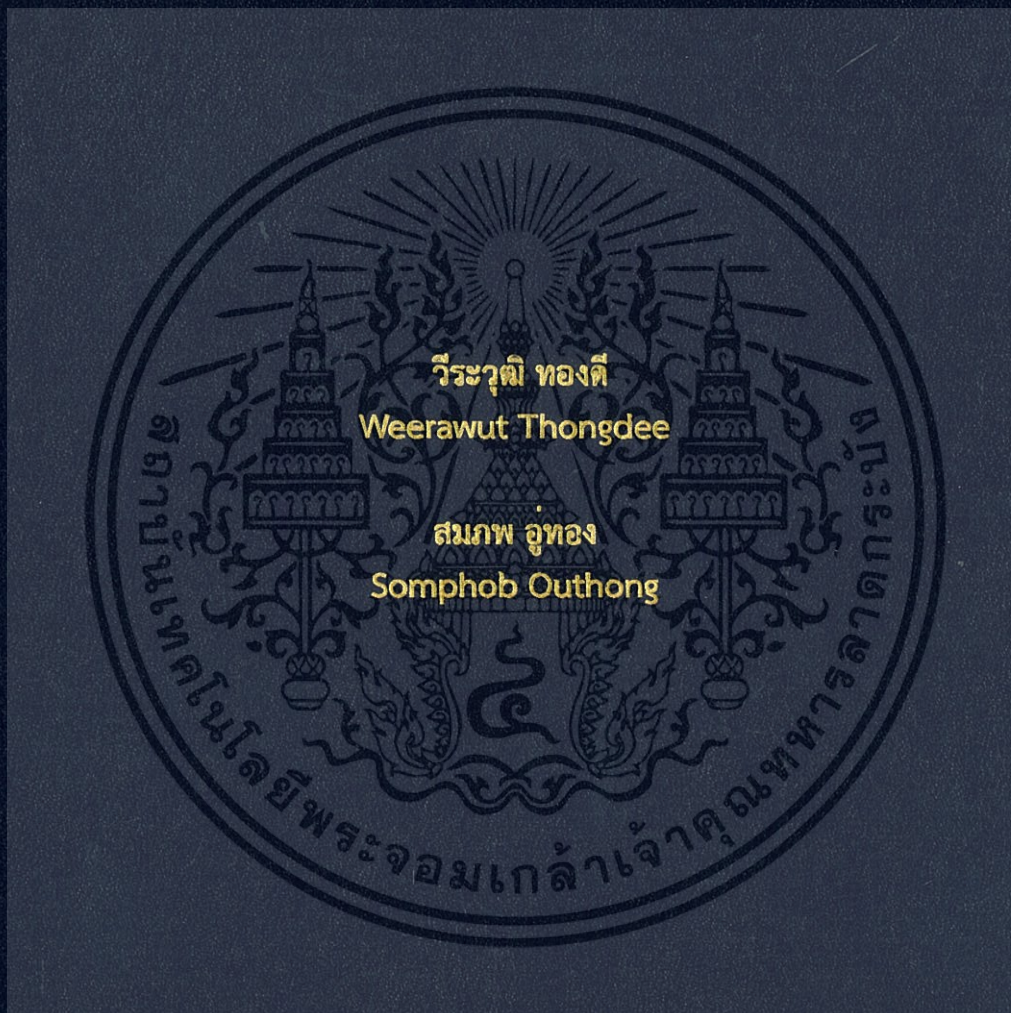


อิทธิพลของเงื่อนไขการกัดตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วยที่มีต่อลักษณะสัณฐาน
พื้นผิวซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม AP และกรด Silicic

Influence of Etching U-Shape Photodetector Conditions on Morphological
Silicon Surface by TMAH Solution Adding AP and Silicic Acid



ปริญญาานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2560

อิทธิพลของเงื่อนไขการกัดตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่มีต่อลักษณะสัญญาณ
พื้นผิวซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม AP และกรด Silicic

Influence of Etching U-Shape Photodetector Conditions on Morphological
Silicon Surface by TMAH Solution Adding AP and Silicic Acid



ปริญญานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
พ.ศ.2560

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รายงานวิชาโครงการ 2 ปีการศึกษา 2560

ภาควิชา วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะ วิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อิทธิพลของเงื่อนไขการกัดตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่มีต่อลักษณะสัญญาณพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม AP และกรด Silicic

Influence of Etching U-Shape Photodetector Conditions on Morphological Silicon Surface by TMAH Solution Adding AP and Silicic Acid

ผู้จัดทำ

นายวีระวุฒิ ทองดี รหัสประจำตัว 57011207

นายสมภพ อุ๋ทอง รหัสประจำตัว 57011302

รายงานนี้ผ่านการตรวจสอบโดยอาจารย์ที่ปรึกษาแล้ว

(รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ)

อาจารย์ที่ปรึกษา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการงาน	อิทธิพลของเงื่อนไขการกัดตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วยที่มีต่อลักษณะสัญญาณพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม AP และกรด Silicic
นักศึกษา	นายวีระวุฒิ ทองดี รหัสประจำตัว 57011207 นายสมภพ อยู่ทอง รหัสประจำตัว 57011302
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต
ภาควิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
ปีการศึกษา	2560
อาจารย์ที่ปรึกษาโครงการงาน	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยที่ใช้กระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ทำให้จะเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสงโดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยใช้สารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethylammonium Hydroxide : TMAH) ที่ผ่านการเติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต (Ammonium Peroxodisulphate : AP) และกรด silicic เพื่อศึกษาลักษณะสัญญาณของพื้นผิวซิลิคอน ซึ่งโครงการนี้ได้ทำการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นมาเพื่อใช้เป็นหน้ากปกป้องกันการกัด จากนั้นทำการกัดโดยใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/L เติมสาร AP ปริมาณ 11.5 g/L ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่พื้นผิวซิลิคอนมีความเรียบเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงขึ้น หลังจากนั้นจะใช้ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง, กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเครื่องมือวัดค่าความลึก (Profilometer) เพื่อทำการตรวจสอบและวิเคราะห์ลักษณะสัญญาณของพื้นผิวซิลิคอน และจะทำการวัดลักษณะทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่เราได้สร้างขึ้น ทั้งในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบและไม่ได้รับแสงตกกระทบ หลังจากนั้นจะนำผลการทดลองที่ได้มาเปรียบเทียบกับเงื่อนไขที่กัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยสาร IPA และเงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH กัดพื้นผิวซิลิคอนเพียงอย่างเดียว พบว่าในเงื่อนไขที่เติมทั้งสาร AP และกรด Silicic นั้นจะมีอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนมากกว่าเงื่อนไขที่เติมด้วยสาร IPA ถึง 3 เท่า ในขณะที่พื้นผิวมีความเรียบใกล้เคียงกัน ซึ่งจากผลของการเติมสาร AP เข้าไปนั้น นอกจากจะมีคุณสมบัติที่ทำให้พื้นผิวของซิลิคอนมีความเรียบแล้วยังมีส่วนไปช่วยเพิ่มอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนของสารเคมีที่ใช้ด้วย และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วยที่ใช้เงื่อนไขในการกัดเดียวกันนี้ จะมีกระแสแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบถึง 5 เท่า ดังนั้นการทดลองนี้จึงจะเป็นการศึกษาที่มีส่วนสำคัญอย่างมากต่อการสร้างตัวตรวจวัดแสงในอนาคต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Project Title	Influence of Etching U-Shape Photodetector Conditions on Morphological Silicon Surface by TMAH Solution Adding AP and Silicic Acid.
Student	Mr.Weerawut Thongdee Student ID 57011207 Mr.Sompob Outhong Student ID 57011302
Degree	Bachelor of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2017
Project Advisor	Assoc. Prof. Dr.Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This report is presents the UMSM photodetector fabrication by wet chemical method to obtain anisotropic silicon etching. The experiment start from growth the oxide to protected on etching process, etching silicon surface at the distance between the electrodes of the photodetector in order to increase the exposure area to the photodetector without the need to increase the distance between the electrodes by tetramethyl ammonium hydroxide (TMAH) adding ammonium peroxydisulfate (AP) and silicic for study influence of etching U-Shape photodetector conditions on morphological silicon surface. Then, etching silicon surface with TMAH solution 5 wt.% by adding Silicic 34 g/l and added AP 11.5 g/l. Optical Microscope, Scanning Electron Microscope (SEM) and Profilometer has been used for analysis on this experiment to study morphological silicon surface and electrical properties of the photodetector. Finally, compare the result with 5 wt.% TMAH conditions and TMAH added IPA conditions found that Si etching rate of TMAH added silicic acid and AP conditions more than TMAH added IPA conditions around 3 times, the photodetector etching by TMAH added silicic acid and AP conditions there is the photocurrent more than a planar structure approximately 5 times. Therefore, both morphological silicon surface and electrical properties are part the main factor that will be used for create the photodetector in further research.

กิตติกรรมประกาศ

รายงานฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รองศาสตราจารย์ ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางและการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในงานโครงการ ตลอดจนให้ความรู้ อบรมสั่งสอน จนบรรลุตามเป้าหมายที่ตั้งใจไว้ด้วยดีทุกประการ

ขอขอบคุณศูนย์เครื่องมือวัดส่วนกลาง วิทยาลัยนวัตกรรมการผลิตขั้นสูงที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์ Optical Microscope ในการวิเคราะห์ชิ้นงาน

ขอขอบคุณนายยุทธนา แจ้งอรุณ, นายวุฒิไกร คำอ่อน และนางสาวกมลวรรณ สุทธิเจริญ ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ รวมทั้งให้คำแนะนำในด้านวิชาการที่มีประโยชน์ต่อโครงการนี้ และขอขอบคุณรุ่นพี่และเพื่อนๆทุกคนที่ให้ความช่วยเหลือในทุกด้าน

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่คอยให้กำลังใจ ช่วยเหลือและแนะนำสิ่งต่างๆ ในชีวิต รวมถึงบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวชื่อนามทุกท่านที่ให้คำแนะนำช่วยเหลือในการจัดทำโครงการฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี ข้าพเจ้าขอขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สำหรับคุณประโยชน์อันพึงเกิดจากโครงการเล่มนี้ ขอมอบให้แก่คณาจารย์ที่เคารพทุกท่าน ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ซึ่งเป็นสถานที่ให้ความรู้และประสบการณ์ในการทำโครงการฉบับนี้

วีระวุฒิ ทองดี
สมภาพ อุ่ทอง

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการ.....	4
2.1 ตัวตรวจวัดแสง.....	4
2.1.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล.....	4
2.1.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส.....	5
2.1.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบ.....	6
2.2 การกัก.....	8
2.2.1 การกักแบบเปียก.....	8
2.3 การกักแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก.....	11
2.3.1 ปฏิบัติการกักซิลิคอน.....	11
2.3.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน.....	12
2.3.3 ปฏิบัติการกักต่อลุ่มิเนียม.....	13
2.4 สารละลายที่ใช้ในการกักเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นผลึกซิลิคอน.....	13
2.4.1 การกักเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH.....	13
2.4.2 Ammonium peroxodisulfate.....	15
2.4.3 Silicic acid.....	16
2.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	17
2.5.1 เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี.....	17
2.5.2 น้ำยาไวแสง.....	17
2.6 กระบวนการซินเตอร์ริง.....	19

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 3 กระบวนการสร้างและการทดลอง.....	21
3.1 การออกแบบลวดลายสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสง.....	21
3.2 กระบวนการสร้าง.....	22
3.2.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน.....	22
3.2.2 กระบวนการสปัตเตอร์ริง.....	22
3.2.3 วิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา.....	23
3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี.....	25
3.2.5 กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน.....	28
3.3 การทดลอง.....	30
3.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง.....	30
3.3.2 เครื่องมือวัดค่าความลึก.....	30
3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	31
3.3.4 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า.....	31
3.3.5 การวัดการตอบสนองทางแสง.....	32
บทที่ 4 ผลการทดลอง.....	33
4.1 ศึกษาลักษณะพื้นฐานของพื้นผิวซิลิคอน.....	33
4.2 ศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย.....	39
4.3 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและแบบ ร่องรูปตัวยู.....	42
4.3.1 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ไม่ได้รับ แสงตกกระทบ.....	43
4.3.2 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ได้รับแสง ตกกระทบ.....	45
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	48
เอกสารอ้างอิง.....	49

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH.....	14
2.2 การซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ของรอยสัมผัสอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับซิลิคอน.....	20
4.1 แสดงผลกระทบของการเติมกรด Silicic ต่ออัตราการกัดโลหะอะลูมิเนียม.....	34
4.2 ผลกระทบของการเติมสาร AP ต่อขนาดฐานของปิรามิดหลังผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมด้วยกรด silicic 34 g/l.....	37
4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนหลังผ่านการกัดด้วยสารเคมี.....	39
4.4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนของสารละลาย.....	42



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1	5
2.2	6
2.3	6
2.4	7
2.5	9
2.6	9
2.7	10
2.8	12
2.9	15
2.10	15
2.11	16
2.12	16
2.13	19
3.1	21
3.2	23
3.3	23
3.4	24
3.5	26
3.6	23
3.7	28
3.8	29
3.9	29
3.10	29
3.11	30
3.12	30
3.13	32

