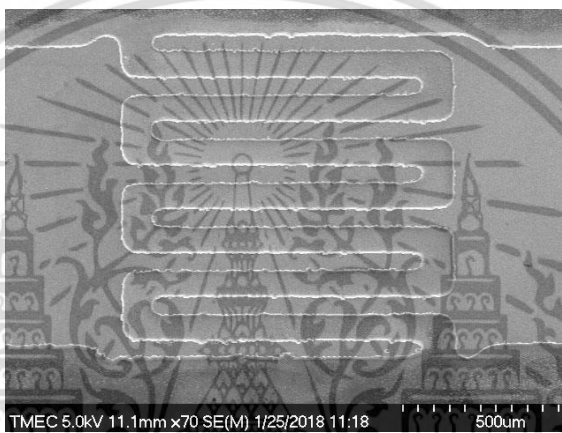
รูปที่ 4.18 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันไบอัสตกคร่อมรอยสัมผัส肖ตกีกับความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ



รูปที่ 4.19 ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.19 แสดงภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงที่ทำการสร้างโดยใช้สารละลาย TMAH Dual-Doped โดยใช้เวลาในการกัดประมาณ 6 นาที แสดงให้เห็นว่า ซิลิคอนที่ถูกกัดทำมุมกับระนาบ 54.7 องศา ซึ่งเป็นไปตามคุณลักษณะของการกัดเปียกโดยสารละลาย TMAH [52] และมีความลึกประมาณ 4.32 ไมโครเมตร โดยความลึกที่ 4.32 ไมโครเมตรนี้ เป็นความลึกที่เหมาะสมซึ่งจะสัมพันธ์กับบริเวณปลอดพาหะที่จะขยายไปได้เมื่อทำการไบอัสแรงดันสูงสุดที่ 10 โวลต์ ดังนั้น จึงไม่มีความจำเป็นที่จะใช้เวลากัดที่นานขึ้นซึ่งอาจจะเสียเวลาในการสร้างชั้นอีก ในวิทยานิพนธ์นี้จึงสามารถกำหนดเวลาที่ใช้ในการกัดพื้นผิวของซิลิคอนได้ และสามารถยืนยันข้อมูลได้อย่างชัดเจนว่า อัตราการกัดของซิลิคอนที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 4.1.1.2 เป็นข้อมูลที่ถูกต้องและใช้เป็นกระบวนการสร้างมาตรฐานในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในครั้งต่อไปได้



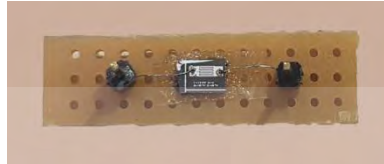
รูปที่ 4.20 ภาพถ่ายของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

รูปที่ 4.20 ภาพตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตที่ ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงให้เห็นว่าลักษณะขั้วมีความคงสภาพอยู่ได้ ไม่มีรอยขาดเนื่องจากผลกระทบของสารเคมี แต่บริเวณขอบของขั้วไฟฟ้ามีลักษณะถูกสารเคมีเซาะหรือกัดบ้าง เนื่องมาจากโฟโตมาสก์ (photo mask) ที่ใช้ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เป็นการใช้ลวดลายที่อยู่บนแผ่นฟิล์มและติดบนกระจกใส ดังนั้นเมื่อฉายแสงอัลตราไวโอเล็ตผ่านกระจกต้นแบบ แสงจึงเกิดการเลี้ยวเบนเนื่องจากมีช่องว่างเล็กๆระหว่างแผ่นฟิล์มกับกระจกทำให้แสงสามารถเซาะบริเวณขอบๆของลวดลายขั้วไฟฟ้าทำให้ขั้วไฟฟ้าที่ได้ไม่คมชัด จึงส่งผลกระทบต่อกระบวนการสร้างได้ แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าบริเวณขอบของขั้วไฟฟ้าจะโดนเซาะไปบ้าง แต่ก็ไม่ทำให้ขั้วไฟฟ้าถูกทำลายไปได้ จึงสามารถนำมาศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงต่อไปได้

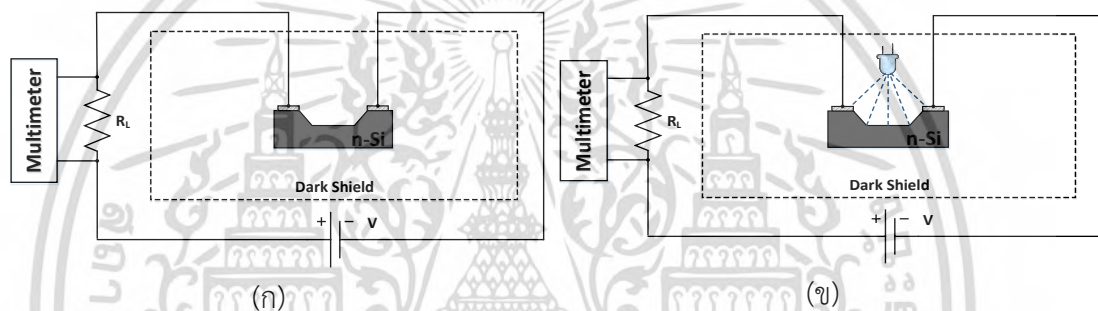
### 4.3 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต

เมื่อได้เงื่อนไขในการสร้างตัวตรวจวัดแสงดังหัวข้อที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ดังนั้นจึงทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโดยสารละลาย TMAH-Dual Doped จากนั้นจึงทำการตัดแยกชิ้นงานของตัวตรวจวัดเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แสงโครงสร้าง UMSSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต และทำการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้า ด้วยกาวเงินดังรูปที่ 4.21 เพื่อทำการวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงต่อไป และในส่วนของ การวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงจะกระทำภายใต้เงื่อนไขที่มีแสงตกกระทบบและเงื่อนไข ที่มีแสงตกกระทบบโดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 4.22 ซึ่งจะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน และป้อนแรงดันไบอัส -10 ถึง 10 โวลต์ [3]



รูปที่ 4.21 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิต ที่ ผ่านการเชื่อมต่อขั้วไฟฟ้าด้วยกาวเงินเรียบร้อยแล้ว



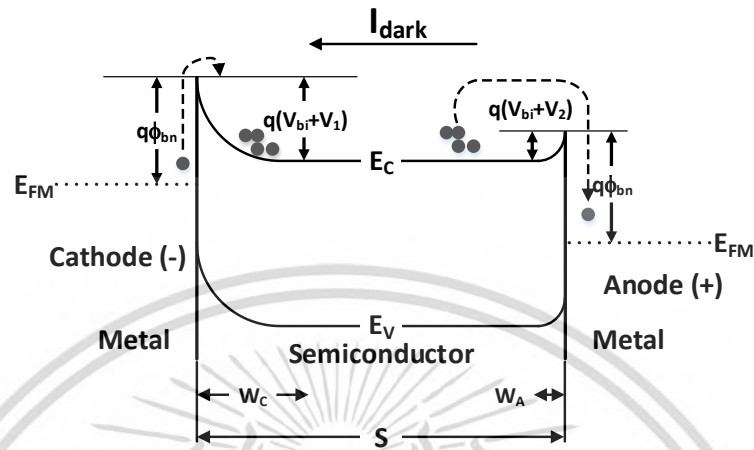
รูปที่ 4.22 ชุดทดลองที่ใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงภายใต้เงื่อนไข (ก) ไม่ได้รับแสงตกกระทบบ และ (ข) ได้รับแสงตกกระทบบ

#### 4.3.1 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM และ UMSSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบบ

ผลการทดลองในส่วนนี้ได้ทำการต่อชุดทดลองดังรูปที่ 4.22 (ก) เพื่อทดสอบกระแสที่วัดได้เมื่อ ไม่ได้รับแสงตกกระทบบ โดยกระแสในส่วนนี้จะเรียกว่ากระแสรั่วหรือกระแสมืด (dark current) ซึ่ง กระแสมืดจะเกิดขึ้นจาก ปริมาณอิเล็กตรอนที่สามารถเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ ( $\phi_{bn}$ ) ไปได้ เมื่อทำ การให้แรงดันไบอัส โดยตัวตรวจวัดแสงที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้เป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM เปรียบเสมือนไดโอดหันชนกัน ดังนั้นเมื่อให้แรงดันไบอัสตรงและไบอัสย้อนกลับจะทำให้บริเวณปลด พาทะและกำแพงศักย์เปลี่ยนไป โดยด้านขั้วแคโทดที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับจะทำให้กำแพงศักย์ ภายในสูงขึ้นทำให้อิเล็กตรอนด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ไปยังด้านโลหะได้มีเพียงอิเล็กตรอน ด้านโลหะบางส่วนเท่านั้นที่สามารถเคลื่อนที่มาด้านสารกึ่งตัวนำได้ จึงเกิดกระแสไหลจากด้านสารกึ่ง ตัวนำไปด้านโลหะ และในขณะเดียวกันด้านขั้วแอโนดที่ได้รับแรงดันไบอัสตรงจะทำให้กำแพงศักย์ ลดลงทำให้อิเล็กตรอนด้านสารกึ่งตัวนำเคลื่อนที่ไปยังด้านโลหะได้จึงเกิดกระแสไหลในทิศโลหะไปยัง สารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเรียกได้ว่าเป็นกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ซึ่งแสดงกลไก

การเกิดกระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงได้ดังรูปที่ 4.23 แต่อย่างไรก็ตามกระแสมืดจะมีค่าที่ไม่มาก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไมอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากปริมาณอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากด้านโลหะมายังด้านสารกึ่งตัวนำในกรณีที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยเท่านั้น จึงทำให้เกิดกระแสมีดน้อยตามไปด้วย ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM ในบทที่ 2



รูปที่ 4.23 กลไกการเกิดกระแสมีดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM