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ลักษณะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู.....	33
4.2 ภาพจากกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะของผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/l และสาร AP 7 g/l.....	35
4.3 ภาพจากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/l โดย (ก) เติมด้วยสาร AP 9 g/l (ข) เติมด้วยสาร AP 9.5 g/l (ค) เติมด้วยสาร AP 10 g/l (ง) เติมด้วยสาร AP 10.5 g/l (จ) เติมด้วยสาร AP 11 g/l และ (ฉ) เติมด้วยสาร AP 11.5 g/l.....	35
4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนในระนาบ(100) กับ ปริมาณของสาร AP ที่เติมลงไป.....	38
4.5 กราฟแสดงความลึกของพื้นผิวหลังผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5% เติมกรด silicic 34 g/l และสาร AP 11.5 g/l เปรียบเทียบกับการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5% เพียงอย่างเดียว.....	40
4.6 กราฟแสดงอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนระหว่างการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5% เติมกรด silicic 34 g/l และสาร AP 11.5 g/l เปรียบเทียบกับการกัดด้วย สารละลาย TMAH 5%.....	41
4.7 ตัวตรวจวัดแสงขณะทำการกระบวนการขึ้นเตออริง.....	43
4.8 แผนภาพชุดการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ..	43
4.9 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ และ โครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	44
4.10 แผนภาพชุดการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ....	45
4.11 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ.....	45
4.12 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ	46
4.13 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ เชิงราบ และโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะที่ได้รับแสงความเข้มแสง 25,000 lux.....	47

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1 บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญ

อิเล็กทรอนิกส์เป็นเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับวงจรไฟฟ้าที่ประกอบด้วยชิ้นส่วนและอุปกรณ์ไฟฟ้า เช่น ตัวนำไฟฟ้า ตัวต้านทานไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ หลอดสุญญากาศ ทรานซิสเตอร์ และ ไดโอด เป็นต้น ซึ่งชิ้นส่วนหรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์คือ ปัจจัยที่สำคัญเพราะชิ้นส่วนต่างๆ เหล่านี้ จะถูกนำไปใช้งานในวงจรที่ออกแบบไว้ เพื่อให้วงจรนั้นสามารถทำงานตามที่ต้องการได้ ยกตัวอย่างเช่น ควบคุมการไหลของอิเล็กตรอน ทำให้สามารถขยายสัญญาณอ่อนๆ ให้แรงขึ้นเพื่อการสื่อสารทางภาพและเสียง ถูกใช้กันอย่างแพร่หลายในการสื่อสารข้อมูลโทรคมนาคม หรือความสามารถของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เปิดปิดวงจรถูกนำไปใช้ในวงจรลอจิกเกต ซึ่งเป็นส่วนสำคัญหลักในระบบคอมพิวเตอร์ นอกจากนี้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ยังถูกนำไปใช้ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าในครัวเรือน การผลิตพลังงานทดแทน การส่งพลังงานไฟฟ้าเป็นระยะทางไกลๆ และอุตสาหกรรมต่างๆอีกมากมาย ในยุคเริ่มต้นของอิเล็กทรอนิกส์นั้น หลอดสุญญากาศเป็นหนึ่งในชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ที่เก่าแก่ที่สุด ใช้เป็นชิ้นส่วนหลักในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จนถึงกลางทศวรรษที่ 1980 เนื่องจากหลอดสุญญากาศ มีขีดจำกัดในการทำงาน มีขนาดใหญ่ ขณะทำงานมีความร้อนเกิดขึ้นสูง และมีประสิทธิภาพในการทำงานต่ำ แต่หลอดสุญญากาศยังคงถูกใช้ในบางงานที่ต้องการความสามารถพิเศษ เช่น เครื่องขยายสัญญาณวิทยุกำลังสูง จอภาพ อุปกรณ์ภาพและเสียงสำหรับมืออาชีพบางชนิด และอุปกรณ์ไมโครเวฟต่างๆ

ซึ่งต่อมาได้มีการค้นพบ ชิ้นส่วนอิเล็กทรอนิกส์ชนิดใหม่ โดยชิ้นส่วนเหล่านี้ทำมาจากสารกึ่งตัวนำ และถูกเรียกว่า “สิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ” สารกึ่งตัวนำเป็นวัสดุไฟฟ้าที่มีคุณสมบัติอยู่ระหว่างตัวนำและฉนวน มีการค้นพบมานานพร้อมๆ กับวัสดุชนิดอื่นๆ แต่มีได้นำมาใช้ประโยชน์อย่างจริงจังจนกระทั่งปี พ.ศ.2490 ซึ่งมีการคิดค้นทรานซิสเตอร์ได้สำเร็จเป็นครั้งแรก สารกึ่งตัวนำจึงได้รับความสนใจ และมีบทบาทในการพัฒนาวิทยาการด้านอิเล็กทรอนิกส์อย่างมาก เพราะสามารถทำงานทดแทนหลอดสุญญากาศได้เกือบทั้งหมด ทำให้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์มีขนาดเล็ก น้ำหนักเบา กินไฟฟ้าน้อย และมีราคาถูก ในปัจจุบันสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำได้ถูกพัฒนา และสร้างขึ้นด้วยเทคโนโลยีขั้นสูง ซึ่งเทคโนโลยีเหล่านี้มีความก้าวหน้าและพัฒนาไปอย่างรวดเร็วมาก จนเข้ามามีบทบาทในชีวิตประจำวันของมนุษย์ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง โดยเฉพาะ ด้านการสื่อสารและโทรคมนาคม ด้านคอมพิวเตอร์ ด้านระบบควบคุม ด้านงานอุตสาหกรรม ด้านการแพทย์ และอุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าต่างๆในชีวิตประจำวัน

ในที่นี่เราได้ทำการศึกษากระบวนการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำทางแสง ได้แก่ ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) ซึ่งเป็นงานอิเล็กทรอนิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสง หรือถูกเรียกว่า อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Optical Electronics) ตัวตรวจจับแสง เป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งมีความไวต่อรังสีของแสง (Optical radiation) และสามารถเปลี่ยนพลังงานแสง ให้เป็นกระแสไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง เนื่องจากการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า ทั้งความเร็ว ความแม่นยำ ความเที่ยงตรง และความประหยัด เมื่อเทียบกับระบบเดิม โดยตัว

ตรวจวัดแสงจะอยู่ในวงจรภาครับ (Receiving) เพื่อแปลงข้อมูลที่เป็นสัญญาณแสงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า แล้วแสดงออกที่ด้านเอาต์พุต ซึ่งการทำงานลักษณะนี้ถูกเรียกว่า ดิมอดูเลเตอร์ (Demodulator) นอกจากนี้แล้ว ยังอาจถูกนำไปใช้ในการวัดความเข้มของแสง ในวงจรสวิตช์แสง เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น [1] ตัวตรวจวัดแสง มีโครงสร้างแบบ โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือโครงสร้าง MSM ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จัดอยู่ในประเภท กลุ่มของซีออตต์กีย์ไดโอด มีวัตถุประสงค์เพื่อนำมาใช้เป็นตัวตรวจวัดแสง โดยมีโครงสร้างเป็นรอยสัมผัสซีออตต์กีย์ 2 รอยสัมผัสต่อกันแบบหันหลังชนกัน มีคุณสมบัติเด่นคือ สัญญาณรบกวนต่ำ ความจุไฟฟ้าต่ำ ทำงานด้วยความเร็วสูง มีเสถียรภาพที่ดี มีสภาพการตอบสนองที่ดี มีโครงสร้างแบบพลาแนร์ที่ง่ายต่อกระบวนการสร้าง และที่สำคัญสามารถออกแบบและทดสอบ รวมทั้งสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีงานวิจัยที่ทำการศึกษาและพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง MSM กันมาอย่างต่อเนื่อง

จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้กระบวนการกัด (etching) พื้นผิวของพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะชนิด Al/n-Si/Al เพื่อทำการเพิ่มพื้นที่รับแสงโดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า[2] ซึ่งจะเป็นการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching) โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethylammonium Hydroxide : TMAH) และมีการเติมสารไอโซโพรพิลแอลกอฮอล์ (Isopropyl alcohol : IPA) เข้าไปเพื่อทำให้พื้นผิวซิลิคอนที่ถูกกัดนั้นมีความเรียบมากขึ้นและช่วยให้อัตราการกัดซิลิคอนสูงขึ้น ซึ่งมีลักษณะการกัดเป็นร่องรูปตัวยู หรือ U-shape จากการค้นคว้าและหาข้อมูล ได้พบสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์โซลฟेट (AP) ซึ่งมีคุณสมบัติคล้ายกับสาร IPA แต่ว่าสาร AP นั้นมีราคาที่ถูกกว่าและไม่ระเหยออกไปเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น เราจึงทำการใช้ สาร AP แทนการใช้สาร IPA อย่างไรก็ตามการเติมสาร AP เข้าไปนั้นจะช่วยให้อัตราการกัดซิลิคอนสูงขึ้น แต่ก็ทำให้อัตราการกัดขั้วอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นไปด้วย เราจึงได้แก้ไขปัญหานี้โดยการเติมกรด Silicic เพิ่มเข้าไปเพื่อลดอัตราการกัดของขั้วอะลูมิเนียมลงซึ่งเมื่อเติมกรด Silicic เพิ่มเข้าไปนั้นจะส่งผลกระทบต่อพื้นผิวซิลิคอนด้วย โดยในโครงการนี้เราจะทำการศึกษาอิทธิพลของเงื่อนไขการกัดตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่มีต่อลักษณะสัญญาณพื้นผิวซิลิคอนโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม AP และ Silicic

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการ

โครงการนี้จะนำเสนอลักษณะสัญญาณพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM ซึ่งจะทำกรกัดพื้นผิวซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก โดยใช้สารละลาย TMAH ที่ผ่านการเติมด้วย Ammonium Peroxodisulphate (AP) และกรด Silicic โดยมีวัตถุประสงค์ของโครงการดังต่อไปนี้

1. ศึกษากระบวนการใช้เครื่องมือและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM
2. ศึกษาลักษณะสัญญาณพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM หลังจากผ่านการกัดด้วยสารเคมี
3. ศึกษาอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนของสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยสาร AP และกรด Silicic
4. ศึกษาลักษณะสมบัติกระแส และแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMSM

1.3 ขอบเขตการวิจัยและขั้นตอนการศึกษา

จากวัตถุประสงค์ของโครงการนี้ที่ต้องการศึกษาลักษณะสัณฐานพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM โดยผ่านการกัดพื้นผิวซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH ที่ผ่านการเติมด้วยสาร AP และกรด Silicic ซึ่งในการศึกษาแบ่งได้เป็น 2 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนแรกทำการศึกษาลักษณะสัณฐานพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMMSM ที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่มีการเติมสาร AP และกรด Silicic ลงไปในสารละลาย เพื่อที่จะกำหนดเงื่อนไขในการสร้างตัวตรวจวัดแสงที่เหมาะสม

ส่วนที่สองทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM และทำการศึกษาลักษณะทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงขณะที่ได้รับแสงและไม่ได้รับแสงตกกระทบ

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากโครงการ

1. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย TMAH ที่มีการเติมสาร Ammonium Peroxodisulphate (AP) และกรด Silicic ลงไปในสารละลาย TMAH
2. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีและกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM
3. ความรู้ความเข้าใจเกี่ยวกับทฤษฎีทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง UMMSM

บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการ

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ หรือ MSM ชนิด Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู (U-Shape) หรือ UMSM บนแผ่นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น โดยใช้กระบวนการกัดเปียก (Wet Etching) แบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic) ในกระบวนการกัดร่องรูปตัวยู จะใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl Ammonium Hydroxide:TMAH) ที่เติมสารแอมโมเนียมเปอร์รือโคไซด์ซัลเฟต (AP) และกรด Silicic กัดแผ่นผลึกซิลิคอน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึง ตัวตรวจวัดแสงและหลักการทำงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดดีกัย การกัดแบบเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกและสารที่ใช้ในการกัดกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีและกระบวนการขึ้นเตอริง

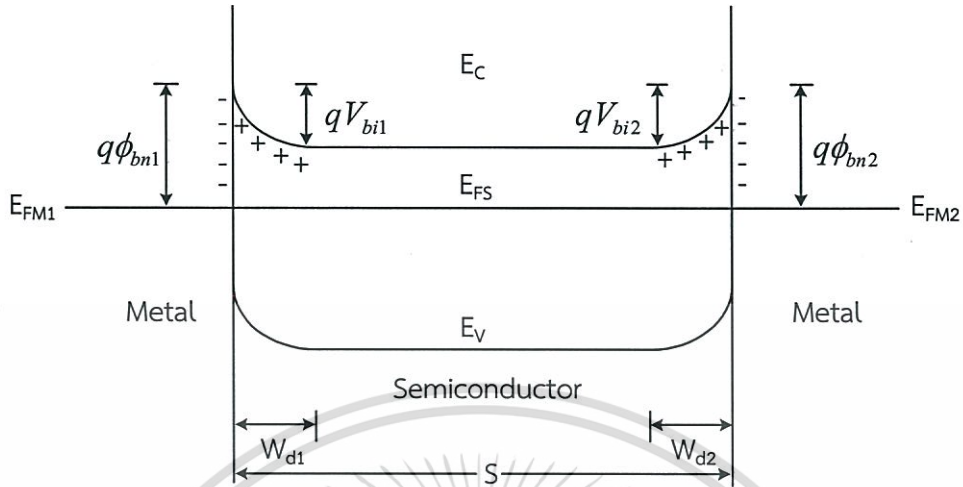
2.1 ตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำชนิดหนึ่ง ซึ่งมีความไวต่อรังสีของแสงและสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ ดังนั้นจึงถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในระบบการสื่อสารด้วยใยแก้วนำแสง นอกจากนี้ยังถูกนำไปใช้งานในการวัดความเข้มของแสงในวงจรสวิตซ์แสง เพื่อควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ เป็นต้น

โดยโครงการนี้มุ่งเน้นศึกษาตัวตรวจวัดแสงมีคุณสมบัติเด่นคือ มีเสถียรภาพที่ดี กระแสรั่วไหลต่ำ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดี กระบวนการสร้างง่าย ประหยัด และที่สำคัญสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย สามารถนำไปใช้ทางด้านงานภาพและแสงได้อย่างกว้างขวาง จึงทำให้ได้รับความสนใจในปัจจุบัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงหลักการทำงาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่เกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสง

2.1.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล

แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสง ในสภาวะสมดุลความร้อนแสดงดังรูปที่ 2.1 จะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้ง โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายกำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (cathode) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (anode) โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทด และขั้วแอโนดจะเป็นโลหะชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้กำแพงศักย์ของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากันหรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ กำแพงศักย์ภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร

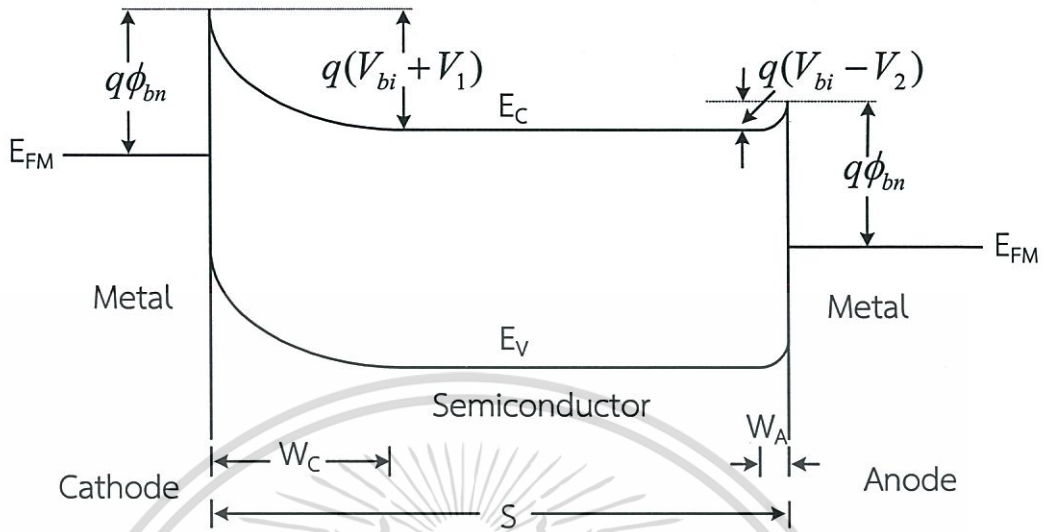


รูปที่ 2.1 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุลความร้อน

2.1.2 ตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่ 2.2 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแคโทด เกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสย้อนกลับ และมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคกีย์ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามืดที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสช็อคกีย์ ส่วนด้านแอโนดที่ได้รับการไบอัสตรง บริเวณหลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้นเนื่องจากการไบอัสตรงค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_2$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากด้านโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำมีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตามไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (dark current : I_{dark}) ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคกีย์ โดยกระแสมืดของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคกีย์ จะเป็นกระแสที่เกิดจากอิเล็กตรอนเท่านั้น เนื่องจากกระแสโฮลที่ถูกฉีดจากรอยสัมผัสด้านแอโนดมีค่าน้อยกว่ากระแสอิเล็กตรอนมาก

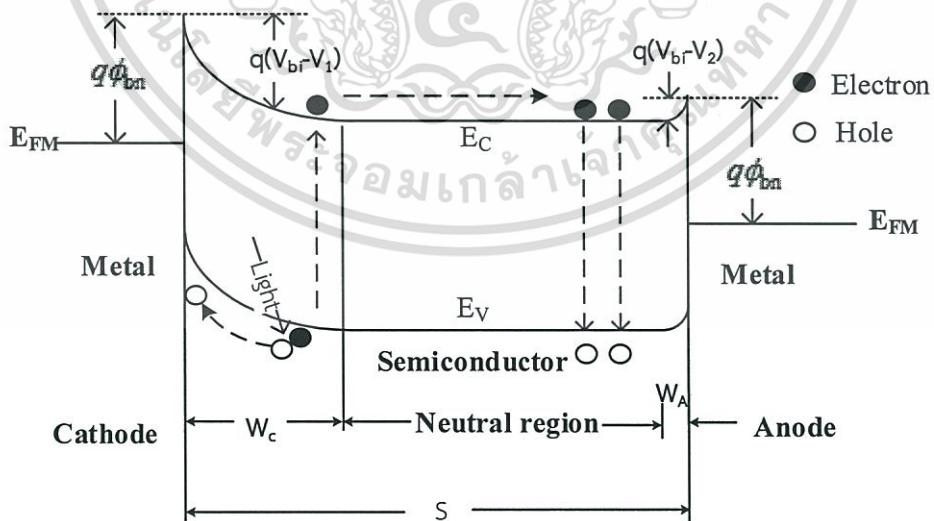
ซึ่งความกว้างบริเวณหลอดพาหะของโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อคกีย์ กรณีที่ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้ามีขนาดกว้าง จะพิจารณาให้ความสำคัญเฉพาะส่วนบริเวณหลอดพาหะที่เกิดทางด้านแคโทดเพียงด้านเดียว เนื่องจากกลไกการเกิดกระแสแสงจะเกิดขึ้นบริเวณหลอดพาหะด้านแคโทดเป็นหลัก ซึ่งจะอธิบายกลไกการเกิดกระแสแสงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 2.2 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

2.1.3 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อมีความเข้มแสงตกกระทบบ

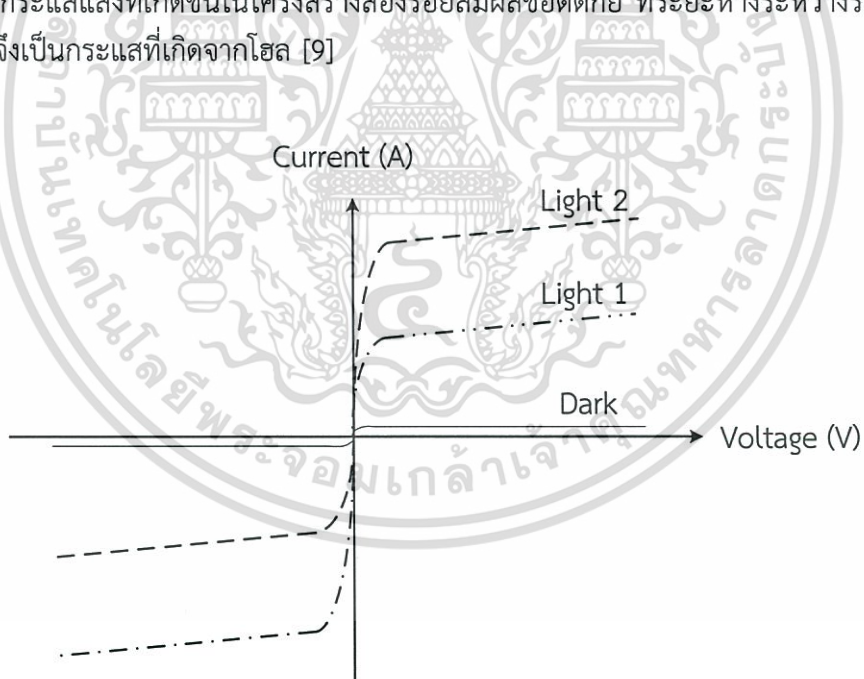
เมื่อโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดเดียวกัน ได้รับแสงตกกระทบบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (S) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อแสงตกกระทบบนพื้นที่รับแสง ซึ่งรวมทั้งส่วนที่เป็นบริเวณปลอดพาหะและบริเวณนิวทริล โดยที่พลังงานโฟตอนต้องมากกว่าหรือเท่ากับขนาดช่องว่างพลังงานของสารกึ่งตัวนำ ($h\nu \geq E_g$) จะเกิดการกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น คู่อิเล็กตรอน-โฮลที่เกิดบริเวณปลอดพาหะจะถูกสนามไฟฟ้าที่มีอยู่ในบริเวณปลอดพาหะเร่งให้เกิดการเคลื่อนที่ โดยโฮลจะเคลื่อนที่ตามทิศของสนามไฟฟ้าเข้าหาขั้วแคโทดเกิดเป็นกระแสไฟฟ้า หรือที่เรียกว่ากระแสแสง (photocurrent : I_{photo}) ส่วนอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่สวนทิศกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ซึ่งจะต้องเคลื่อนที่ผ่านเข้าสู่บริเวณนิวทริล ในบริเวณนิวทริล โฟตอนจะถูกดูดกลืนพลังงานและกระตุ้นให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเช่นเดียวกับในบริเวณปลอดพาหะ แต่เนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น โฮลที่อยู่ในสารกึ่งตัวนำจึงเป็นพาหะส่วนน้อย เมื่อแสงตกกระทบบและมีการกระตุ้นให้เกิดโฮลทำให้ความหนาแน่นของโฮลหรือประจุส่วนน้อยมีเพิ่มมากขึ้น เมื่อความหนาแน่นของประจุพาหะในสารกึ่งตัวนำมีค่าไม่เท่ากันในแต่ละจุดจึงทำให้เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่เกิดขึ้น โดยจะแพร่ไปยังส่วนที่ความหนาแน่นของโฮลต่ำ บางส่วนจะเคลื่อนที่ไปยังขอบของบริเวณปลอดพาหะและถูกสนามไฟฟ้าเร่งเข้าหาขั้วแคโทด แต่โฮลส่วนใหญ่จะเคลื่อนที่ด้วยการแพร่อยู่ในชั้นสารกึ่งตัวนำและเกิดการรวมตัวกับอิเล็กตรอนในที่สุด ส่วนในบริเวณนิวทริลเนื่องจากเป็นสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น อิเล็กตรอนที่เกิดขึ้นจากการกระตุ้นของโฟตอนในบริเวณนิวทริลและอิเล็กตรอนที่เคลื่อนที่ออกมาจากบริเวณปลอดพาหะเป็นประจุพาหะส่วนมากในชั้นสารกึ่งตัวนำจึงไม่เกิดการเคลื่อนที่ด้วยการแพร่ได้ อิเล็กตรอนบางส่วนจึงเกิดการรวมตัวกับโฮลในที่สุด ดังนั้นกระแสแสงที่เกิดขึ้นในโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตักก็ย ที่ระยะห่างระหว่างรอยสัมผัสมีขนาดกว้างจึงเป็นกระแสที่เกิดจากโฮล [9]



รูปที่ 2.4 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบบ

2.2 การกัด

กระบวนการกัดโดยทั่วไปจะเป็นการสร้างลวดลายวงจรในงานอิเล็กทรอนิกส์จะมีกระบวนการกัดมีสองประเภทคือ การกัดแบบเปียก (wet etching) และการกัดแบบแห้ง (dry etching) เมื่อทำการกัดผิวหน้าของวัสดุด้วยสารเคมีหรือก๊าซแล้วนั้นจะทำให้ผิวหน้าของวัสดุมีลักษณะเป็นไอโซทรอปิก (isotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอในทุกทิศทาง หรือแอนไอโซทรอปิก (anisotropic) จะกัดแบบสม่ำเสมอในทิศทางของระนาบ การกัดแบบเปียกมักจะมีอัตราการกัดที่เร็วกว่าการกัดแบบแห้งและสามารถเปลี่ยนแปลงอัตราการกัดได้โดยอุณหภูมิที่แตกต่างกันหรือความเข้มข้นของสารขึ้นอยู่กับการใช้งาน [3-4] อย่างไรก็ตามในโครงการงานเล่มนี้จะไม่ใช้การกัดแบบแห้ง เพื่อสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM แต่จะใช้การกัดแบบเปียกแทนเนื่องจากการกัดแบบแห้งนั้นมีขั้นตอนที่ยุ่งยากและซับซ้อนต่อการใช้งาน

2.2.1 การกัดแบบเปียก (Wet etching)

การกัดแบบเปียกเป็นการกัดผิวหน้าของวัสดุโดยจะใช้สารเคมีที่เป็นของเหลวหรือที่เรียกว่า "etchants" เพื่อกัดส่วนที่ไม่ต้องการออกโดยจะสร้างลวดลายไว้บนผิวหน้าของวัสดุเป็นการกำหนดลวดลายก่อนทำการกัดในส่วนที่ไม่ต้องการออก

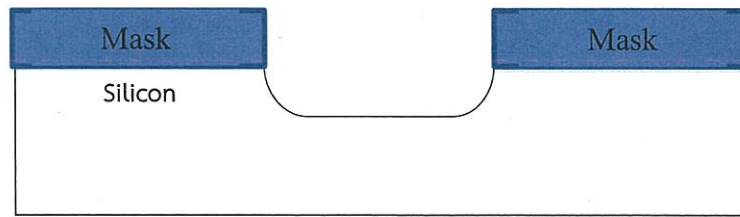
ขั้นตอนในกระบวนการกัดแบบเปียกจะต้องเกิดปฏิกิริยาทางเคมีด้วยสารละลายที่ใช้ในกระบวนการ ดังนั้นในกระบวนการกัดแบบเปียกจะอธิบายได้ 3 ขั้นตอนนี้

- (1) การแพร่กระจายของสารละลายบนผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ
- (2) การเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายและผิวหน้าของวัสดุที่ไม่ต้องการ จะเกิดปฏิกิริยารีดักชัน-ออกซิเดชัน (reduction-oxidation) หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยารีดอกซ์ (redox reaction) ปฏิกิริยานี้จะส่งผลให้ออกซิเดชันของวัสดุที่ละลายแล้วเกิดออกซิเดซ์
- (3) การแพร่กระจายของสารละลายโดยเกิดปฏิกิริยาขึ้นบนพื้นผิวของวัสดุที่มีปฏิกิริยาตอบสนอง [5]

การกัดแบบเปียกจะแบ่งเป็น 2 แบบดังนี้

- (1) การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก (isotropic etching)

การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะมีส่วนผสมของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid) กรดไนตริก (nitric acid) และกรดอะซิติก (acetic acid) เป็นสารละลายที่ใช้สำหรับการกัดซิลิคอน โดยการกัดนั้นจะมีความเข้มข้นของสารละลายที่เป็นกำหนดอัตราการกัดและการกัดส่วนใหญ่ มักใช้ซิลิคอนออกไซด์หรือซิลิคอนไนไตรด์เพื่อเป็นการลดอัตราการกัดลง การกัดด้วยสารเคมีโดยทั่วไปมักจะเป็นลักษณะไอโซทรอปิก ทิศทางของการกัดนั้นมีความสำคัญมากสำหรับรูปแบบการถ่ายโอนความละเอียดสูงดังรูปที่ 2.5 แต่การกัดเปียกแบบไอโซทรอปิกจะไม่นิยมนำมาใช้ทำการกัดซิลิคอน



รูปที่ 2.5 ลักษณะการกัดเปียกแบบไอโซทรอปิก

(2) การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก (anisotropic etching)

สารละลายที่ทำการกัดบนผิวหน้าของวัสดุ ในอัตราที่ต่างแตกต่างกันขึ้นอยู่กับผลึกของวัสดุกับสารละลายที่ใช้ในการกัดซึ่งจะมีความแตกต่างของอัตราการกัดขึ้นอยู่กับระนาบของผลึกในวัสดุ เช่น ซิลิคอนจะเกิดการกัดในลักษณะแบบแอนไอโซทรอปิกสูงมาก สารละลายบางตัวเท่านั้นที่จะทำให้เกิดการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกได้ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมิน ไพโรคาทิกอล (EDP) และเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกในระนาบ (100) จะมีลักษณะเป็นร่องรูปตัวยูแสดงในดังรูปที่ 2.6 [6]

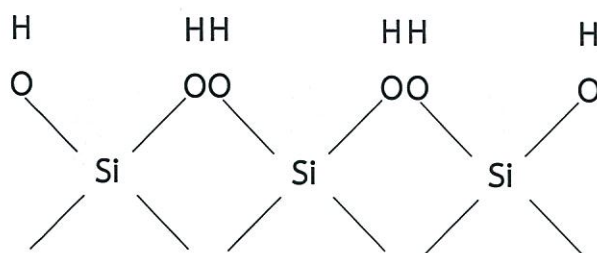


รูปที่ 2.6 ลักษณะการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก

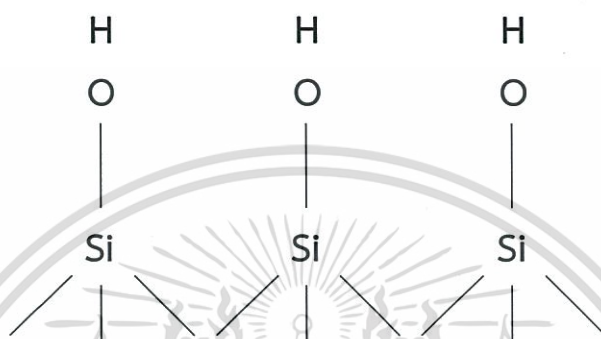
กลไกของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Mechanism of Anisotropic Etching)

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมีรายละเอียดเป็นอัตราการกัด, การเกิดปฏิกิริยาและพื้นผิวของวัสดุ แสดงให้เห็นว่ากลไกที่ซับซ้อนมีส่วนร่วมในการกัดซิลิคอนในสารละลายที่เป็นต่าง รูปแบบของกลไกนั้นมีปัจจัยอยู่ 3 แบบ (1) สาเหตุทางกายภาพของความแตกต่างในอัตราการกำจัดอะตอมจากพื้นผิวของผลึกทิศทางที่ต่างต่างกัน (2) กระบวนการเกี่ยวกับการเคลื่อนไหวที่เป็นสาเหตุทางกายภาพและ (3) สภาพพื้นผิวที่กำหนดอัตราการกำจัดอะตอมพื้นผิว

ทางกายภาพในประการแรกที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎี back-bond strength นั่นคืออะตอมในพื้นผิวของระนาบ (111) มีสามพันธะเชื่อมต่อกับตาข่ายพื้นผิวในขณะที่พื้นผิวของระนาบ (100) นั้นมีเพียงสองพันธะที่ยึดเกาะอยู่ซึ่งแสดงให้เห็นดังรูปที่ 2.3 พันธะของอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวจะถูกสารละลายชนิด OH^- ดึงออกจากการยึดเกาะของพันธะ จำนวนของพันธะหลัก (back-bond) และความแข็งแรงของพันธะบนพื้นผิวเพื่อที่จะเกิดปฏิกิริยาที่ต่างกันอย่างพื้นผิวของผลึก นี้คือสาเหตุพื้นฐานทางกายภาพของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก



(A) (100) Surface



(B) (111) Surface

รูปที่ 2.7 แผนผังของพันธะซิลิคอน (A) ระนาบ (100) และ (B) ระนาบ (111)

รูปแบบของการจ่ายประจุพาหะนั้นคืออิเล็กตรอนและโฮลที่อยู่บนพื้นผิวของสารกึ่งตัวนำ ชนิดของสารเคมีที่มีผลต่อพื้นผิวของวัสดุ เช่น OH^- , NO_3^- และ H_2O และอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวที่ใช้งานซึ่งเหมาะสำหรับการเกิดปฏิกิริยาและการกำจัด ซึ่งแตกต่างจากอีกสองชนิดที่จ่ายประจุพาหะหรืออาจจะไม่ได้เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยาการสลายตัวแต่อาจจะเป็นปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีของธรรมชาติ ความเข้มข้นของแต่ละชนิดนี้จะถูกกำหนดโดยกระบวนการที่แตกต่างกัน เช่น การแพร่กระจาย (diffusion) การโยกย้าย (migration) การดูดซับ (adsorption) และ solvation (การจับกันในลักษณะเครือข่ายของโมเลกุลตัวทำละลายกับโมเลกุลในสารละลาย) โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของอะตอมซิลิคอนบนพื้นผิวที่ใช้งานขึ้นอยู่กับทิศทางของผลึก

การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลายที่เป็นต่างที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอนที่มีออกไซด์ การเกิดของฟิล์มออกไซด์ขึ้นจะปกปิดบนพื้นผิวของวัสดุซึ่งมีทิศทางที่แตกต่างกันและจะทำให้มีผลต่อการกัดแบบไอโซทรอปิก นอกจากนี้ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถึงแม้จะทำการกัดแบบไอโซทรอปิกอาจเกิดขึ้นภายใต้การควบคุมการแพร่กระจายอย่างใดอย่างหนึ่งหรือการควบคุมการใช้งานของการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกสามารถเกิดขึ้นโดยกระบวนการที่มีการควบคุมพื้นผิวอย่างน้อยสำหรับการกัดพื้นผิว การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกไม่เกิดขึ้นเมื่ออัตราการกัดทั้งหมดของพื้นผิวรวมทั้งสารละลายที่มีอัตราการกัดช้าที่สุดจะขึ้นอยู่กับการกัด ไม่ว่าจะเป็นการจ่ายประจุพาหะที่เกี่ยวข้องกับการเกิดปฏิกิริยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การกัด ประจุพาหะที่มีส่วนเกี่ยวข้องในการกัดแบบไอโซทรอปิกในสารละลาย HF แต่ไม่ได้เกิดขึ้นในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกด้วยสารละลาย KOH [7]

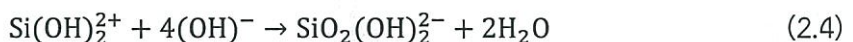
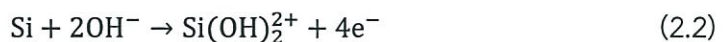
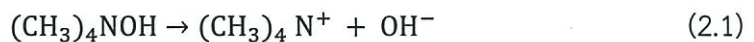
2.3 การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก

2.3.1 ปฏิริยาการกัดซิลิคอน

การกัดซิลิคอนด้วยวิธีที่ประสบความสำเร็จที่สุด คือ การกัดซิลิคอนด้วยสารเคมีหรือกัดด้วยพลาสมา สารเคมีที่กัดกร่อนซิลิคอนได้นั้นมีมากมาย แต่ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยต่างผสมกับน้ำ เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดเอมีน (Ethylenediamine), ไฮดราซีน (Hydrazine), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และ เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ส่วนก๊าซที่ใช้กัดในพลาสมา ได้แก่ CF_4 , SF_6 , Cl_2 และก๊าซฮาโล-หรือฟลูออโร-คาร์บอนอื่นๆ เป็นต้น สารละลายการกัดดังกล่าวเหล่านี้มีทั้งที่มีคุณสมบัติไอโซทรอปิกหรือแอนไอโซทรอปิก อัตราการกัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นหรืออุณหภูมิของสารละลาย สารละลายการกัดเหล่านี้จะกัดวัสดุต่างๆ กันได้ไม่เท่ากัน ดังนั้นการเลือกสารละลายการกัดที่เหมาะสมจึงมีความจำเป็นด้วย

สำหรับปรากฏการณ์การกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในสารละลาย เตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) นั้น มีกลไกกระบวนการกัดดังนี้

- (1) สารละลาย TMAH จะลดรูปเป็นไอออนไฮดรอกซิล [11]
- (2) อะตอมไฮดรอกซิลจะเข้าจับกับแขนว่าง (dangling bond) ของซิลิคอน สำหรับแขนยื่นของซิลิคอนในระนาบ (100) มีสองแขน ในขณะที่เพียงแขนเดียวในซิลิคอนระนาบ (111) ขั้นตอนนี้ใช้พลังงานไอออนไนเซชันเพียง 0.35 อิเล็กตรอนโวลต์ ปฏิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วมาก
- (3) พันธะซิลิคอนหลัก (back bond) ที่ยังไม่ถูกกัดออกไป (เท่ากับ 2 สำหรับระนาบ (100) และเท่ากับ 3 สำหรับระนาบ (111)) จะถูกดึงออกเพื่อรวมตัวกลายเป็น $Si(OH)_2^+$ หรือ $SiOH^3^-$ (เรียกว่า ซิลิคอนไฮดรอกไซด์) ปฏิริยานี้ถ้าให้พลังงานแก่ผลึกต่างกัน อัตราส่วนการกัดของระนาบต่างๆ จะไม่เท่ากัน ที่อุณหภูมิใกล้เคียงเดือดอัตราการระนาบ (110) : (100) : (111) เท่ากับ 160 : 100 : 1 แต่ที่อุณหภูมิห้องจะกับ 50 : 30 : 1
- (4) ซิลิคอนไฮดรอกไซด์ดังกล่าวจะทำปฏิริยากับอะตอมไฮดรอกซิลกลายเป็นกรด Orthosilic acid ซึ่งจะเกิดที่ผิวหน้าและถูกดึงออกสู่สารละลาย
- (5) กรด Orthosilic acid แยกตัวเพื่อรวมกับน้ำ เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ดังสมการเคมีนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานในท้องถิ่นเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ในการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

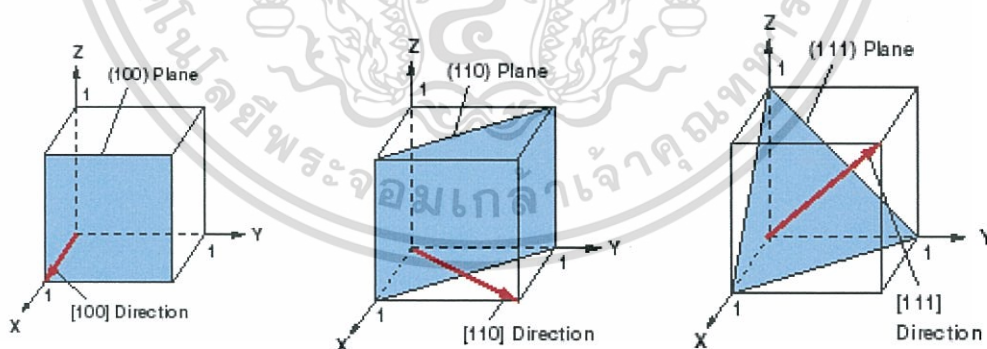
2.3.2 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอน

ในระนาบต่างๆ ของซิลิคอน จะมีจำนวนพันธะที่ถูกตัดออกไปก่อนหน้า (เหลือเป็นแขนยื่น) จำนวนพันธะที่กำลังถูกกัด และจำนวนพันธะที่ถูกดึงออกสู่สารละลายเป็นขั้นตอนต่อไปไม่เท่ากัน กล่าวคือ

- (1) ระนาบ (100) อะตอมที่ถูกกัดจะมีสองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่ถูกดึงอะตอมจากผิวหน้าต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะ
- (2) ระนาบ (111) จะมีสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้า และมีหนึ่งอะตอมถูกตัดออกไปก่อนหน้านี้นี้ จึงเป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุด

สารละลายซึ่งประกอบด้วยส่วนผสมของ สารละลาย เตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ และ น้ำปอลดประจุ มีชื่อย่อว่า (TMAH) เป็นสารละลายที่มีคุณสมบัติการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก อัตราการกัดของ TMAH ในผลึกซิลิคอนในระนาบต่างๆเรียงเป็นลำดับดังนี้ (100) > (111) [4]

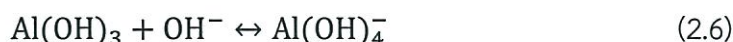
เนื่องจากสารละลาย TMAH เป็นสารละลายที่ทำการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก โครงสร้างของสารละลาย TMAH ต้องเพิ่มอุณหภูมิช่วยในการกัดระนาบของซิลิคอน เพื่อให้สารละลาย TMAH ทำการกัด ควรรู้ว่าโครงสร้างผลึกของซิลิคอน คือโครงสร้างอะตอมประกอบเท่ากับ 5.43 Å เป็นโครงสร้างแบบ Face Centred Cubic (FCC) หรือเรียกว่า โครงผลึกแบบ Diamond แต่มีอะตอมสองอะตอมในหน่วยเซลล์ ในรูปที่ 2.8 โครงสร้างอะตอมของซิลิคอนและ ระนาบต่างๆของผลึกซิลิคอน