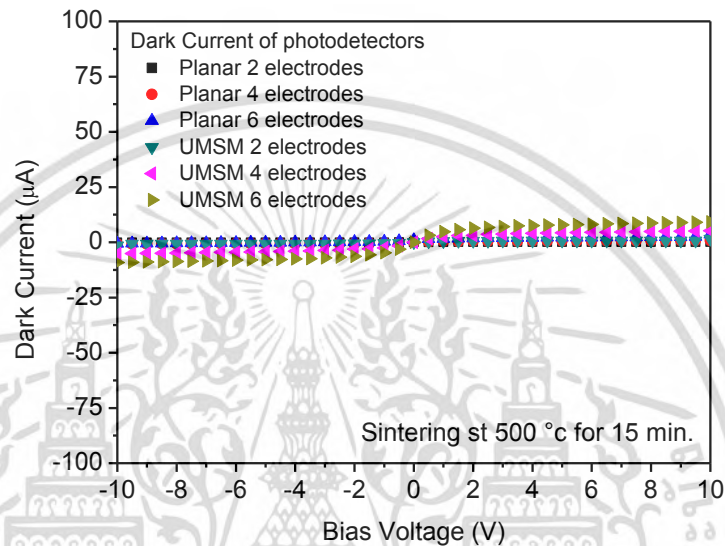
อย่างไรก็ตามกำแพงศักย์ที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อได้รับแรงดันไบอัสเป็นปัจจัยหลักที่ทำให้เกิดกระแสมีดขึ้น ดังนั้นจึงสามารถใช้กระบวนการซินเตอร์ริง (sintering) เข้ามาช่วยในการลดกระแสมีดลงได้ ซึ่งในศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้มีการวิจัยผลของการซินเตอร์ริงที่มีต่อรอยสัมผัสที่กระหว่างโลหะอะลูมิเนียมกับสารกึ่งตัวนำซิลิคอนชนิดเอ็นไว้แล้ว ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดของการซินเตอร์ริง คือ ใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที กับชั้นงานในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน [3] โดยการซินเตอร์ริงจะทำให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะกับสารกึ่งตัวนำเกิดการฟอร์มตัวแบบยูเทคติก (eutectic) [53] ทำให้เป็นรอยสัมผัสที่ดียิ่งขึ้น และการซินเตอร์ริงก็ยังมีส่งผลต่อกระแสมีด ( $I_0$ ) โดยอุณหภูมิที่สูงจะทำให้กระแสมีดลดลง กระแสมีดที่ลดลงนี้จึงส่งผลให้กำแพงศักย์มีค่าที่สูงมากขึ้น จึงสามารถป้องกันการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์เมื่อไม่มีแสงตกกระทบได้ เป็นไปตามสมการที่ 4.4 ดังนั้นในการสร้างตัวตรวจวัดแสงทุกครั้งเมื่อสร้างเสร็จแล้วจำเป็นต้องนำไปเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริงก่อนที่จะนำมาวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าทุกครั้ง ซึ่งจะถือว่าเป็นกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่ถูกต้องตามมาตรฐาน

$$\phi_{bn} = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{ART^2}{I_0} \right) \quad (4.4)$$

กำหนดให้	$k$	คือ	ค่าคงที่ของโบสตันน์ เท่ากับ $8.617 \times 10^{-5}$ eV/k
	$T$	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (k)
	$R$	คือ	ค่าคงที่ริชาร์ดสัน เท่ากับ $110 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{k}^{-2}$
	$q$	คือ	ประจุอิเล็กตรอน เท่ากับ $1.609 \times 10^{-19}$ C
	$A$	คือ	พื้นที่รอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ( $\text{cm}^{-2}$ )
	$I_0$	คือ	กระแสมีด (A)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในรูปที่ 4.24 แสดงลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบ อินเตอร์ดิจิทัล โดยมีโครงสร้างเป็นแบบ MSM และ UMSM ตามลำดับ ซึ่งพบว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงมีลักษณะสมมาตรทั้งด้านบวกและด้านลบและที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ โครงสร้าง MSM หรือแบบเชิงราบ ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2, 4 และ 6 ขั้ว พบว่ามีค่ากระแสมืดเท่ากับ 0.10, 0.80 และ 3.63 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ และโครงสร้างแบบ UMSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2, 4 และ 6 ขั้ว พบว่ามีกระแสมืดเท่ากับ 1.48, 5.21 และ 9.21 ไมโครแอมป์ตามลำดับ โดยกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างทั้ง 2 แบบแสดงข้อมูลดังตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.24 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ชนิด  $Al/n-Si/Al$  ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิทัลขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ตารางที่ 4.3 ค่ากระแสมืดที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ ของตัวตรวจวัดแสงชนิด  $Al/n-Si/Al$  ทั้งแบบ MSM และ UMSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน

จำนวนขั้วไฟฟ้า (electrodes)	กระแสมืด (dark current) ( $\mu A$ )	
	โครงสร้างแบบ MSM	โครงสร้างแบบ UMSM
2 ขั้ว	0.10	1.48
4 ขั้ว	0.80	5.21
6 ขั้ว	3.63	9.21

อย่างไรก็ตาม จากตารางที่ 4.3 จะพบว่าค่ากระแสมืดจะมีค่าที่เพิ่มมากขึ้น ตามจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นและจากกระบวนการกัดให้เป็นร่องรูปตัวยู ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสงโดยกระบวนการกัดและการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าให้กับตัวตรวจวัดแสงจะทำให้พื้นที่ของรอยสัมผัสขั้วก็เพิ่มขึ้น และเนื่องจากโพโตมาส์คที่ใช้ในการสร้างลวดลายเป็นการติดฟิล์มลงบนกระจกใส ดังนั้นลวดลายที่ได้จึงไม่คมชัดมากนักจึงสามารถถูกสารเคมีจากกระบวนการกัดเปื่อยเซาะบางส่วนได้ดังรูปที่ 4.20 จึงทำให้เกิดมุมจากริ้วรอยการกัดของขั้วไฟฟ้าขึ้นซึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปรียบเสมือนการเพิ่มพื้นที่ของรอยสัมผัสมากยิ่งขึ้น เป็นดังสมการที่ 4.5 โดยที่กระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคติจี้จะแปรผันกับขนาดพื้นที่ของรอยสัมผัสที่มากยิ่งขึ้น

$$I_0 = ART^2 e^{\frac{-q\phi_{bn}}{kT}} \quad (4.5)$$

กำหนดให้	$k$	คือ	ค่าคงที่ของโบสตันน์ เท่ากับ $8.617 \times 10^{-5}$ eV/k
	$T$	คือ	อุณหภูมิสัมบูรณ์ (k)
	$R$	คือ	ค่าคงที่ริชาร์ดสัน เท่ากับ $110 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{k}^{-2}$
	$q$	คือ	ประจุอิเล็กตรอน เท่ากับ $1.609 \times 10^{-19}$ C
	$A$	คือ	พื้นที่รอยสัมผัสระหว่างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ ( $\text{cm}^2$ )
	$\phi_{bn}$	คือ	ความสูงของกำแพงศักย์

#### 4.3.2 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิจิตเท เมื่อมีแสงตกกระทบ

การทดลองในส่วนนี้ได้ทำการต่อชุดทดลองดังรูปที่ 4.22 (ข) โดยใช้แสงจากหลอดฮาโลเจนเป็นแหล่งกำเนิดแสง โดยทำการวัดกระแสมืด ( $I_{dark}$ ) ในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบ และกระแสรวม ( $I_{total}$ ) ของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อที่จะทำการหาค่ากระแสแสง ( $I_{photo}$ ) ของตัวตรวจวัดแสง ดังสมการที่ 4.6

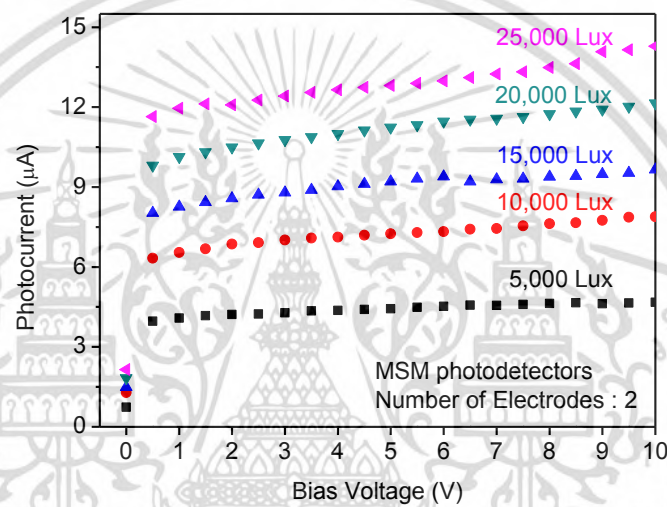
$$I_{photo} = I_{total} - I_{dark} \quad (4.6)$$

จากนั้นนำค่ากระแสแสงที่ได้มาแสดงเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงต่อไป

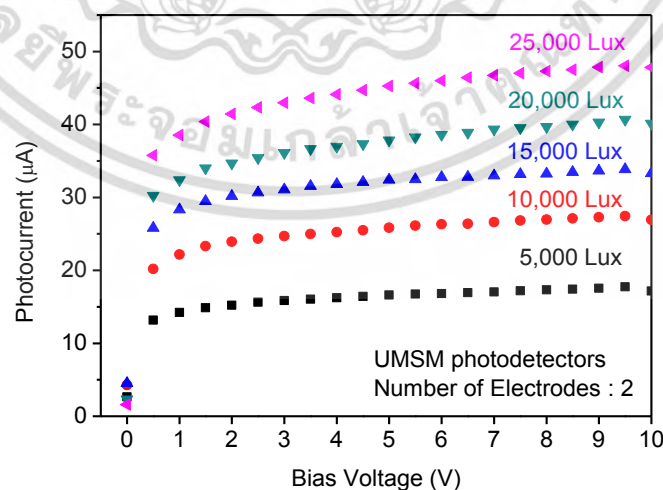
ในการทดสอบจะทำให้แรงดันไบอัส -10 ถึง 10 โวลต์แต่เนื่องจากเป็นตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ลักษณะกราฟสมบัติกระแสและแรงดันจะมีความสมมาตรทั้งฝั่งลบและบวกดังนั้นในหัวข้อต่อไปจึงนำเสนอเฉพาะฝั่งบวกเพียงอย่างเดียว และทำการให้แสงที่มีความเข้ม 5,000 ถึง 25,000 ลักซ์ โดยแรงดันไบอัสและความเข้มแสงจะเป็นปัจจัยที่สำคัญของการเกิดกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งแรงดันไบอัสที่มากยิ่งขึ้นจะทำให้ความกว้างของบริเวณปลอดพาหะขยายไปได้บริเวณที่มากยิ่งขึ้นซึ่งจะเป็นตัวกำหนดความลึกในการกีดกันของวิธานิพจน์นี้ได้ตั้งหัวข้อที่ 4.2 และความเข้มแสง จะหมายถึงความหนาแน่นของโฟตอนที่ตกลงบนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงในหนึ่งหน่วยพื้นที่ ดังนั้นยิ่งความเข้มแสงมากขึ้นความหนาแน่นของโฟตอนที่ตกกระทบยิ่งมากขึ้นทำให้เกิดการกระตุ้นให้มีอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลมากขึ้นด้วย ดังพฤติกรรมของสารกึ่งตัวนำเมื่อโดนแสงตกกระทบ ในบทที่ 2

#### 4.3.2.1 ผลของการเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยกระบวนการกัดเป็ยกด้วยสารละลาย TMAH-Dual Doped ที่มีต่อกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโดยอาศัยกระบวนการกัดเข้ามาใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง โดยจากปกติจะเป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ซึ่งราบ เมื่อนำกระบวนการกัดเป็ยกด้วยสารละลาย TMAH-Dual Doped เข้ามาใช้ จึงสามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงได้ โดยจะมีโครงสร้างเป็นแบบ UMSM หรือแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปนี้สามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงได้มากถึง 1.7 เท่า ตามสมการคณิตศาสตร์ในบทที่ 3 หัวข้อที่ 3.1.1 โดยรูปที่ 4.25 และ 4.26 แสดงลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ ตามลำดับ



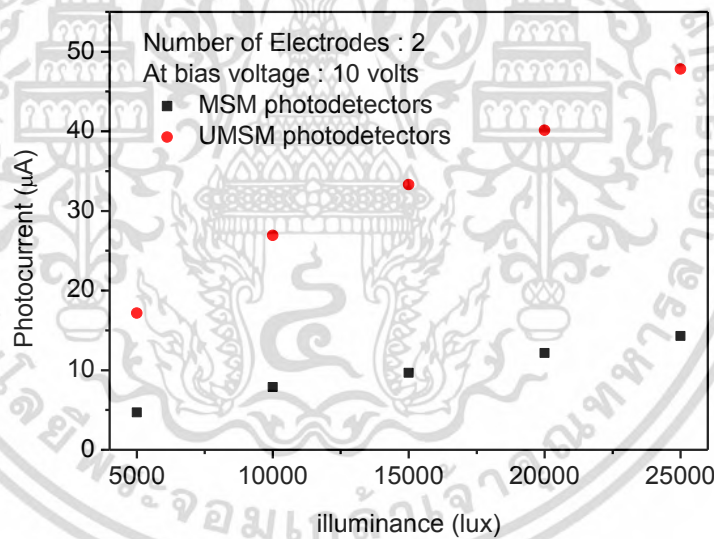
รูปที่ 4.25 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ



รูปที่ 4.26 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSM ที่สร้างโดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการให้แรงดันไบอัสที่ขั้วทั้งสองของตัวตรวจวัดแสงจะทำให้มีบริเวณปลอดพาหะเกิดขึ้น โดยพบว่าที่แรงดันไบอัสคงที่ 10 โวลต์ บริเวณปลอดพาหะจะขยายไปได้ถึง 5.48 ไมโครเมตร ซึ่งในวิทยานิพนธ์นี้สามารถสร้างระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าได้น้อยที่สุดเท่ากับ 40 ไมโครเมตร ดังนั้นพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองจึงประกอบไปด้วยบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัลหรือบริเวณที่ไม่มีสนามไฟฟ้าตกคร่อม เมื่อมีแสงตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเกิดขึ้นซึ่งจะเกิดขึ้นทั้งในบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทรัล โดยคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดขึ้นบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศทางของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสแสง ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศทางกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอนโนด ซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทรัล โดยในบริเวณนิวทรัลก็จะเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้นเช่นกัน แต่เนื่องจากเป็นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็นจึงมีพาหะส่วนมากเป็นอิเล็กตรอนดังนั้นจึงมีอิเล็กตรอนเกิดขึ้นมาใหม่นี้ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับโฮล และเนื่องจากพาหะส่วนใหญ่เป็นอิเล็กตรอน โฮลบางส่วนจึงเคลื่อนที่จากบริเวณที่มีความหนาแน่นมากไปยังบริเวณที่มีความหนาแน่นน้อยเข้าสู่บริเวณปลอดพาหะและโฮลบางส่วนจะเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ผ่านบริเวณนิวทรัลรวมกันในบริเวณนิวทรัลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นจึงเกิดมาจากโฮล เพราะในซิลิคอนชนิดเอ็นมีพาหะส่วนใหญ่คืออิเล็กตรอน ดังนั้นจึงมีอิเล็กตรอนค่อนข้างหนาแน่นทุกบริเวณจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่แบบแพร่ของอิเล็กตรอนได้น้อย



รูปที่ 4.27 ลักษณะความสัมพันธ์ระหว่างกระแสแสงและความเข้มแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSM ที่สร้างโดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped ขณะที่ได้รับแรงดันไบอัส 10 โวลต์

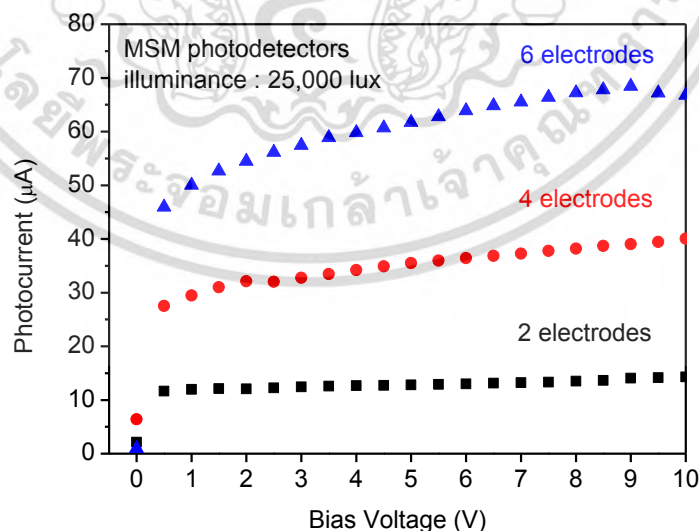
จากรูปที่ 4.25 และ 4.26 พบว่าเมื่อแรงดันไบอัสมากขึ้นส่งผลให้กระแสแสงมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะที่มากยิ่งขึ้น ในขณะเดียวกัน ในรูปที่ 4.27 ความเข้มแสงที่เพิ่มมากขึ้นก็จะส่งผลให้กระแสแสงมากขึ้นเช่นเดียวกันโดยความเข้มแสงที่มากขึ้นจะทำให้มีอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลที่มากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงทำการพิจารณาจุดที่ส่งผลให้มีค่ากระแสแสงมากที่สุด คือ ที่ความเข้มแสง 25,000 lux และแรงดันไบอัส 10 โวลต์ ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM มีค่ากระแสแสงเท่ากับ 14.29 ไมโครแอมป์ และตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM มีค่ากระแสแสงเท่ากับ

47.83 ไมโครแอมป์ ซึ่งตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM จะมีกระแสแสงมากกว่าแบบ MSM ถึง 3.34 เท่า ซึ่งเป็นไปตามการออกแบบโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงให้มีพื้นที่รับแสงมากกว่าแบบปกติถึง 1.7 เท่า

#### 4.3.2.2 ผลของการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าที่มีต่อกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al

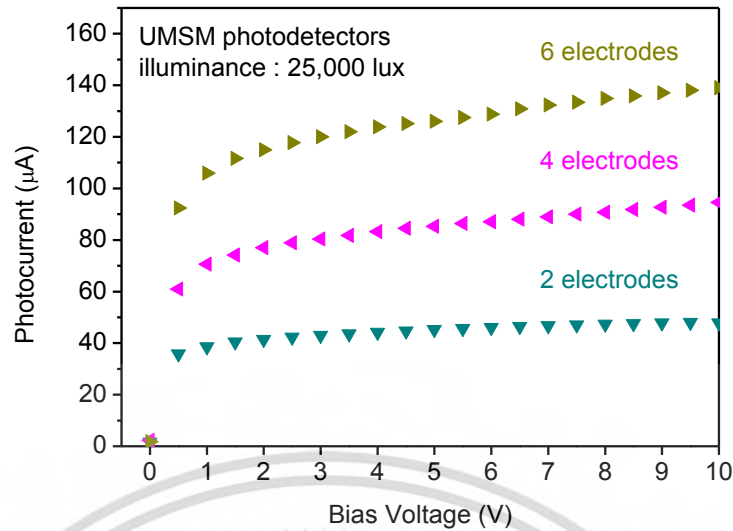
จากการทดลองในหัวข้อที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้น พบว่าที่ความเข้มแสงเท่ากับ 25,000 ลักซ์ ส่งผลให้ตัวตรวจวัดแสงมีกระแสแสงมากที่สุด ดังนั้นจึงเลือกพิจารณากระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ความเข้มแสง 25,000 ลักซ์ เพียงอย่างเดียว โดยในการทดลองนี้เป็นการเพิ่มขั้วไฟฟ้าให้กับตัวตรวจวัดแสงโดยขั้วไฟฟ้าจะมีลักษณะเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตเทมีจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2, 4 และ 6 ขั้ว ตามลำดับ การเพิ่มขั้วไฟฟ้าจะทำให้บริเวณหลอดพาหะที่เกิดขึ้นบริเวณขั้วไฟฟ้ามีบริเวณที่มากยิ่งขึ้น ซึ่งบริเวณหลอดพาหะที่เกิดขึ้นรอบๆขั้วไฟฟ้าเปรียบเสมือนเส้นรอบรูปของขั้วไฟฟ้า ซึ่งอธิบายให้เข้าใจโดยง่ายคือ ถ้าเส้นรอบรูปขั้วไฟฟ้ายิ่งมากก็จะส่งผลให้ตัวตรวจวัดแสงมีบริเวณหลอดพาหะที่มากยิ่งขึ้น โดยการเพิ่มเส้นรอบรูปของขั้วไฟฟ้าก็สามารถทำได้ 2 กรณีคือ การเพิ่มความยาวขั้วไฟฟ้า โดยในวิทยานิพนธ์นี้ใช้ความยาวของขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 1,500 ไมโครเมตร ซึ่งเป็นไปตามเงื่อนไขที่ดีที่สุดตามงานวิจัยก่อนหน้านี้ [12] และการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้า ซึ่งผลของการเพิ่มขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM แสดงดังรูปที่ 4.28 และ 4.29 ตามลำดับ