รูปที่ 2.8 พันธะในอะตอมซิลิคอนระนาบ (100) ระนาบ (110) และระนาบ (111)

2.3.3 ปฏิกริยาการกัดอลูมิเนียม

การกัดซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิกมีความสำคัญมีความต้องการเลือกใช้อลูมิเนียมเป็นชั้น metallization ฟิล์มอลูมิเนียมจะถูกควบคุมด้วยสารละลายที่เป็นกรดและต่างที่มีค่าความเป็นกรด-ต่างที่สูงอลูมิเนียมไม่สามารถรักษาเพราะชั้นออกไซด์มี $\text{Al}(\text{OH})_3$ ซึ่งทำปฏิกิริยาในสารละลายต่าง อลูมิเนียมตั้งสมการที่ (2.6)



การลดลงของค่าความกรด-ต่างโดยซิลิคอนการเปลี่ยนแปลงสมดุลเคมีไปทางด้านซ้ายของสมการเกิดปฏิกิริยาการเลือกของอลูมิเนียมออกไซด์ในการกัดด้วยสารละลาย TMAH เพิ่มขึ้นด้วยซิลิคอนเราได้พิจารณาแล้วว่าในช่วงการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย TMAH เป็นซิลิคอนเสมอจำเป็นสำหรับฟิล์มอลูมิเนียมออกไซด์ ซิลิเกตในสารละลายที่ทำปฏิกิริยากับ $\text{Al}(\text{OH})_3$ ในรูปแบบซิลิเกต pyrophyllite-type ที่ละลายได้น้อยซึ่งพื้นผิวอลูมิเนียมออกไซด์ [8]

2.4 สารละลายที่ใช้ในการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของแผ่นผลึกซิลิคอน

การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกนั้นจะมีอัตราการกัดที่แตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับขนาดของผลึกซิลิคอน และสารละลายที่ใช้ในการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกมักจะเป็นสารละลายที่มีหมู่ OH เป็นส่วนประกอบแต่สารละลายที่ใช้กันส่วนมาก คือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH), เอธิลีนไดแอมมีนไพโรคาทิกอล (EDP) และเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH)

2.4.1 การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารละลาย TMAH

สารละลายเตตระเมธิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ สูตรทางเคมี $(\text{CH}_3)_4\text{NOH}$ เป็นสารละลายที่มีโครงสร้างของไฮดรอกไซด์ (quaternary ammonium hydroxide) มากที่สุดและเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกในซิลิคอน มีอัตราการกัดออกไซด์ที่ต่ำมากและจะไม่กัดอลูมิเนียมถ้ามีซิลิเกตจำนวนมากพอ สารละลาย TMAH เป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายถึงแม้จะมีราคาที่สูงเพราะเป็นสารละลายที่ไม่เป็นอันตรายหรือไม่มีพิษและเป็นสารละลายที่สามารถใช้กับงาน CMOS ได้ซึ่งมีอัตราการกัดซิลิคอนในระดับปานกลาง-สูง สารละลาย TMAH ที่ทำการกัดซิลิคอนนั้นพื้นผิวจะมีลักษณะขรุขระแต่เมื่อเจือสารละลาย TMAH ด้วยปริมาณที่เหมาะสมของกรดซิลิสิก (silicic acid) และแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (ammonium peroxodisulphate : AP, $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$), ผสมให้ลดการกัดอะลูมิเนียมที่สมบูรณ์พร้อมกับพื้นผิวที่เรียบ[14]

ตารางที่ 2.1 การกัดเป็ยกแบบแอนไอโซทรอปิกของสารละลาย TMAH

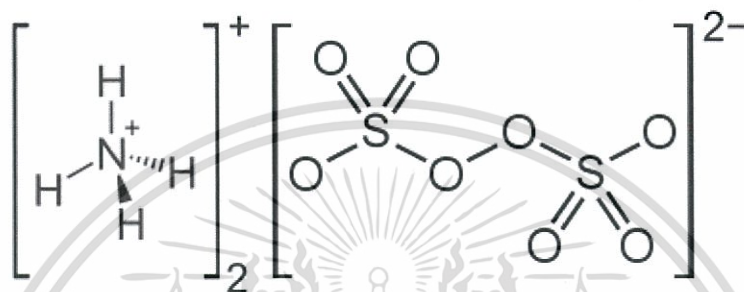
สารละลาย	อุณหภูมิ (°C)	ระนาบ	อัตราการกัด ($\mu\text{m}/\text{min}$)	หมายเหตุ
22% TMAH	90	(100)	0.9	(110) เป็นระนาบที่เร็วที่สุดโดยไม่ต้องลดแรงตึงผิว
		(110)	1.8	
		(111)	0.018	
10% TMAH: 90% H ₂ O	60	(100)	0.28	
	70		0.41	
	80		0.72	
	90		1.2	
	80	(111)	0.014	
2% TMAH: 98% H ₂ O	80	(100)	0.65	
		(111)	0.41	
5% TMAH: 95% H ₂ O	60	(100)	0.33	
	70		0.48	
	80		0.87	
	90		1.4	
	60	(110)	0.64	
	70		0.74	
	80		1.4	
	90		1.8	
	60	(111)	0.026	
	90		0.034	
22% TMAH + 0.5% surfactant	90	(100)	0.6	(100) ได้เร็วที่สุดด้วยสารลดแรงตึงผิว
		(110)	0.12	
		(111)	0.01	
22% TMAH + 1% surfactant	90	(100)	0.6	ลดแรงตึงผิว
		(110)	0.1	
		(111)	0.009	

ในตารางที่ 2.1 แสดงอัตราการกัดซิลิคอนของสารละลาย TMAH สารละลายที่มีความเข้มข้น 4% จะมีอัตราการกัดที่เป็นอิสระ อัตราการกัดซิลิคอนในระนาบ (100) และ (110) จะลดลงเนื่องจากความเข้มข้นของสารละลายที่สูงขึ้น แต่อัตราการกัดจะเพิ่มขึ้นด้วยการเพิ่มปริมาณของซิลิคอนที่ละลายในสารละลาย สารละลายจะเลือกกัดระนาบอื่นๆมากกว่าระนาบ (111) เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลาย KOH อัตราส่วนของอัตราการกัดในระนาบ (100)/(111) ที่มีความเข้มข้นของสารละลายที่แตกต่างกันและที่อุณหภูมิต่างๆ จะมีความเข้มข้นของสารละลาย 25% [10]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.2 Ammonium peroxodisulfate

สารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟตเป็นสารอนินทรีย์ที่มีสมการเคมี $(\text{NH}_4)_2\text{S}_2\text{O}_8$ มีน้ำหนักโมเลกุล 228.2 AMU เป็นเกลือที่มีสีขาว สามารถละลายได้ดีในน้ำมากกว่าเกลือโพแทสเซียม เป็นสารออกซิไดส์ที่แข็งแรงที่ใช้ในวิชาเคมีโพลีเมอร์ ใช้ในอุตสาหกรรมฟอกขาวและอุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์ เตรียมโดยการอิเล็กโทรไลซิสของสารละลายเข้มข้นแบบเย็น ของแอมโมเนียมซัลเฟต หรือแอมโมเนียมไบโซไซฟิลในกรดซัลฟิวริกที่ความหนาแน่นสูง มีแผนผังของพันธะ ดังที่แสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.9 แผนผังของพันธะแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต

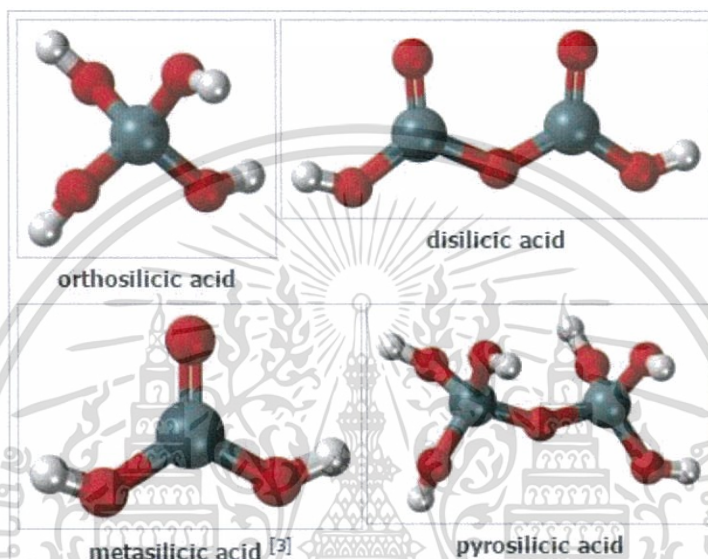


รูปที่ 2.10 ลักษณะทางกายภาพของแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต

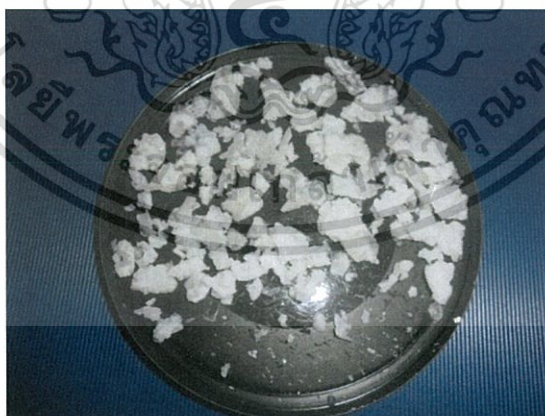
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.3 Silicic acid

กรดซิลิกิกเป็นชื่อทั่วไปของกลุ่มสารประกอบทางเคมีที่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอนที่ยึดติดกับออกไซด์และกลุ่มไฮดรอกซิล สารประกอบของตระกูลนี้มีสูตรทั่วไป $[\text{SiO}_x(\text{OH})_{4-2x}]_n$ กรดซิลิกิกบางชนิดได้รับการระบุไว้แล้วแต่มีเฉพาะในสารละลายที่เจือจางมากเท่านั้น เช่น กรดซิลริกซิลิกิก (H_2SiO_3), กรดอโรซิลิกิก (H_4SiO_4 , $\text{pKa}_1 = 9.84$, $\text{pKa}_2 = 13.2$ ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส) กรดไตรซิลิกิก (H_2SiO_5) และกรดไพโรซิลิกิก (H_6SiO_7) อย่างไรก็ตามในสถานะที่เป็นของแข็งเหล่านี้อาจรวมตัวเป็นรูปแบบของกรดซิลิกิกพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ดังแสดงในรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 แผนผังของพันธะที่ประกอบด้วยธาตุซิลิกอนที่ยึดติดกับออกไซด์และกลุ่มไฮดรอกซิล



รูปที่ 2.12 ลักษณะทางกายภาพของกรด Silicic

โดยทั่วไปปฏิกิริยากรดซิลิกิกเป็นเรื่องยากที่จะควบคุม การคายน้ำบางส่วนไปเป็นกรดเมตาซิลิกิก ซึ่งเป็นสิ่งที่ทำหายเพราะปฏิกิริยามักดำเนินต่อไปจนถึงซิลิกอนไดออกไซด์และน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

2.5.1 เทคนิคโฟโตลิโธกราฟี

โดยทั่วไปแล้วคำว่า ลิโธกราฟี (lithography) หมายถึง การพิมพ์ภาพด้วยแม่พิมพ์เรียบที่เป็นหินหรือโลหะ แต่ในกระบวนการสร้างวงจรรวม เทคนิคของโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) หมายถึง เทคนิคการกัด (Etching) ชั้นสารหรือวัสดุใดๆ ซึ่งส่วนใหญ่มักได้แก่ชั้นซิลิคอนออกไซด์ในบางส่วน หรือในบริเวณที่ต้องการ โดยอาศัยเทคนิคทางแสง (Optical Technique) ซึ่งคล้ายกับเทคนิคในการถ่ายภาพ หรือพิมพ์ภาพ เพราะการที่ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บนแผ่นซิลิคอนบางส่วนถูกกัด หรือละลายออกไป ด้วยสารเคมีที่ทำปฏิกิริยาจะมีผลทำให้เกิดเป็นภาพหรือลวดลายขึ้นบนชั้นซิลิคอนไดออกไซด์นั่นเอง