ในรูป 4.28 และ 4.29 เมื่อเปรียบเทียบจำนวนขั้วไฟฟ้าที่เพิ่มมากขึ้นจะเห็นว่าขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทมีจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 2 ขั้ว หรือตัวตรวจวัดแสงที่มีช่องรับแสงเดี่ยวจะมีพื้นที่รับแสงที่ขึ้นอยู่กับช่องเดี่ยวเพียงช่องเดียวนั้น ดังนั้นเมื่อทำการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้ามากขึ้นสองเท่า โดย มีจำนวนขั้วไฟฟ้า 4 และ 6 ขั้ว จึงทำให้มีช่องรับแสงมากขึ้นเท่ากับ 3 และ 5 ช่องตามลำดับ ดังนั้น จำนวนช่องรับแสงที่มากขึ้นนี้จึงส่งผลต่อกระแสแสงทำให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตเทมีกระแสแสงที่เพิ่มมากขึ้นตามขั้วไฟฟ้าที่มากยิ่งขึ้น ตามรูปที่ 4.30

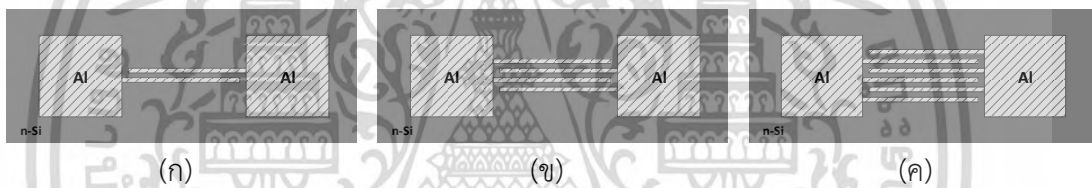


รูปที่ 4.28 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ MSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน ขณะที่มีความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 ลักซ์ และแรงดันไบอัส 10 โวลต์

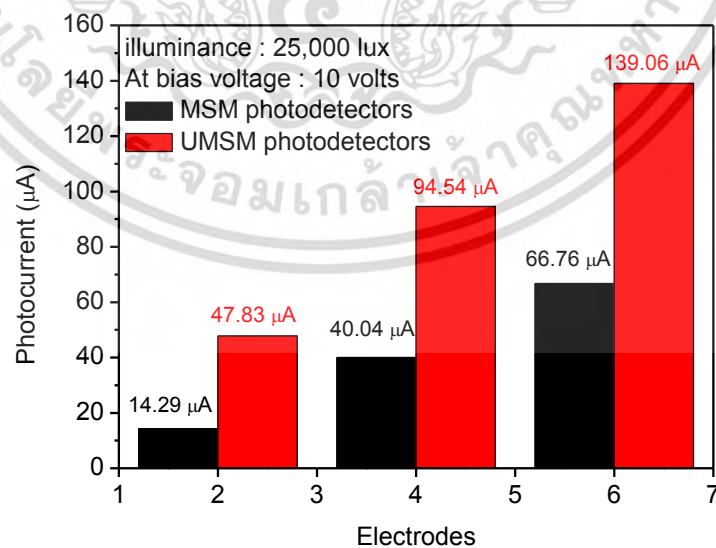
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.29 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน ขณะที่มีความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 ลักซ์ และแรงดันไบอัส 10 โวลต์



รูปที่ 4.30 โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน (ก) 2 ขั้ว (ข) 4 ขั้ว และ (ค) 6 ขั้ว



รูปที่ 4.31 เปรียบเทียบกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าแตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตท โดยมีจำนวนขั้วไฟฟ้าที่แตกต่างกัน

จำนวนขั้วไฟฟ้า (electrodes)	กระแสแสง (photocurrent) ( $\mu\text{A}$ )			
	โครงสร้าง MSM	กระแสแสงที่ เพิ่มมากขึ้น ตามจำนวน ขั้วไฟฟ้า	โครงสร้าง UMSM	กระแสแสงที่ เพิ่มมากขึ้น ตามจำนวน ขั้วไฟฟ้า
2	14.29		47.83	
4	40.04	2.80 เท่า	94.54	1.97 เท่า
6	66.76	4.67 เท่า	139.06	2.90 เท่า

จากรูปที่ 4.31 พบว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงจะมีค่าเพิ่มขึ้นตามจำนวนขั้วไฟฟ้าที่มากยิ่งขึ้นและเมื่อทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยอาศัยกระบวนการกัดเข้ามาใช้ในกระบวนการสร้างจะทำให้กระแสแสงมากขึ้นตามพื้นที่รับแสงที่มากขึ้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้เงื่อนไขที่ส่งผลให้มีกระแสแสงมากที่สุดคือ ตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตทจำนวน 6 ขั้ว โดยมีค่าเท่ากับ 139.06 ไมโครแอมป์ เมื่อเทียบกับตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตทจำนวน 2 ขั้ว เท่ากับ 14.29 ไมโครแอมป์ พบว่าในเงื่อนไขแรกมีกระแสแสงมากขึ้นถึง 2.90 เท่า แต่อย่างไรก็ตามกระแสแสงที่มากขึ้นนี้ยังคงไม่เป็นไปตามทฤษฎี เนื่องจากตามจริงแล้วเมื่อมีจำนวนขั้วไฟฟ้าเพิ่มขึ้น 6 ขั้ว ควรจะต้องมีกระแสแสงมากกว่าแบบ 2 ขั้ว ถึง 5 เท่า เนื่องจากมีพื้นที่รับแสงหรือช่องรับแสงมากขึ้นถึง 5 ช่อง ดังรูปที่ 4.30

สาเหตุที่กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นในวิทยานิพนธ์นี้ไม่ได้กระแสแสงที่มากขึ้นตามจำนวนเท่าของขั้วไฟฟ้า เนื่องจากโพโตมาส์ที่ใช้ในการสร้างลวดลายเป็นการติดฟิล์มลงบนกระจกใส ดังนั้นลวดลายที่ได้จึงไม่คมชัดมากนักจึงสามารถถูกสารเคมีจากกระบวนการกัดเปียกเซาะบางส่วน ทำให้เกิดกระแสมืดที่มากขึ้นตามมุมของขั้วไฟฟ้า โดยกระแสมืดที่มากขึ้นนี้จะคอยกดหรือหักล้างกระแสแสงจึงทำให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงไม่ได้เพิ่มขึ้นตามจำนวนเท่าของขั้วไฟฟ้า โดยค่ากระแสแสงขอตัวตรวจวัดแสงแต่ละเงื่อนไขสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 4.4

## สรุปผลการทดลอง และข้อเสนอแนะ

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเตอร์ดิจิตัล ซึ่งทำการสร้างโดยใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็นระนาบ (100) ที่มีค่าสภาพต้านทาน 5-10 โอห์ม-เซนติเมตร โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อที่ความต้องการเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงให้มากยิ่งขึ้น ซึ่งโดยปกติตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ที่เป็นเชิงราบจะมีกระแสแสงที่มากหรือน้อยขึ้นอยู่กับบริเวณปลอดพาหะ (width of depletion regions) และพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง โดยบริเวณพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM จะขึ้นอยู่กับระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าเท่านั้น แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้จะมีพื้นที่รับแสงที่มากน้อยเพียงใด บริเวณปลอดพาหะจะมีค่าสูงสุดที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ เท่ากับ 5.48 ไมโครเมตรเท่านั้น ดังนั้นการเพิ่มพื้นที่รับแสงที่มากเกินไปไม่ได้ส่งผลให้กระแสแสงมากขึ้นเพียงอย่างเดียวกลับกลายเป็นเพิ่มขนาดให้กลับตัวตรวจวัดแสงอีกด้วยซึ่งขนาดที่เพิ่มมากขึ้นนี้อาจจะเป็นปัญหาในการประยุกต์ใช้ในวงจรรวมได้ จึงมีความต้องการที่จะเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยที่ไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าขึ้น ซึ่งในห้องปฏิบัติการสามารถสร้างสวดลายของขั้วไฟฟ้าได้มีระยะห่างต่ำสุดที่ 40 ไมโครเมตร ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงที่ศึกษาในวิทยานิพนธ์นี้จึงมีขั้วไฟฟ้าที่มีระยะห่างแบบกว้าง (wide electrode gap) เท่านั้น