ในงานทางอิเล็กทรอนิกส์ยุคใหม่ที่เราเรียกว่า “ไมโครอิเล็กทรอนิกส์” ชั้นส่วนของสิ่งประดิษฐ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เช่นไดโอด ทรานซิสเตอร์ จะมีขนาดที่เล็กมาก เช่นมีขนาดเป็นไมโครเมตร ดังนั้นการประดิษฐ์ หรือสร้างส่วนต่างๆ ที่มีขนาดเล็กเช่นนี้ ไม่สามารถทำได้ด้วยอุปกรณ์ทั่วไป ดังนั้นจึงมีวิธีการสมัยใหม่ที่เราเรียกว่า “การสร้างลวดลายไมโครอิเล็กทรอนิกส์” โดยอาศัยเทคนิคด้านแสง หรือรังสีต่างๆ เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) รังสีเอกซ์ (X-Ray) หรือลำเลเซอร์ (Laser) หรือลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ร่วมกับการใช้ภาพต้นแบบ (Image) และสารไวแสงหรือน้ำยาไวแสง (Photo sensitive film) เช่นฟิล์มไวแสงชนิดต่างๆ ทำการพิมพ์ภาพต่างๆ ลงบนชั้นวัสดุใดๆ เช่นซิลิคอนไดออกไซด์ ซิลิคอน หรืออลูมิเนียม เป็นต้น ชั้นสารต่างๆ เหล่านี้จะถูกกัดโดยปฏิกิริยาเคมีจากสารเคมีบางชนิด ทำให้เกิดเป็นภาพหรือลวดลายที่มีขนาดเล็กๆ ได้ วิธีการหรือเทคนิคดังกล่าวถูกเรียกว่า “กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี” หรือบางครั้งเรียกสั้นๆ ว่า “กระบวนการโฟโตเอชชิง” ซึ่งเทคนิคดังกล่าวนี้จะถูกนำมาใช้ในกระบวนการสร้างวงจรรวม กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี นี้ถือได้ว่าเป็นหัวใจสำคัญของเทคโนโลยีวงจรรวม เพราะการเปิดช่องของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขนาดเล็กมากๆ ในระดับไมโครเมตรสามารถทำได้เป็นอย่างดี ดังนั้นเมื่อแพะอะตอมสารเจือเข้าไปในผลึกซิลิคอนในบริเวณพื้นที่เล็กๆเช่นนี้ ทำให้เกิดเป็นชั้นส่วนอุปกรณ์ ที่มีขนาดเล็กๆ ได้ การเพิ่มประสิทธิภาพของเทคนิคโฟโตลิโธกราฟีให้สามารถเปิดชั้นออกไซด์ที่มีขนาดเล็กมากๆ ได้ หมายถึงการเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างอุปกรณ์ไมโครอิเล็กทรอนิกส์นั่นเอง ซึ่งปัจจุบันนี้ เราสามารถสร้างตัวทรานซิสเตอร์ที่มีขนาดเล็กมากกว่าหนึ่งไมโครเมตรได้สำเร็จ ซึ่งเราเรียกเทคนิคนี้ว่า “ซิปไมครอนเทคโนโลยี” เช่นในวงจรรวมระดับ VLSI ซึ่งในพื้นที่ประมาณ 1 ตารางเซนติเมตร จะประกอบไปด้วยทรานซิสเตอร์มากกว่า 1 ล้านตัว นั่นแสดงให้เห็นว่าทรานซิสเตอร์ในวงจรรวมนี้มีขนาดเล็กมาก

2.5.2 น้ำยาไวแสง (Photo – resist)

วัสดุซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอย่างหนึ่งในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟีก็คือ สารไวแสงหรือน้ำยาไวแสง ซึ่งเป็นสารที่สามารถทำปฏิกิริยากับแสงได้ โดยฟิล์มของสารไวแสงนี้ จะถูกนำมาใช้ทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันปฏิกิริยาเคมีที่จะเกิดขึ้นระหว่างวัสดุใดๆ กับสารเคมีบางชนิดที่เป็น Etchant เพราะฟิล์มบางของสารไวแสงนี้จะไม่ทำปฏิกิริยาเคมีกับสารเคมีนั้นๆ คุณสมบัติดังกล่าวถูกนำมาใช้กับการเปิดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อการแพะสารเจือในบางส่วน หากบริเวณใดต้องการให้ชั้นออกไซด์อยู่ก็ใช้ฟิล์มบางของสารไวแสงนี้บังหรือปกคลุมไว้ ส่วนบริเวณใดที่ต้องการกัดชั้นออกไซด์เอกลสารนี้เป็นเอกลสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออก ก็ไม่ต้องมีชั้นสารไวแสงปิดไว้ น้ำยาไวแสงที่นำมาใช้ในกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี โดยทั่วไปจะประกอบด้วยสิ่งสำคัญต่างๆ คือวัสดุที่เป็นสารไวแสง (Photo sensitive material) ส่วนที่เป็นสารละลาย (Solvent) และส่วนที่เป็นสารเพื่อช่วยในการยึดติดกับผิวใดๆ (Epoxy) และโดยการพิจารณาปฏิกิริยาทางเคมีและแสง (Chemical-Photo reaction) ของวัสดุไวแสงที่อยู่ในน้ำยาไวแสง ซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญ ทำให้เราจำแนกน้ำยาไวแสง ออกเป็นชนิดใหญ่ๆ 2 ชนิดคือ

(1) น้ำยาไวแสงชนิดลบ (Negative Photo resist)

หมายถึงน้ำยาไวแสงที่เมื่อฉายด้วยแสง และมีปฏิกิริยา-แสงเกิดขึ้นแล้ว จะทำให้คุณสมบัติของการละลายของการละลายในสารตัวทำละลาย หรือเรียกง่าย ๆ ว่าน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) เปลี่ยนแปลงไป โดยในขณะที่ไม่ทำปฏิกิริยากับแสงจะสามารถละลายได้ดีในสารตัวทำละลาย แต่เมื่อถูกแสงแล้วจะมีคุณสมบัติเปลี่ยนแปลงไปคือ ไม่สามารถละลายได้ น้ำยาไวแสงชนิดลบนี้จะเป็นชนิดเดียวกับที่ใช้ในฟิล์มถ่ายรูปรูปทั่วไป ซึ่งภาพที่ปรากฏบนฟิล์มจะมีลักษณะเป็นภาพเนกาทีฟ (Negative image) คือจะมีสภาพตรงข้ามกับภาพต้นแบบ เช่นเปลี่ยนจากขาวเป็นดำหรือดำเป็นขาว ถ้าต้องการภาพที่เหมือนกับต้นแบบจริงจะต้องนำฟิล์มที่ได้ไปพิมพ์ หรืออัดภาพบนกระดาษอัดภาพอีกทีหนึ่ง จึงจะได้ภาพที่เหมือนต้นแบบ ผลของปฏิกิริยาของเคมี-แสง ของน้ำยาไวแสง ซึ่งจะให้ภาพเนกาทีฟดังกล่าว ทำให้ถูกเรียกว่า น้ำยาไวแสงชนิดลบ

(2) น้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive Photo resist)

น้ำยาไวแสงชนิดนี้จะประกอบด้วยวัสดุสารไวแสง (Photo sensitive) ซึ่งมีคุณสมบัติปฏิกิริยาเคมี-แสง ที่แตกต่างกับกรณีของน้ำยาไวแสงชนิดลบโดยจะให้ผลตรงกันข้าม กล่าวคือเมื่อยังไม่ถูกแสง หรือเมื่อไม่มีปฏิกิริยากับแสงจะมีสมบัติไม่ละลายในสารตัวทำละลาย หรือน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) แต่เมื่อถูกแสงหรือมีปฏิกิริยาแล้ว คุณสมบัติจะเปลี่ยนไป คือสามารถละลายได้ดีในน้ำยาล้าง น้ำยาไวแสงชนิดนี้ จะมีลักษณะเหมือนกับฟิล์มสไลด์ (Slide film) หรือฟิล์มภาพยนตร์ ซึ่งจะให้ภาพบนฟิล์มมีลักษณะที่เป็นภาพโพสิทีฟ (Positive image) ซึ่งเป็นภาพจริงเหมือนกับภาพต้นแบบ ดังนั้นเราจึงเรียกน้ำยาไวแสงชนิดนี้ว่า น้ำยาไวแสงชนิดบวก

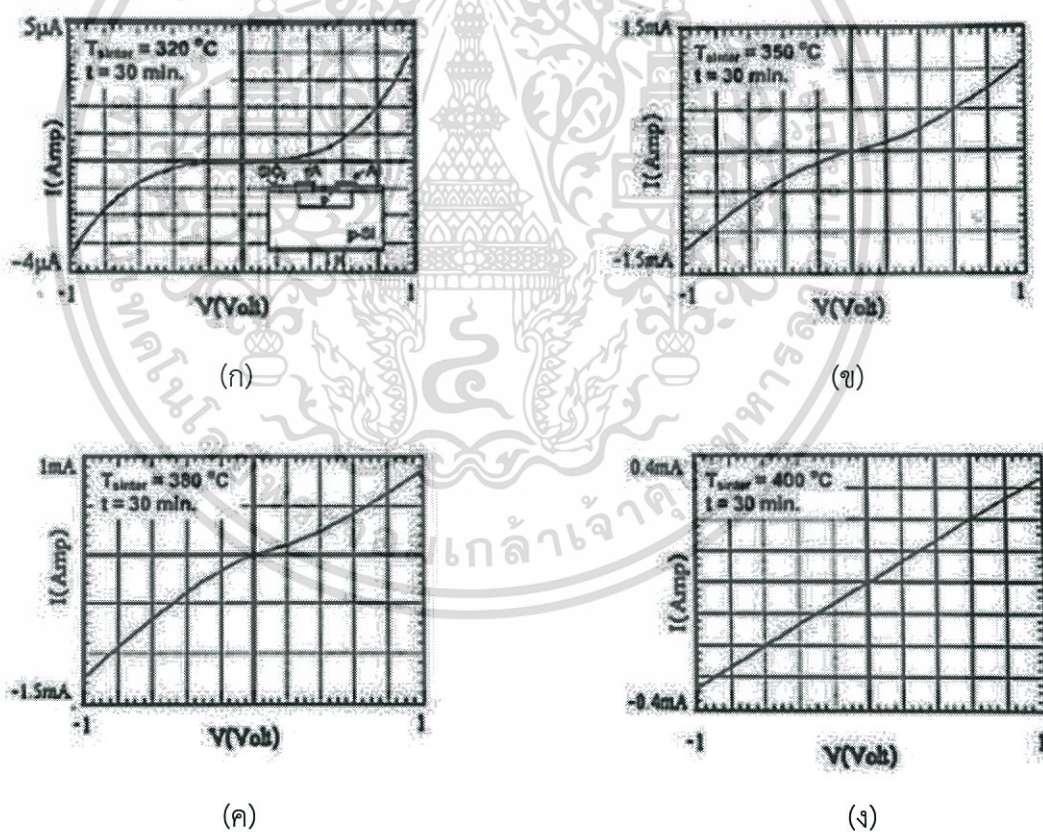
ในงานการสร้างวงจรรวมสามารถใช้น้ำยาไวแสงได้ทั้งชนิดบวกและชนิดลบ และคุณสมบัติที่สำคัญของน้ำยาไวแสงก็คือ ความละเอียด (Resolution) ซึ่งอาจหมายถึงความละเอียดของภาพที่จะสามารถทำได้ สำหรับงานวงจรรวมขั้นสูงที่มีขนาดเล็กมากๆ น้ำยาไวแสงที่ใช้จะต้องมีความละเอียดสูง (High resolution) ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดและคุณภาพของน้ำยาไวแสง นอกจากนี้ ปัจจัยภายนอกที่เกี่ยวข้องกับความละเอียดของภาพก็คือ ชนิดของแสงที่ใช้ เช่น แสงอัลตราไวโอเล็ต ที่ความถี่ต่างๆ รังสีเอกซ์หรือลำอิเล็กตรอน โดยที่แสงที่มีความยาวคลื่นสั้นๆ จะสามารถทำให้ได้ภาพที่มีความละเอียดสูง เป็นต้น น้ำยาไวแสงที่มีขายในท้องตลาดและใช้ในการสร้างวงจรรวมมีมากมายหลายชนิด ซึ่งแต่ละผู้ผลิตจะใช้ชื่อเรียกเฉพาะทางการค้าและมีคุณสมบัติต่างๆกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 กระบวนการซินเตอร์ริง

กระบวนการซินเตอร์ริง (sintering process) เป็นกระบวนการให้ความร้อนแก่โลหะที่มีจุดหลอมเหลวไม่สูงมากนัก ดังเช่น อะลูมิเนียม (Al) ซึ่งเป็นโลหะที่มีค่าความต้านทานต่ำ และมีราคาถูก จึงนิยมนำไปใช้ในการสร้างลวดลายโลหะในสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำ เป็นต้น

กระบวนการซินเตอร์ริงจะกระทำหลังจากสร้างลวดลายโลหะเสร็จเรียบร้อยแล้ว เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างโลหะ (อลูมิเนียม) กับซิลิคอนมีสมบัติที่ดีขึ้น ซึ่งสามารถสังเกตได้จากลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า เช่น ในกรณีรอยสัมผัสแบบโอห์มิก จะนำกระแสไฟฟ้าสูง เพราะว่าการซินเตอร์ริงจะช่วยให้ความต้านทานที่รอยสัมผัสมีค่าลดลง และลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันที่ได้มีความเป็นเชิงเส้น แสดงดังในรูปที่ 5.17 อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการซินเตอร์ริงจะต้องมีความเหมาะสมในกรณีของรอยสัมผัสระหว่างอะลูมิเนียมกับซิลิคอน จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400-500 °C ส่วนเวลาจะใช้ในช่วง 15-30 นาที การใช้อุณหภูมิที่สูง และเวลานานเกินไปอาจจะส่งผลเสียกับรอยสัมผัสได้ ทำให้เกิดการเชื่อมต่อถึงกันในรอบต่อ p-n ทำให้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำเกิดความเสียหายและไม่สามารถทำงานได้ [17] ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของรอยสัมผัส Al-Si/p⁺/p-Si ที่อุณหภูมิซินเตอร์ริงค่าต่างๆ โดย (ก) 320 °C (ข) 350 °C (ค) 380 °C และ (ง) 400 °C

ตารางที่ 2.2 การขึ้นเตอริงที่อุณหภูมิค่าต่างๆ ของรอยสัมผัสอะลูมิเนียมบริสุทธิ์กับซิลิคอน

อุณหภูมิ (°C)	Al (99.99%)
400	รอยต่อ p ⁺ /n ไม่เกิดความเสียหาย
500	รอยต่อ p ⁺ /n เกิดความเสียหาย
600	รอยต่อ p ⁺ /n เกิดความเสียหาย

จากตารางที่ 2.2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้อุณหภูมิในการขึ้นเตอริงที่ 400 °C กับอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ (99.99%) รอยสัมผัสของอะลูมิเนียมกับซิลิคอนยังคงเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มิกอยู่และถือได้ว่าเป็นอุณหภูมิแพร่ซึมบางๆ ลงไปที่ผิวแผ่นผลึกซิลิคอน และเมื่อใช้อุณหภูมิขึ้นเตอริงเพิ่มขึ้นเป็น 500 และ 600 °C จะทำให้เกิดความเสียหายกับรอยต่อ p⁺/n ซึ่งสังเกตได้จากลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันที่เกิดการลัดวงจร ทำให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านรอยต่อ p-n ได้เป็นจำนวนมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 3