จึงได้นำแนวความคิดจากเทคโนโลยีการสร้างโครงสร้างระดับจุลภาค (micromachining) มาประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง โดยอาศัยกระบวนการกัดแบบเปียก (wet etching process) มาใช้ในการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสง และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกจะมีสารเคมีหลักคือสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ซึ่งจะมีลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซโทรปิก โดยจะกัดผลึกของซิลิคอนในระนาบ (100) มากกว่า ระนาบ (111) ดังนั้นเมื่อทำการกัดซิลิคอนโดยสารละลายนี้จึงทำให้พื้นผิวของตัวตรวจวัดแสงเป็นร่องรูปตัวยูโดยมีความชัน (slope) เกิดขึ้น ทำให้สามารถเพิ่มพื้นที่รับแสงได้มากยิ่งขึ้น จึงเกิดเป็นที่มาของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูหรือ UMSM ขึ้น โดยพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นนี้เมื่อคำนวณจากสมการคณิตศาสตร์พบว่าตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM จะมีพื้นที่รับแสงที่มากกว่าแบบ MSM ถึง 1.7 เท่า แต่อย่างไรก็ตามพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดก็ไม่ได้มีความเรียบเหมือนกับแบบเชิงราบเสมอไปเนื่องมาจากการกัดของสารละลายจึงทำให้มีความขรุขระหรือเนินของพีระมิดเกิดขึ้น ซึ่งเนินของพีระมิดที่เกิดขึ้นเหล่านี้เกิดมาจาก ในการแตกตัวของสารละลาย TMAH สามารถแตกตัวได้ฟองก๊าซไฮโดรเจนจำนวนมาก โดยฟองก๊าซไฮโดรเจนเหล่านี้จะมาเกาะบริเวณพื้นผิวซิลิคอน ทำหน้าที่เหมือนชั้นป้องกัน การกัดจึงทำให้สารเคมีไม่สามารถที่จะกัดบริเวณเหล่านี้ได้จึงเกิดเป็นพีระมิดเกิดขึ้นซึ่งจะทำให้ยากต่อการทำซ้ำในครั้งต่อไป และนอกจากพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดจะไม่เรียบแล้วยังมีอัตราการกัดขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างเร็วซึ่งจะส่งทำให้ขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงมีสภาพที่ไม่สมบูรณ์เกิดขึ้น จึงได้ทำการเติมกรดซิลิซิก (silicic acid) และแอมโมเนียมเปอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate; AP) ลงในสารละลาย TMAH ซึ่งจะทำให้การเรียกว่าเป็นคู่อะตอมสารเจือของสารละลาย TMAH (TMAH-Dual Doped) เพื่อปรับปรุงสภาพผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดและช่วยลดอัตราการกัดของอะลูมิเนียมลงได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้เริ่มทำการศึกษาหาเงื่อนไขของ TMAH-Dual Doped ที่มีความเหมาะสมในการสร้างตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเงื่อนไขที่เหมาะสมคือพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดจะต้องมีความเรียบ และจะต้องมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างน้อย โดยแบ่งขั้นตอนของการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมเป็น 2 ขั้นตอน ในส่วนของขั้นตอนแรกทำการเติมกรดซิลิซิกปริมาณต่างๆลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนัก เมื่อตรวจสอบอัตราการกัดอะลูมิเนียมและพื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดพบว่า การเติมกรดซิลิซิกปริมาณ 34 กรัมต่อลิตรลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนักจะส่งผลให้มีอัตราการกัดของอะลูมิเนียมน้อยที่สุด เท่ากับ 0.23 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง แต่อย่างไรก็ตามในเงื่อนไขของการเติมกรดซิลิซิกปริมาณเท่านี้ก็ไม่ได้ส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบขึ้นแต่อย่างใด จึงทำการยึดเงื่อนไขในขั้นตอนแรกเป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมของสารตั้งต้นในการเติมปริมาณสาร AP ปริมาณต่างๆ ในขั้นตอนถัดไป และในขั้นตอนที่สองจะทำการเติมสาร AP ปริมาณ 7.0, 9.0, 9.5, 10.0, 10.5, 11.0, 11.5 และ 13.0 กรัมต่อลิตร ลงในสารตั้งต้น โดยสารตั้งต้นในที่นี้คือ TMAH 5 % โดยน้ำหนัก และกรดซิลิซิก 34 กรัมต่อลิตร เมื่อตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะพบว่าเงื่อนไขของการเติมสาร AP 11.5 กรัมต่อลิตร จะส่งผลให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบที่สุด และที่เงื่อนไขนี้จะพบว่ามีอัตราการกัดของซิลิคอนเท่ากับ 1.24 ไมโครเมตรต่อนาที่ และมีอัตราการกัดอะลูมิเนียม ซิลิคอนไดออกไซด์ เท่ากับ 0.17 และ 0.23 ไมโครเมตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ จึงสามารถสรุปได้ว่ากรดซิลิซิกที่เติมลงไปนั้นจะช่วยในด้านการลดอัตราการกัดอะลูมิเนียมและสาร AP ซึ่งเป็นตัวออกซิไดส์ (oxidizing agent) จะเป็นส่วนในการทำให้พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบและทำให้มีอัตราการกัดซิลิคอนที่เร็วขึ้นด้วย ดังนั้นจึงกำหนดเงื่อนไขของการเติมสาร AP ปริมาณ 11.5 กรัมต่อลิตร ลงในสารละลาย TMAH 5 % โดยน้ำหนักกับกรดซิลิซิกปริมาณ 34 กรัมต่อลิตร เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดของ TMAH-Dual Doped และเนื่องจากสาร TMAH-Dual Doped จะมีจุดเด่นในด้านอัตราการกัดและทำให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบ ดังนั้นอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่น้อยมากจึงสามารถทำให้ลดขั้นตอนการสร้างชั้นหน้ากักป้องกันหรือชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ลงได้ ส่วนพื้นผิวที่เรียบนี้ทำให้ง่ายต่อการทำซ้ำในครั้งต่อไปได้ และที่สำคัญที่สุดการกัดโดยใช้สารละลาย TMAH Dual-Doped นี้ จะไม่มีการทิ้งประจุตกค้างไว้ที่ผิวซิลิคอนจึงทำให้สามารถประยุกต์ใช้ในวงจรรวมได้

แต่อย่างไรก็ตามในการปรับปรุงสภาพพื้นผิวให้เรียบนั้น ไม่ใช่จะมีเฉพาะการเติม TMAH-Dual Doped เพียงเท่านั้น ในงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (isopropyl alcohol; IPA) ลงในสารละลาย TMAH โดยงานวิจัยนั้นพบว่าเงื่อนไขที่ทำให้พื้นผิวซิลิคอนเรียบนั้นคือ การเติม IPA 30 % โดยปริมาตร ลงในสารละลาย TMAH 20 % โดยน้ำหนัก จะพบว่าพื้นผิวมีความเรียบที่สุด เมื่อเปรียบเทียบความขรุขระของผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารเคมีทั้ง 2 เงื่อนไข โดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแรงอะตอมยืนยันผลการทดลอง พบว่า เงื่อนไขทั้งสองส่งผลให้พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดมีความเรียบที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งอยู่ในระดับ 5-10 นาโนเมตรเท่านั้น แต่ในเงื่อนไขของการเติม IPA นั้น ไม่สามารถประยุกต์ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเทอร์ดิเจิตได้ เพราะว่าการเติม IPA ลงในสารละลาย TMAH จะมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่ค่อนข้างรวดเร็วจึงทำให้ขั้วไฟฟ้าที่กัดโดยเงื่อนไขนี้ไม่สามารถคงสภาพอยู่ได้ซึ่งจะแตกต่างจากเงื่อนไขของการใช้สาร TMAH-Dual Doped ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า เงื่อนไขของการเติม IPA ลงในสารละลาย TMAH ไม่มีความเหมาะสมในการสร้างตัวตรวจวัดแสงในวิทยานิพนธ์นี้

ในส่วนของการศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ที่มีขั้วไฟฟ้าเป็นแบบอินเทอร์ดิเจิตซึ่งทำการสร้างโดยใช้สารละลาย TMAH-Dual Doped เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Doped นั้น พบว่ากระแสมืด (dark current) ของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองแบบที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้า 2, 4 และ 6 ขั้ว อยู่ในช่วง 0 ถึง 10 ไมโครแอมป์ โดยกระแสมืดนั้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนขั้วไฟฟ้ามากขึ้น และกระแสมืดตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM จะมีค่ามากกว่าแบบ MSM เนื่องจากมาจากกระแสมืดจะเพิ่มขึ้นตามพื้นที่ของรอยสัมผัสขั้วที่เพิ่มมากขึ้นและเนื่องจากเนื่องจากโฟโตมาส์ที่ใช้ในการสร้างลวดลายเป็นการติดฟิล์มลงบนกระจกใส ดังนั้นลวดลายที่ได้จึงไม่คมชัดมากนักจึงสามารถถูกสารเคมีจากกระบวนการกัดเป็ยกเซาะบางส่วน ทำให้เกิดกระแสมืดที่มากขึ้นตามมุมของขั้วไฟฟ้า

เมื่อทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโดยกระบวนการกัดนั้น ตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM จะมีพื้นที่รับแสงที่มากกว่าแบบ MSM ถึง 1.7 เท่า ดังนั้นจึงทำให้กระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM มีค่ามากกว่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และเมื่อเพิ่มความเข้มแสงตกกระทบมากขึ้นจะส่งผลให้มีกระแสแสงที่มากขึ้นเช่นกันเนื่องจากความเข้มแสงที่เพิ่มมากขึ้นเปรียบเสมือนความหนาแน่นของโฟตอนที่ตกกระทบลงบนพื้นที่รับแสงมากขึ้นจึงกระตุ้นให้มีอัตราการเกิดคู่อิเล็กตรอนและโฮลมากขึ้นกว่าเดิม โดยตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM และ UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัล ซึ่งเปรียบเทียบจากกรณีช่องรับแสงเดี่ยวหรือขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ที่ความเข้มแสงสูงสุด 25,000 ลักซ์ และแรงดันไบอัส 10 โวลต์ มีค่ากระแสแสงเท่ากับ 14.29 และ 47.83 ไมโครแอมป์ ตามลำดับ โดยตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM จะมีค่ากระแสแสงมากกว่าแบบ MSM ถึง 3.34 เท่า ซึ่งเป็นไปตามโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีพื้นที่รับแสงมากกว่าแบบ MSM และผลของการเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าที่มากขึ้นพบว่า เมื่อจำนวนขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มากขึ้นจะทำให้ตัวตรวจวัดแสงนั้นมีพื้นที่รับแสงที่มากขึ้นกว่าแบบ 2 ขั้ว จึงส่งผลให้ตัวตรวจวัดแสงที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าเท่ากับ 6 ขั้ว มีกระแสแสงสูงที่สุดโดยมีค่าเท่ากับ 139.06 ไมโครแอมป์ ซึ่งมากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ที่มีขั้วไฟฟ้า 2 ขั้ว ถึง 2.90 เท่า แต่อย่างไรก็ตามกระแสแสงที่มากขึ้นตามจำนวนขั้วไฟฟ้านี้ยังคงไม่เป็นไปตามทฤษฎีเนื่องจากกระแสมืดที่ค่อนข้างสูงจึงทำให้กระแสมืดหักล้างกระแสแสงส่งผลให้กระแสแสงที่ได้ยังคงไม่เป็นไปตามทฤษฎี

จากการทดลองทั้งหมดจึงสามารถนำสารละลาย TMAH-Dual Doped มาใช้เป็นกระบวนการสร้างพื้นฐานในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM ได้ เนื่องจากมีอัตราการกัดอะลูมิเนียมที่น้อยลงและทำให้พื้นผิวของซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบมากยิ่งขึ้น ในด้านของคุณสมบัติทางไฟฟ้า นอกจากการเพิ่มพื้นที่รับแสงแบบ UMSM ทำให้กระแสแสงมากขึ้นแล้ว การเพิ่มจำนวนขั้วไฟฟ้าแบบอินเตอร์ดิจิตัลที่มีจำนวนขั้วไฟฟ้าที่มากขึ้นก็จะส่งผลให้มีกระแสแสงมากขึ้นด้วย

## เอกสารอ้างอิง

- [1] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ดีไวซ์**. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด วี.เจ.พรินต์ติ้ง. 2551.
- [2] ดุสิต เครื่องงาม. **สิ่งประดิษฐ์ออปโตอิเล็กทรอนิกส์ ฟิสิกส์ เทคโนโลยี และการใช้งาน เล่มที่ 1**. กรุงเทพมหานคร : สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. 2542.
- [3] ธเนศ โชะเหม. **“การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาสมา”**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548.
- [4] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. **รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : โรงพิมพ์มีนเซอร์วิส ซัพพลาย. 2558.
- [5] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. **“ลักษณะเฉพาะทางแสงและทางไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาสมา”**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2547.
- [6] งามจิต มงคลธนานนท์. **“การศึกษาการกัดแผ่นซิลิคอนแบบร่องรูปด้วยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM”**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [7] ธนกฤต แสงโฮง. **“การสร้างตัวตรวจวัดแสง Al/n-Si/Al โครงสร้าง UMSM โดยเทคนิคการกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซโทรปิก”**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559.
- [8] วุฒิไกร คำอ่อน. **“การกัดผิวซิลิคอนให้เรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปด้วย”**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [9] ยุทธนา แจ็งอรุณ. **“การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่ม”**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560.
- [10] K. Biswas, S. Kal. “Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon.” **Microelectronics Journal**, vol.37, 2006. pp 519-525.
- [11] K. Biswas, S. Das, D.K. Maurya, S. Kal and S.K. Lahiri. “Bulk micromachining of silicon in TMAH-based etchants for aluminum passivation and smooth surface.” **Microelectronics Journal**, vol.37, 2006. pp 321-327.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [12] มานิตา ดวงแสง. “การศึกษาการออกแบบ การสร้าง และลักษณะสมบัติของโฟโตไดโอด โครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบอินเตอร์ดิเจิต.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2549.
- [13] ฉลาด พันธุ์แก้ว. “แสง.” [Online]. Available: <https://www.nectec.or.th/schoolnet/library/create-web/10000/science/10000-7348.html>. 2545.
- [14] Blueestrella. “ทวิภาพของคลื่นและอนุภาค.” [Online]. Available: <http://rnmatomicphysics.blogspot.com/2012/05/14.html>. 2555
- [15] Institute of Physics. “Light – waves or particles?.” [Online]. Available: <http://practicalphysics.org/light-%E2%80%93-waves-or-particles.html>. 2016.
- [16] Srisawatwittayakarn School. “ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก.” [Online]. Available: <https://atomic1073.wordpress.com/2013/02/23/10-ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก/>. 2013.
- [17] Van Zeghbroeck B.J., Patrik W., Halbout J.-M., and Vettiger P., “105 GHz Bandwidth Metal-Semiconductor-Metal Photodiodes.” **IEEE Electron Device Letters**, vol. 9, no.10, October, 1988. pp. 527-529.
- [18] Chou S.Y., Liu Y., Khalil W., Hsiang T.Y., and Alexandrou S., “Ultrafast Nanoscale Metal-Semiconductors-Metal Photodetectors on Bulk and Low Temperature Grown GaAs.” **Journal of Applied Physics Letters**, vol.61, no.7, August, 1992. pp. 819-821.
- [19] S.M. Sze., D.J. Coleman, Jr. and A. Loya. “Current Transport in Metal-Semiconductor-Metal (MSM) Structure.” **Solid-State Electronics**, vol.14, 1971. pp.1209-1218.
- [20] สมเกียรติ ศุภเดช. **เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์**. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพมหานคร : ห้างหุ้นส่วนจำกัด มิน เซอร์วิส ซัพพลาย. 2557.
- [21] S. Khunkhao, Y. Yasumura, K. Kitagawa, T. Masui and K. Sato. “On Laterally Spreading of Space-Charge-Region in Planar Metal-Semiconductor-Metal Structures.” **Solid-State Electronics**, vol.47, no.10, October, 2003. pp.1811-1816.
- [22] S. Niemcharoen, K. Kobayashi, M. Kimura and K. Sato. “Voltage Dependence of Photocurrent in Metal-Semiconductor-Metal Structures under Front-Illuminated Condition.” **Solid-State Electronics**, vol.45, no.10, October, 2001. pp.1815-1819.
- [23] วิบูลย์ ตั้งวงโรตมบุญกุล. “Micromachining Technologies.” **Technology Promotion**, vol.37, no.211, June-July, 2010. pp. 79-82.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] ศุภกิตต์ พรหมวิกร. “การสร้างสวิตซ์ความเร่งโดยวิธีการลิโธกราฟีด้วยรังสีเอ็กซ์.” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. 2552.
- [25] Venkata Ramesh Mamilla, Kommuri.Sai Chakradhar. “Micro Machining For Micro Electro Mechanical Systems (MEMS).” **Procedia Material Science**, vol.6, 2014. pp. 1170-1177.
- [26] Avinash P. Nayak, Logeeswaran VJ and M. Saif Islam. “Wet and Dry Etching.” [Slide]. California: University of California. 1994.
- [27] Avinash P. Nayak, Logeeswaran VJ and M. Saif Islam. “Dry Etching.” [Slide]. California: University of California. 2002.
- [28] 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**, vol.22, 2012. pp. 1-7.
- [29] Prem Pal, Kazuo Sato, Miguel Angel Gosalvez and 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**, vol.18, no.6, 2010. pp. 1345-1356.
- [30] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, M. Tsunekawa and S. Ito. “Roughness of single-crystal silicon surface etched by KOH water solution.” **Sens. Actuators A**, vol.73, 1999. pp. 122-130.
- [31] A. Reisman, M. Berkenbit, S.A. Chan, F.B. kaufman and D.C. Green. “The controlled etching of silicon in catalyzed ethylenediamine-pyrocatechol-water solutions.” **J. Electrochem. Soc.**, vol.126, 1979. pp. 1406-1415.
- [32] U. Schnakenberg, W. Benecke and P. Lange. “TMAH etchants solution for silicon micromachining.” **Solid-State Sensors and Actuators (Transducers’91)**, vol.24-28, 1991. pp. 815-818.
- [33] Ping-Hei Chen, Hsin-Yah Peng, Chia-Ming Hsieh and Minking K. Chyu. “The characteristic behavior of TMAH water solution for anisotropic etching on both Silicon substrate and SiO<sub>2</sub> layer.” **Sensors and Actuators**, vol.93, March, 2001. pp. 132-137.
- [34] ดุสิต ถิ่นมั่น, ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ. “การศึกษาสมบัติของฟิล์มบางของสารกึ่งตัวนำ (CdS)<sub>1-x</sub>(ZnTe)<sub>x</sub> ที่เตรียมโดยวิธีการระเหยสารเคมีด้วยความร้อนในระบบสุญญากาศ.” โครงการพิเศษปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2558.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [35] Kamonwan S., Jirawat P. and Surasak N. “Study of UMSM Photodetectors Fabrication Technique by Silicic Acid Added in TMAH Solution.” **International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS2018)**, vol.2, March, 2018. pp. 761-764.
- [36] Chemical Book. “**Ammonium Persulfate.**” [Online]. Available: [http://www.Chemicalbook.com/ChemicalProductProperty\\_EN\\_CB7156919.htm](http://www.Chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB7156919.htm). 2017.
- [37] M.A. Gosalvez, B. Tang, K. Sato, Y. Kimura and K. Ishibashi. “Orientation- and concentration-dependent surfactant adsorption on silicon in aqueous alkaline solution: explaining the changes in the etch rate, roughness and undercutting for MEMS applications.” **JOURNAL OF MICROMECHANICS AND MICROENGINEERING**, vol.19, 2009. pp. 1-18.
- [38] Wikipedia. “**Silicic acid.**” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Silicic\\_acid](https://en.wikipedia.org/wiki/Silicic_acid). 2018.
- [39] Nissa Garcia. “**What is Isopropyl Alcohol?-Uses,Structure&Formula.**” [Online]. Available: <https://study.com/academy/lesson/what-is-isopropyl-alcohol-uses-structure-formula.html>. 2018.
- [40] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์, นิธิยา รัตนานนท์. “**Oxidation reaction / ปฏิกิริยาออกซิเดชัน.**” [Online]. Available: [www.foodnetworksolution.com/wiki/word/557/oxidation-ปฏิกิริยาออกซิเดชัน](http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/557/oxidation-ปฏิกิริยาออกซิเดชัน). 2018.
- [41] วิลาสินี วุฒิธรสกล. “การเคลือบฟิล์มบางแบบสปัตเตอร์ริง (Sputtering Deposition).” **บทความวิชาการ MTEC**, มกราคม-มีนาคม, 2541. หน้า 75-76.
- [42] TMEC. “**บริการสร้างฟิล์มโลหะอลูมิเนียมด้วยเทคนิคสปัตเตอร์ริง.**” [Online]. Available: <http://tmec.nectec.or.th/services/detail/id/90a940e9407b5f4c632ffdf5664f7f63/lang/th>. 2011.
- [43] อรุณี หลักคำ, วิทวัช วงศ์พิศาล และ สินธุ จันทพันธ์. “วิศวกรรมพื้นผิว ตอนที่ 3 กระบวนการสร้างฟิล์มบางด้วยไอเคมีและไอทางกายภาพใต้สภาวะสุญญากาศ.” **บทความวิชาการ MTEC**, กรกฎาคม-กันยายน, 2557. หน้า 33-42.
- [44] TMEC. “**บริการสร้างฟิล์มบางด้วยเทคนิคพีอีซีวีดี.**” [Online]. Available: <http://tmec.nectec.or.th/services/detail/id/8a07387235379f01ff61629bcfe0ad89/lang/th>. 2010.
- [45] พัชรินทร์ บุญยีน. “**การแก้สมการตรีโกณมิติ (Solving Trigonometric Equations).**” [Online]. Available: <http://krupatcharin.wordpress.com/2012/11/27/เอกลักษณ์เอกลักษณ์ตรีโกณมิติ-identities/>. 2012.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [46] N. Fujitsuka, K. Hamaguchi, H. Funabashi, E. Kawasaki and T. Fukada. "Aluminum Protected Silicon Anisotropic Etching Technique Using TMAH with an Oxidizing Agent and Dissolved Si." *R&D Review of Toyota CRDL*, vol.39, no.2, March, 2004. pp. 34-40.
- [47] Dong Chen, ShiBin Liu, JinTao Liang, XiaoWei Hou, Bo Guo, ShangLin Yang and Hui Lv. "Research on increasing silicon etch rate in deep wet etching with tetramethyl ammonium hydroxide etchant." *J. of NANOENGINEERING AND NANOSYSTEMS*, vol.229, 2015. pp.136-140.
- [48] สถาบันนวัตกรรมและพัฒนาระบบการเรียนรู้มหาวิทยาลัยมหิดล. "Electron microscope กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน." [Online]. Available: <http://www.il.mahidol.ac.th/e-media/nano/Page/Unit4-5.html>. 2018.
- [49] Thikhamporn J., Kamonwan S. and Surasak N. "Enhancement Efficiency of UMSM Photodetectors by Doping AP and IPA in TMAH Solutions for Fabrication Process." *International MultiConference of Engineers and Computer Scientists (IMECS2018)*, vol.2, March, 2018. pp. 727-730.
- [50] ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, วุฒิไกร คำอ่อน, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. "การศึกษาการกัดผิวซิลิคอนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู โดยเทคนิคการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลาย TMAH." *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล*, ครั้งที่ 9, พฤษภาคม, 2560. หน้า 556-559.
- [51] วุฒิไกร คำอ่อน, ทิฆัมพร จันทร์เพ็ญ, จีรวัดน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ. "การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู." *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล*, ครั้งที่ 9, พฤษภาคม, 2560. หน้า 508-514.
- [52] งามจิต มงคลธนานนท์, จีรวัดน์ ปราบเขต, รังสรรค์ เมืองเหลือ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ. "การศึกษาการกัดร่องรูปตัวยูสำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสง UMSM โดยสารละลาย TMAH." *การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล*, ครั้งที่ 8, ฉบับที่ 1, 2559. หน้า 177-180.
- [53] M.M. Makhlof, H.V. Guthy. "The aluminum-silicon eutectic reaction: mechanisms and crystallography." *Journal of Light Metals*, vol.1, no.4, November, 2001. pp. 199-218.



## ภาคผนวก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานทางวิชาการของงานวิจัยนี้ที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] Thikhamphorn Jarpen, Kamonwan Sutticharoen, Surasak Niemcharoen, “Enhancement of UMSM Photodetectors Efficiency by Doping AP and IPA in TMAH Solutions for Fabrication Process.” International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018., Volume 2, pp : 727-730.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Lecture Notes in Engineering and Computer Science**

**IMECS 2018**

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

Volume II

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

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

**IA ENG**

International Association of Engineers

ISBN: 978-988-14048-8-6

ISSN: 2078-0958

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Enhancement Efficiency of UMSM Photodetectors by Doping AP and IPA in TMAH Solutions for Fabrication Process

Thikhamporn Jampen, Kamonwan Sutticharoen and Surasak Niemcharoen, *Member, IAENG*

**Abstract**— This paper presents electrical characteristics and finds the conditions in UMSM photodetectors fabrication by chemical wet etching process. Isopropyl alcohol (IPA) and ammonium peroxodisulfate (AP) technique was doped into tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) solutions. Using n-type silicon wafers these have resistivity as 5-10 ohm-cm. It was found that doping 7 gm/l AP with 5wt% TMAH, surface of silicon was etched smoother than adding 30 %vol IPA into 25 wt% TMAH solutions approximately 5 times. Then measure the electrical characteristics of UMSM photodetectors to determine dark current and photocurrent. UMSM photodetectors was fabricated by 5%wt TMAH solutions 7 gm/l AP added technique with leakage current and photocurrent are 7  $\mu$ A and 57.7  $\mu$ A, respectively. And UMSM photodetectors was fabricated by 25 %wt TMAH solutions 30 %vol IPA added technique with dark current and photocurrent are 8.9  $\mu$ A and 46.1  $\mu$ A, respectively. According to this study found that TMAH solutions with AP added is suitable for design photodetector in further research.

**Index Terms**— photodetector, TMAH, chemical wet etching, smooth surface

## 1. INTRODUCTION

A photodetectors is a device that measures the intensity of light that can be converted to electrical characteristics by absorbing the energy of photons to stimulate the release of free carriers [1]. In this research, we are studied the MSM (metal-semiconductor-metal) photodetectors structure. MSM photodetectors is a photodetector device containing two schottky contacts. MSM structure's characteristics are low capacitance, good stability, high sensitivity, planar devices, simple fabrication process and most importantly, it can be easily integrated circuit [2]. For these characteristics, research has been conducted to improve the efficiency of the MSM photodetectors.

From the previous research, MSM photodetectors had a simple fabrication process and not too complicated which, we called that planar structure. However, planar structure

has only sensor area depending on the spacing of the electrodes. In this work, sensor area of the photodetectors is increased without increasing the spacing of the electrodes by the etching process of the surface of the sensor area (figure 1) [3]. Etching process is divided into two types are wet etching and dry etching. In this research, wet etching is used in the fabrication process. It has the advantage that it is harmless and no complicated equipment preparation [4].

In this experiment, Tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) was used in the experiments where TMAH solutions had no toxicity problems, thus providing greater safety than other chemicals. TMAH solutions is anisotropic etching, which makes the surface of the photodetectors look like a U-shaped [3]. We call these fabrication processes that the process of fabrication a U-shaped MSM (UMSM) photodetectors. Comparison of isopropanol alcohols (IPA) [6] and ammonium peroxodisulfate (AP;  $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) [5] was doped into TMAH solutions to reduce the surface roughness to be smooth. The roughness will have the least effect on the electrical characteristics of the UMSM photodetectors.



Fig 1. Cross section of planar MSM (a) and U-shaped MSM (b) photodetectors.

## II. EXPERIMENTAL

N-type (resistivity 5-10  $\Omega$ -cm) single crystal (100) silicon wafer were used for fabrication process of UMSM photodetectors. Initially, an aluminum metal layer of thickness around 2  $\mu$ m was deposited by RF magnetron sputtering process and a silicon dioxide layer of thickness around 2.4  $\mu$ m was grown by PECVD process. Square electrode windows of UMSM photodetectors were opened at the front side of the wafer by photolithography process. Then, some areas of silicon dioxide layer, aluminum layer and native oxide were removed using BOE, special aluminum etchant and HF 5%, respectively. By process flow was described in Figure 2. Finally put the samples into the next etching process.

Etching solutions were prepared by adding IPA into TMAH solutions and mixing AP into TMAH solutions. Experimental process is divided into two parts. First part,

Manuscript received January 2, 2018; revised January 26, 2018. This work was supported in part by the Electronics research center of King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand.

T.Jampen is with the Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand; e-mail: autaiask@gmail.com

K.Sutticharoen is with the Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok Thailand; e-mail: ksutticharoen@gmail.com

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

etching studies with 25wt% TMAH solutions and adding IPA 10 vol%, 20vol% and 30vol%, respectively. Second part, etching studies with 5wt% TMAH solutions and doping AP 5, 6, 7 and 8 gm/l, respectively. A temperature of 80 °C and 200 rpm of magnetic stirring are defined for use in the etching process.

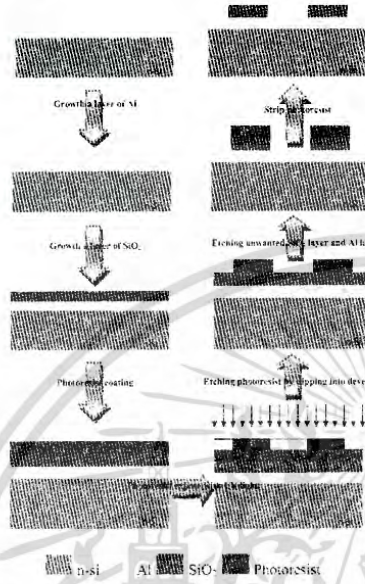


Fig 2. Fabrication process of MSM photodetectors fabrication.

The etched samples (figure 3) were analyzed using a tencor p-10 surface profilometer and the etch rates were calculated using the step data obtained from the profilometer. Surface roughness of silicon was observed using scanning electron microscope (SEM). Electrical characteristics was performed by Cascade Microtech M150 probe station, uses a halogen lamp to control the workpiece exposure. The values are as follows: 5.000 10.000 15.000 20.000 25.000 lux and bias voltage from -10 V to 10 V



Fig 3. Front view of the etched samples

III. RESULTS AND DISCUSSIONS

A. The etched surface morphology of UMSM photodetectors and etching rate of Si (100)

From Figure 4, the etched surface morphology of silicon

was etched by both conditions. It found that the surface of the silicon is quite smooth. Surface roughness may be caused by the amount of hydrogen bubbles that are generated at the surface of the silicon during the etching process, which is the regenerative reaction of the chemical solution. Thus, the addition of IPA and AP results in a reduction in the amount of hydrogen bubbles [5], [6]. However, the chemical reaction of IPA and AP are different. As shown in Figures 5 and 6, respectively.

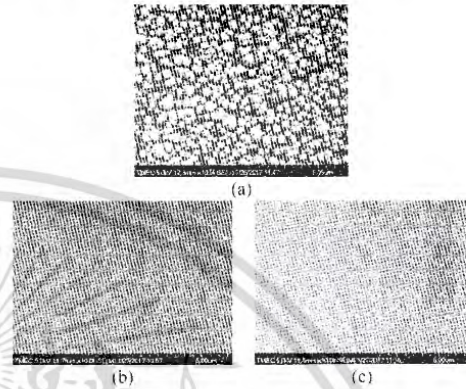


Fig 4. SEM macrophotograph of silicon (100) after etching in (a) pure 5 wt% TMAH (b) TMAH 25% wt+ IPA 30% vol at 80 C and (c) TMAH 5% wt+ AP 7 g/l at 80 C

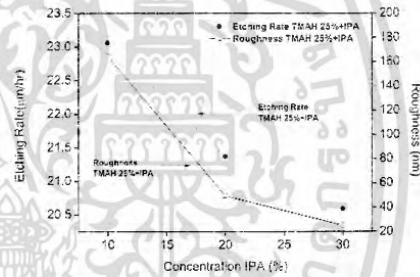


Fig 5. Etch rates and surface roughness of Si (100) with 25 wt% TMAH solutions and adding IPA concentrations at 80 °C.

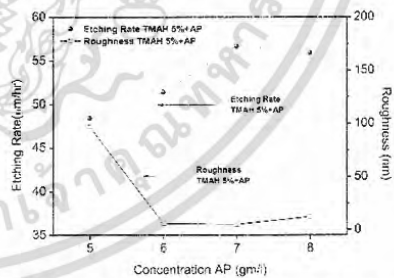


Fig 6. Etch rates and surface roughness of Si (100) with 25 wt% TMAH solutions and doping AP concentrations at 80 °C.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

In the present study, when added to the IPA solutions with 25 wt% TMAH, the etched silicon surface becomes smoother than pure 25 wt% TMAH solutions because IPA is a surfactant. As a result, a large bubble of hydrogen gas at silicon surface decrease with the surface tension of the solution decreased, so that the surface of the silicon is quite smooth[6]. It was found that when the IPA increased, the rate of etching decreased (figure 5). Due to IPA was the surfactant of the solution, the addition of IPA to TMAH solutions resulted in a slower chemical reaction. However, the surface of silicon has the least roughness of 25 nm when was etched by adding 30 vol% IPA concentrations into 25 wt% TMAH solutions.

In Figure 6, it was found that when the higher AP concentration resulted in surface of silicon was smooth. Surface roughness was eliminated by the oxidation agents of AP, which reduces the roughness of the silicon surface [7]. The surface of silicon has the least roughness of 5 nm when was etched by doping 7 gm/l AP concentration into 5 wt% TMAH solutions.

**B. Electrical characteristics of UMSM photodetectors**

In designing the UMSM photodetectors structure, it is important to consider depletion region as the first condition because depletion region is the same as sensor area. When lights was detected by sensor area, electrons gain sufficient light energy to move from valence band to conduction band and electrons are generated in conduction band and holes are generated in valence band becomes electron-hole pairs at depletion region. So, photocurrent of UMSM photodetectors increase with depletion region of UMSM photodetectors increased. Depletion region was calculated from equation 1.

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

where W is the depletion region width,  $\epsilon_s$  is the permittivity of the semiconductor,  $V_{bi}$  is the built-in voltage,  $V_A$  is the applied bias, q is the charge of an electron and  $N_D$  is the concentration of donor atoms.

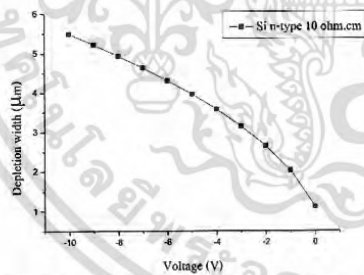


Fig 7. Depletion region width of UMSM photodetectors at different the applied bias.

When applying the bias voltage to -5 V and -10 V, depletion region is extended to 4µm and 5.5µm, respectively (figure 7). The expanded depletion region is used to

calculate the appropriate depth of structure for UMSM photodetectors.

In this experiment, UMSM photodetectors will be tested in the absence of light. The voltage is generated from -10 V to 10 V, which results in the expansion of the depletion region, causing an electron to move across the potential barrier, become Dark current (leakage current) of the UMSM photodetectors (figure 8) [2].

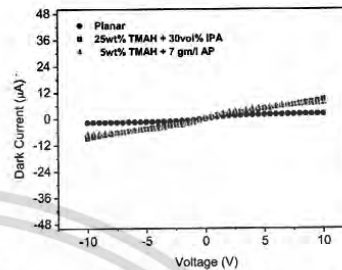


Fig 8. Dark current of planar MSM photodetectors, UMSM photodetectors was fabricated by adding 30 vol% IPA concentrations into 25 wt% TMAH solutions and doping 7 gm/l AP concentration into 5 wt% TMAH solutions.

From Figure.8 the results have shown dark current of planar MSM photodetectors is lower than that of UMSM photodetectors. In the process of fabrication an UMSM photodetectors, chemicals are used in the etching process, whereby these chemicals may cause the discharge of the charge on etched surface. However, an UMSM photodetectors was fabricated by doping 7 gm/l AP concentration into 5 wt% TMAH solutions with a dark current of less than by adding 30 vol% IPA concentrations into 25 wt% TMAH solutions.

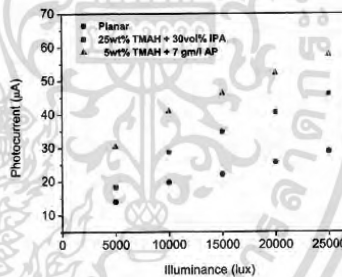


Fig 9. Photocurrent of planar MSM photodetectors, UMSM photodetectors was fabricated by adding 30 vol% IPA concentrations into 25 wt% TMAH solutions and doping 7 gm/l AP concentration into 5 wt% TMAH solutions at bias voltage 10 V with illuminance 5,000, 15,000, 20,000 and 25,000 lux, respectively.

From the concept, planar MSM photodetectors has only sensor area depending on the spacing of the electrodes. It has been added sensor area by etching surface to make a U-shaped MSM photodetectors. And to design the conditions used in the fabrication process to require that sensor areas have the least rough surface, surface roughness

will not affect to electrical characteristics. Then study current and voltage of UMSM photodetectors. Light is affected by illuminance at 5,000, 15,000, 20,000 and 25,000 lux, respectively, as shown in figure 9.

From Figure.9, it was found that photocurrent at illuminance 25,000 lux of UMSM photodetectors was higher than that of planar MSM photodetectors, increase a sensor area by using etching processes. And photocurrent of UMSM photodetectors by doping 7 gm/l AP concentration into 5 wt% TMAH solutions was higher than that by adding 30 vol% IPA concentrations into 25 wt% TMAH solutions, due to the smooth surface, resulting in more photocurrent. As shown in Table 1.

TABLE I  
SHOW THE SURFACE ROUGHNESS, DARK CURRENT AND PHOTOCURRENT OF THE UMSM PHOTODETECTOR USING VARIOUS CONDITIONS IN FABRICATION.

Conditions	Surface Roughness (nm)	Dark current ( $\mu$ A)	Photocurrent ( $\mu$ A)
25wt% TMAH + 30vol% IPA	25	8.9	46.1
5wt% TMAH + 7 gm/l AP	5	7	57.7

#### IV. CONCLUSION

This article has been used to fabricate UMSM photodetectors by adding 30 vol% IPA concentrations into 25 wt% TMAH solutions and doping 7 gm/l AP concentration into 5 wt% TMAH solutions. From the concept, planar MSM photodetectors has only sensor area depending on the spacing of the electrodes. It has been added sensor area by etching surface to make a U-shaped MSM photodetectors. It was found that the process of fabrication an UMSM photodetectors using 5% wt TMAH+7 gm/l AP conditions was optimized for use as an UMSM photodetectors because of its surface roughness of about 5 nm, we can control the roughness of the surface smooth, so we can fabricate a repeatable work. This is different from the rough surface. Photocurrent was 7 and 57.7  $\mu$ A, respectively. It is important to reduce the amount of the TMAH solutions so that it does not waste. In the future, we will improve the structure of the UMSM photodetectors to measure responsivity and quantum efficiency.

#### ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to thank you the Department of Microelectronics Engineering, Faculty of engineering, King mongkut's institute of technology Ladkrabang (Bangkok, Thailand) and Thai Microelectronics Center (Chachoengsao, Thailand) for providing the materials and laboratory to carry out this research.

#### REFERENCES

- [1] M. Piels, J.E. Bowers, "Photodetectors for silicon photonic integrated circuits," Photodetectors: Materials, Devices and Applications (2016), pp. 3-20.
- [2] S. Niemcharoen, "Electrical and optical characterization of planar Mo/n-Si/Mo structures," Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang., Bangkok, Thailand, 2004.
- [3] N. Mongkonthanont, "Study on crystalline silicon etching u-shaped by TMAH solutions from fabrication UMSM photodetector," M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang., Bangkok, Thailand, 2016.
- [4] Ping-Hei Chen, Hsin-Yah Peng, Chia-Ming Hsieh, Minking K. Chyu, "The characteristic behavior of TMAH water solutions for anisotropic etching on both Silicon substrate and SiO<sub>2</sub> layer," Sensors and Actuators A 93 (2001), pp. 132-137.
- [5] K. Biswas, S. Kal, "Etch characteristics of KOH, TMAH and dual doped TMAH for bulk micromachining of silicon," Microelectronics Journal 37 (2006), pp. 519-525.
- [6] I. Zube, M. Kramkowska, "The effect of isopropyl alcohol on etching rate and roughness of (1 0 0) Si surface etched in KOH and TMAH solutions," Sensors and Actuators A Physical 93 (2001), pp. 138-147.
- [7] K.Suttijaleru, J. Prabket, R. Muanghlua, S. Niemcharoen, "Fabrication of UMSM Photodetectors by adding Ammonium Peroxodisulphate in TMAH solutions," EENET9 (2017), pp. 532-535.

**Thikhamporn Jarnpen** received B.Sc degree in Applied Physics Science from King mongkut's institute of technology Ladkrabang. Currently, is the Postgraduate Student at the Microelectronics Engineering, Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering of King mongkut's institute of technology ladkrabang, Thailand. His research focuses on semiconductor devices and CMOS sensor platform.



**Kamonwan Sutticharoen** received B.Sc degree in Applied Physics Science from King mongkut's institute of technology Ladkrabang. Currently, is the Postgraduate Student at the Microelectronics Engineering, Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering of King mongkut's institute of technology ladkrabang, Thailand. His research focuses on semiconductor devices and CMOS sensor platform.



**Surasak Niemcharoen** received the B.Sc degree in Material Science from Chiangmai University, Thailand M.Eng and D.Eng degree in Electrical Engineering from King mongkut's institute of technology ladkrabang, Thailand. Currently, is the Lecturer at Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering of King mongkut's institute of technology ladkrabang, Thailand. His research interest nanomaterial, semiconductor devices, thin film technology and CMOS sensor platform



## ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นายทิมพ์พร จันทรเพ็ญ
วัน เดือน ปีเกิด	25 เมษายน 2537
ที่อยู่	107/62 ซอยบึงขวาง 1/1 แขวงแสนแสบ เขตมีนบุรี จังหวัดกรุงเทพมหานคร 10510
ประวัติการศึกษา	2558 วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความสนใจและความ ชำนาญเฉพาะด้าน	1.) สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor devices) 2.) กระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor devices process) 3.) สิ่งประดิษฐ์ทางแสง (Optical devices)

### ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์

- [1] Thikhamphorn Jarpen, Kamonwan Sutticharoen, Surasak Niemcharoen, "Enhancement of UMSM Photodetectors Efficiency by Doping AP and IPA in TMAH Solutions for Fabrication Process." International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2018., Volume 2, pp : 727-730.
- [2] ทิมพ์พร จันทรเพ็ญ, วุฒิไกร คำอ่อน, นรินทร์ อติวงศ์แสงทอง และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ. "การศึกษาการกัดผิวซิลิคอนเพื่อใช้ในกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูโดยเทคนิคการเติมไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ลงในสารละลาย TMAH." การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 556-559.
- [3] วุฒิไกร คำอ่อน, ทิมพ์พร จันทรเพ็ญ, จีรวัดน์ ปราบเขต และ สุรศักดิ์ เนียมเจริญ "การเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู" การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมไฟฟ้ามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล ครั้งที่ 9, หน้า 508-511.