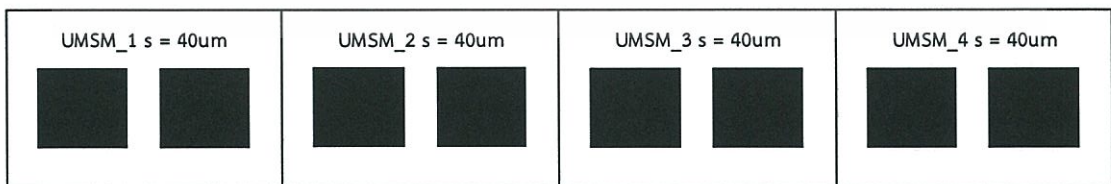
กระบวนการสร้างและการทดลอง

ในบทนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง โลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ แบบร่องรูปตัวยู หรือ U-Shape ด้วยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก บนพื้นผิวของซิลิคอนที่สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เพื่อใช้เป็นหน้ากากป้องกันการกัด โดยใช้สารละลายเตตระเมทิวแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ (Tetramethylammonium Hydroxide : TMAH) ที่เติมด้วย สารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต (AP) และกรด Silicic เพื่อศึกษาและตรวจวัดลักษณะสัมพันธ์ของพื้นผิวซิลิคอน และจะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูต่อไป

3.1 การออกแบบลวดลายสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสง

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

โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/n-Si/Al ซึ่งจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอลูมิเนียม (Al) กับซิลิคอนชนิดเอ็น (n-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสขั้วต่อคือ 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากันคือ 1 mm^2 ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้านมีขนาด ตั้งแต่ $40 - 100 \text{ }\mu\text{m}$ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 แสดงตัวอย่างลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อคือ



รูปที่ 3.1 ตัวอย่างลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง

3.2 กระบวนการสร้าง

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง ประกอบด้วยกระบวนการสร้าง 5 กระบวนการคือ กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน, กระบวนการสปัตเตอร์ริง, วิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา(PE-CVD) เพื่อสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์, กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายตัวตรวจวัดแสง และกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนแบบแอนไอโซทรอปิก โดยแต่ละขั้นตอนนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.2.1 กระบวนการทำความสะอาดแผ่นซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งจะให้เป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด และถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญเพราะหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของชิ้นงานลดลงได้ โดยมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- อัลตราโซนิค (ultrasonic) แผ่นผลึกซิลิคอนในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออน (deionization water: DI water) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- ต้มในกรดปิร์นยา ($3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$: piranha) เพื่อขจัดคราบน้ำมันและสิ่งสกปรกจำพวกโลหะ
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (hydrofluoric acid: HF) ที่มีความเข้มข้น 5% เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (native oxide) บนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในอากาศ
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

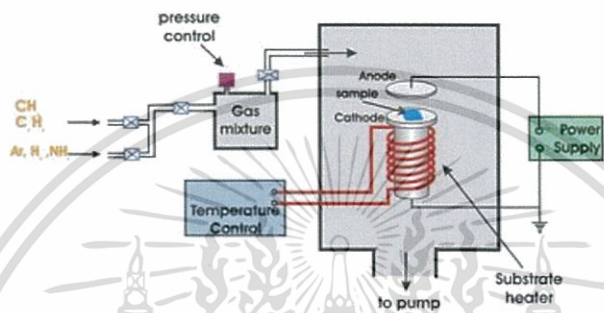
3.2.2 กระบวนการสปัตเตอร์ริง

กระบวนการอาร์เอฟสปัตเตอร์ริง (RF sputtering) เป็นกระบวนการเพื่อสร้างชั้นของโลหะอลูมิเนียม โดยที่หลักการของการสร้างชั้นอลูมิเนียมด้วยกระบวนการสปัตเตอร์ริง คือ ในระบบสุญญากาศจะประกอบไปด้วยแผ่นคู่ขนาน ด้านหนึ่งคือเป้าอลูมิเนียมหรือข้าวคั่วทอด ส่วนอีกด้านหนึ่งคือฐานรองซิลิคอนหรือข้าวอาโนด เมื่อป้อนก๊าซอาร์กอนหรือจ่ายกำลังงานให้เกิดการสร้างพลาสมาเพื่อให้เกิดอาร์กอนไอออน ในบริเวณพลาสมาอาร์กอนไอออนจะถูกเร่งเข้าสู่เป้าอลูมิเนียม ระหว่างที่อาร์กอนไอออนถูกเร่งจะได้รับโมเมนตัมและเข้าชนเป้าโครเมียม อะตอมของอลูมิเนียมเมื่อถูกอาร์กอนไอออนชนก็จะได้รับการถ่ายทอดโมเมนตัมและหลุดออกมาจากเป้าวิ่งเข้าสู่แผ่นฐานรองซิลิคอนควบแน่นเป็นชั้นฟิล์มบางอลูมิเนียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

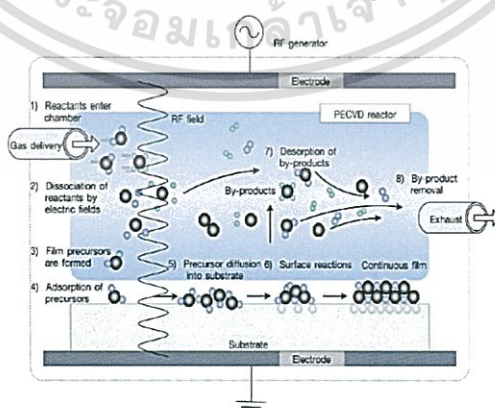
3.2.3 วิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา (Plasma enhanced chemical vapor deposition ; PE – CVD)

สามารถสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอนได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400 องศาเซลเซียส แต่โดยส่วนมากจะเป็นท่อนาโนคาร์บอนแบบผนังหลายชั้นเท่านั้น โดยให้ความต่างศักย์สูงระหว่างขั้วอิเล็กโทรด เพื่อให้แก๊สไฮโดรคาร์บอนของ อะเซทิลีน มีเทน เกิดการแตกตัว และตกลงบนฐานรองรับ เช่น ซิลิกอน ซิลิกอนไดออกไซด์และแก้ว โดยมีโลหะคะตะลิสต์ เช่น เหล็ก นิกเกิล และ โคบอลต์ เป็นต้น เคลือบอยู่บนผิว เพื่อช่วยให้เกิดการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอนเป็นท่อนาโนคาร์บอน แสดงดังรูป 3.2



รูปที่ 3.2 แผนภาพการสังเคราะห์ท่อนาโนคาร์บอน โดยวิธีการตกสะสมไอสารเคมีด้วยพลาสมา

การปลูกฟิล์มด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา (PECVD) จะใช้พลังงานคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในการกระตุ้นการแตกโมเลกุลเป็นพลาสมาในสภาวะสุญญากาศ โดยความถี่ของคลื่นวิทยุที่ใช้ขึ้นอยู่กับงานที่นำไปประยุกต์ โดยความถี่ทั่วไปที่พบเห็นกันได้แก่ 40 kHz, 400 kHz, 13.56 MHz และ 2.45 GHz โดยอะตอมที่แตกออกจะไปเกิดพันธะกับอะตอมอื่นๆ เพื่อสร้าง Precursor ซึ่งจะไป ก่อตัวและทำปฏิกิริยากับผิวหน้าของ wafer ส่วน by-product ที่เหลือจะถูกดูดออกผ่านระบบ บีมสุญญากาศ และขณะทำการเคลือบ แผ่น wafer จะถูกทำให้ร้อนเพื่อที่จะเพิ่มปฏิกิริยาผิวหน้าและ ลดสิ่งเจือปนที่ไม่ต้องการ เช่น ไฮโดรเจน แบบจำลองหลักการทำงานแสดงในรูปที่ 3.3



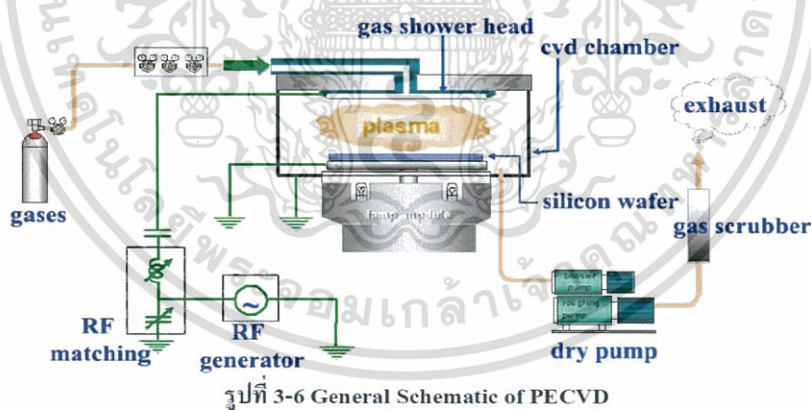
รูปที่ 3.3 Schematic of CVD Transport and Reaction Steps

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปฏิกิริยาเคมีของ CVD ที่ใช้พลาสมามีความซับซ้อนและมีปัจจัยหลายอย่างที่มีบทบาทต่อการปลูกฟิล์ม เช่น รูปร่างและการวางตัวของ Electrode, พลังงานและความถี่ที่ใช้, ส่วนประกอบของแก๊ส, ความดัน, อัตราการไหลของแก๊ส, และ อุณหภูมิของแผ่นฐาน เป็นต้น

กระบวนการ PECVD เป็นกระบวนการที่ใช้พลังงาน Plasma ในการสร้างหรือสนับสนุนปฏิกิริยา CVD ทำให้กระบวนการนี้มีข้อแตกต่างสำคัญคือการใช้อุณหภูมิต่ำกว่าแบบอื่นๆ ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เคลือบฟิล์ม Silicon Nitride ที่ 350 °C บนชั้น Aluminum Metallization ได้เนื่องจากจุดหลอมเหลวของอะลูมิเนียมอยู่ที่ 660 °C

กระบวนการ PECVD จะถูกกระทำใน Chamber สุญญากาศซึ่งวางอยู่ระหว่างแผ่นตัวนำ 2 แผ่นขนานกัน ซึ่งอยู่ห่างกันไม่มากนัก และสามารถปรับระยะห่างได้สำหรับการปรับปรุงกระบวนการ แผ่น wafer จะถูกวางอยู่บนแผ่นด้านล่างซึ่งเป็นกราวด์ และจะปล่อยพลังงานคลื่นวิทยุที่แผ่น Electrode ด้านบน เช่นเดียวกับแก๊สก็จะถูกส่งออกมาทาง manifold ตรงกึ่งกลางของ Electrode ด้านบน และแก๊สที่เหลือจากปฏิกิริยาจะถูกดูดออกทาง Electrode ด้านล่าง เตาของ PECVD โดยปกติแล้วจะเป็น Cold-wall plasma reactor โดยที่แผ่น wafer จะถูกให้ความร้อนผ่าน chuck ทำให้ส่วนอื่นๆ ของเตาไม่ได้รับความร้อน ซึ่ง cold-wall reactor นี้มีการสร้างอนุภาคที่ไม่ต้องการน้อยและใช้เวลาในการทำความสะอาดน้อยเช่นกัน



รูปที่ 3.4 General Schematic of PECVD

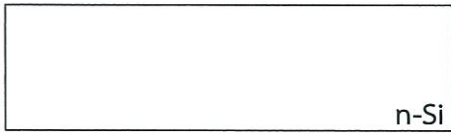
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

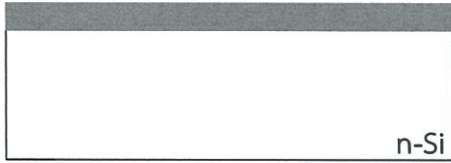
ขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการสร้างลวดลายของชิ้นงาน ด้วยกระจกต้นแบบที่เรียกว่า โฟโตมาสก์ (photomask) ซึ่งมีลักษณะเป็นลวดลายบนฟิล์มกระจก ที่ได้มาจากการออกแบบ แสงที่ฉายผ่านกระจกโฟโตมาสก์จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลาย (สีดำทึบ) แสงจะผ่านไม่ได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ถูกแสง และบางบริเวณที่ไม่ถูกแสง ปฏิกิริยาเคมี-แสงที่เกิดขึ้น จะทำให้คุณสมบัติของน้ำยาไวแสงเปลี่ยนแปลงไป และแตกต่างกันตามชนิดของน้ำยาไวแสง เมื่อนำแผ่นผลึกนี้ไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนชั้นออกไซด์ จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นออกไซด์บริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นออกไซด์ขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมีขั้นตอนดังนี้

- อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นออก ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 60 นาที
- เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์
- อบแผ่นครั้งแรก (pre bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ ด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (mask aligner) ใช้เวลาในการฉายแสง 20 วินาที
- ชั้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาชั้นลวดลาย (AZ developer) 2 แก้ว แก้วละ 15 วินาที
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- อบครั้งที่สอง (post bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง
- กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่ไม่ต้องการออกเพื่อสร้างลวดลายโดยใช้สารละลาย BOE
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- จุ่มในอะซิโตน เพื่อลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออก
- จุ่มในน้ำ DI
- เป่าให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

โดยกระบวนการสร้างต่างๆ สามารถสรุปเป็นขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 3.2



ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน



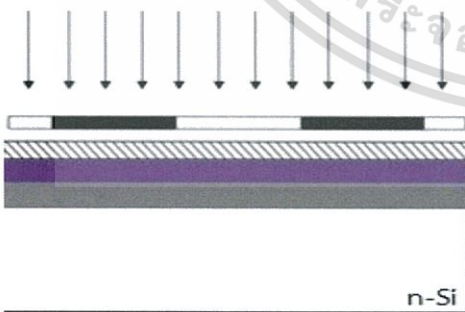
สร้างชั้นโลหะอลูมิเนียมที่ด้านหน้าแผ่น



สร้างชั้นออกไซด์ที่ด้วยกระบวนการ PECVD



เคลือบน้ำยาไวแสงที่ด้านหน้าแผ่น

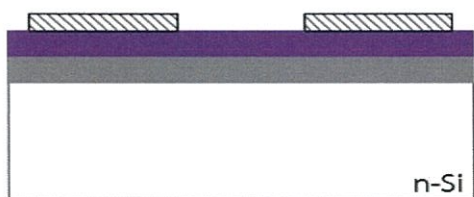


ฉายแสงผ่านกระจกต้นแบบ

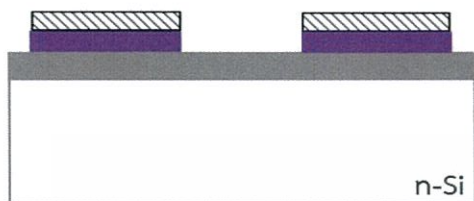


รูปที่ 3.5 กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสง

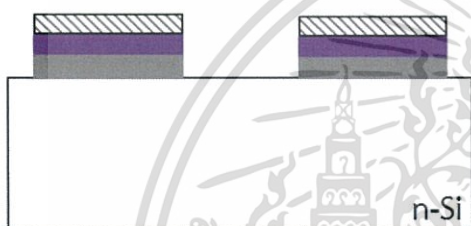
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ชั้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยา Developer



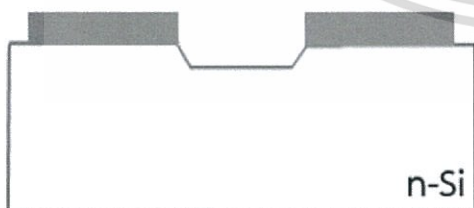
กัดชั้นออกไซด์ในส่วนที่ไม่ต้องการออก



กัดชั้นอลูมิเนียมในส่วนที่ไม่ต้องการออก



กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมสาร AP และกรด Silicic



ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดแล้ว

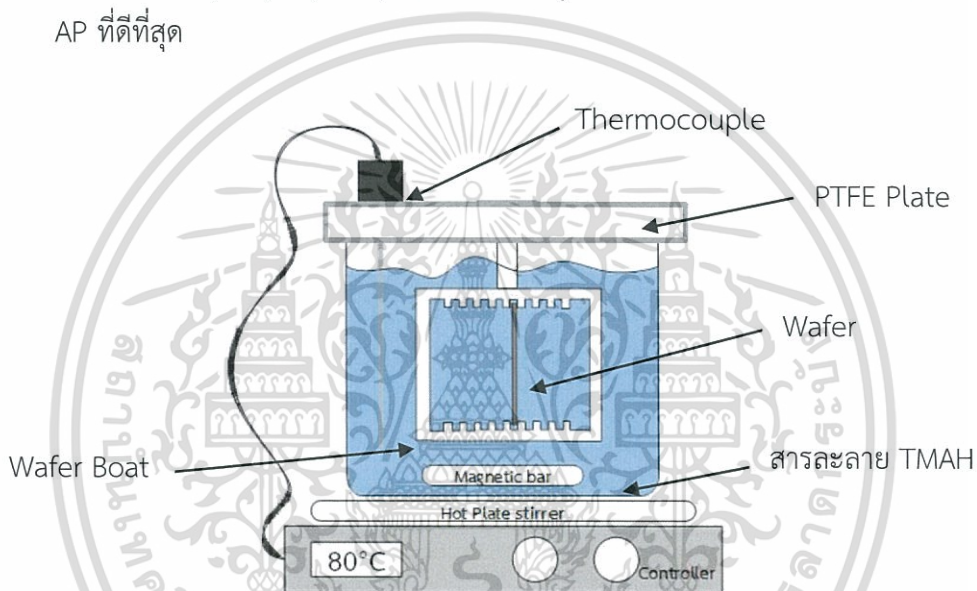


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับใช้ประกอบการเรียนการสอนเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น มิใช่ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

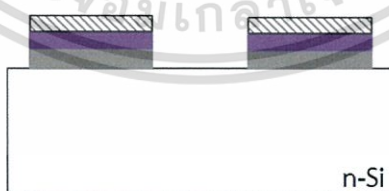
3.2.5 กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน

กระบวนการกัดแผ่นซิลิคอนโดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl Ammonium Hydroxide : TMAH) ที่ผ่านการเติมโดยสารแอมโมเนียมเปอร์รีดอกไซด์ซัลเฟต (Ammonium Peroxodisulphate ; AP) และกรด silicic ซึ่งมีเงื่อนไขการกัดดังนี้

- กัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/l อุณหภูมิในการกัด 80 °C ใช้เวลาในการกัด 10 นาที มีรอบปั่นเหวี่ยง 200 rpm โดยเติมสาร 9, 9.5, 10, 10.5, 11 และ 11.5 g/l เพื่อหาปริมาณอัตราส่วนในการเติมสาร AP ที่ดีที่สุด

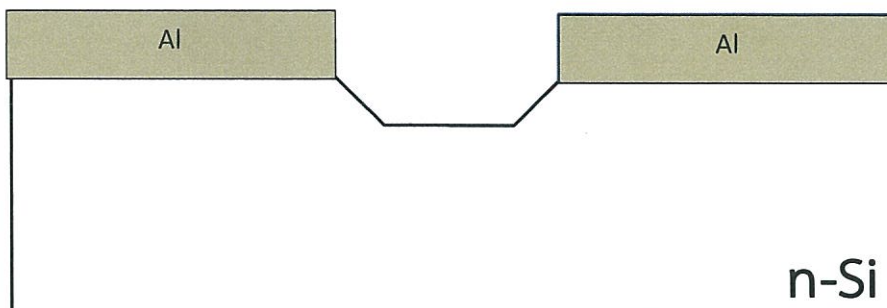


รูปที่ 3.6 อุปกรณ์ที่ใช้สำหรับกระบวนการกัดแผ่นซิลิคอน

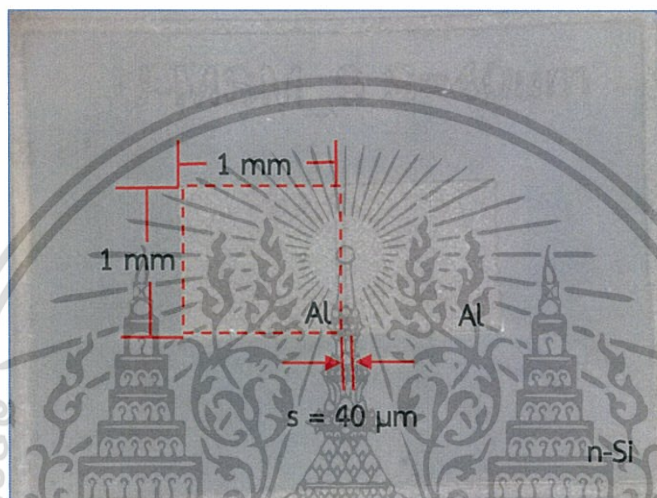


รูปที่ 3.7 ตัวตรวจวัดแสงที่ยังไม่ได้ผ่านกระบวนการกัด

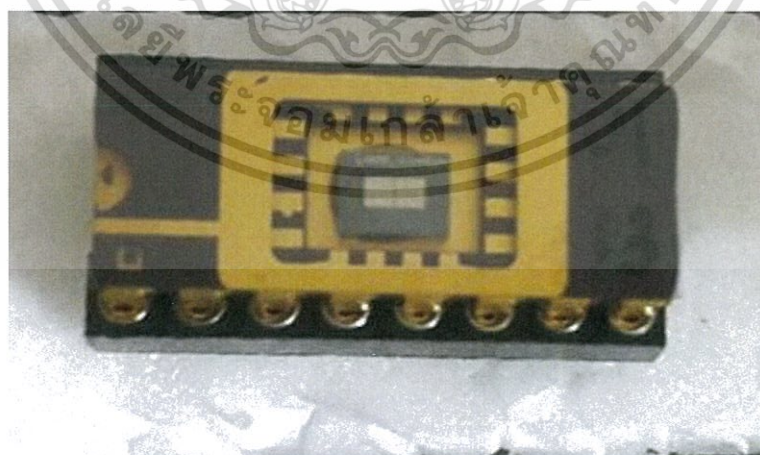
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างตัวตรวจวัดแสงหลังจากผ่านกระบวนการกัด มีขนาดขั้วไฟฟ้า เท่ากับ $1 \times 1 \text{ mm}^2$ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า เท่ากับ $40 \mu\text{m}$



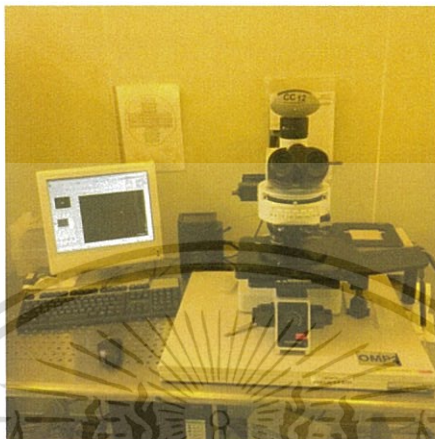
รูปที่ 3.10 ชิ้นงานที่ผ่านการตัดแยกชิ้นแล้วนำไปเชื่อมต่อขา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3 การทดลอง

3.3.1 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (optical microscope)

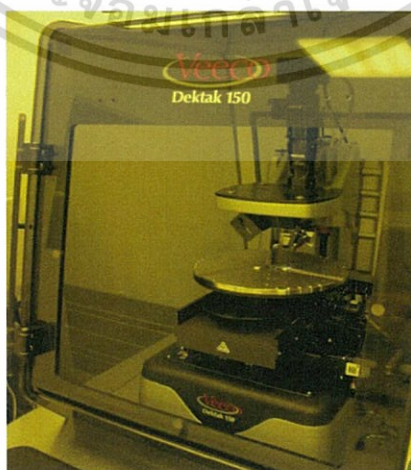
ทำการวิเคราะห์ผลการทดลองโดยกล้อง Optical Microscope Model : OLYMPUS BX 51 ที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 3.11 กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope Model : OLYMPUS BX 51)

3.3.2 เครื่องมือวัดค่าความลึก Profilometer

จากนั้นนำชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการกัดแล้ว นำไปวัดความลึกด้วยเครื่อง Profilometer ของบริษัท Veeco รุ่น Dektak 150 แสดงดังรูปที่ 3.9 โดยเครื่องมือวัดความหยาบผิว (Surface Roughness) โดยใช้ปลายวัด (Stylus) ลากไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด จากนั้นเครื่องจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นค่าคุณสมบัติของผิว (Surface Parameter) ซึ่งแต่ละค่าล้วนได้มาจากการคำนวณทั้งหมด และเครื่องจะแปลผลออกมาในรูปกราฟ ซึ่งเรียกว่า เส้นรูปทรง (Profile) หมายถึง เส้นที่เกิดการตัดกันของระนาบตัด (Sectioning Plane) หรือระนาบที่ตั้งฉากกับพื้นผิวตัดกับระนาบของพื้นผิว[15]



รูปที่ 3.12 เครื่อง Profilometer บริษัท Veeco รุ่น Dektak 150

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM)

กล้องจุลทรรศน์ที่ใช้อิเล็กตรอนเป็นแหล่งกำเนิดแสง ซึ่งเป็นเครื่องที่ใช้ศึกษาลักษณะและองค์ประกอบของวัสดุชิ้นงานในระดับจุลทรรศน์อิเล็กตรอนมีกำลังขยายมากกว่า 3000 เท่าถึงระดับ 100,000 เท่า และสามารถแจกแจงรายละเอียดของภาพขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวอย่างได้ตั้งแต่ 3 – 100 นาโนเมตร นอกจากนี้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ยังใช้ร่วมกับเทคนิคอื่น เช่น Energy Dispersive Spectrometry (EDS) และ Wavelength Dispersive Spectrometry (WDS) ที่เป็นข้อมูลทางเคมี

การทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดจะใช้อิเล็กตรอนแทนแสงโดยต้นกำเนิดอิเล็กตรอน ที่เรียกว่า ปืนอิเล็กตรอน (Electron gun) ถูกสร้างจากการจ่ายกระแสไฟฟ้าสูงให้ขดลวดทั้งสแตท ทำให้อิเล็กตรอนหลุดออกมา แล้วจะถูกเร่งให้เคลื่อนที่ลงมาตามลำกล้อง ซึ่งภายในลำกล้องต้องเป็นสภาพสุญญากาศเพื่อที่จะให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่โดยไม่สูญเสียพลังงาน ทิศทางการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะถูกควบคุมโดยเลนส์แม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic lens) อย่างน้อย 2 ชุด และปริมาณอิเล็กตรอนถูกควบคุมโดยแอฟเพอร์เจอร์ (Aperture) หรือช่องเปิดที่มีขนาดต่างๆ กัน ตามลักษณะการใช้งาน เลนส์แม่เหล็กไฟฟ้าชุดแรกที่เรียกว่า เลนส์คอนเดนเซอร์ (Condenser lens) เป็นอุปกรณ์ที่มีความสำคัญที่สุดต่อการควบคุมทัศนศาสตร์อิเล็กตรอน (Electron optics) เพราะเป็นเลนส์ที่ทำหน้าที่บีบอิเล็กตรอนที่วิ่งลงมาจากรูกำเนิดให้เป็นลำที่มีขนาดพื้นที่หน้าตัดเล็กลง ส่วนเลนส์วัตถุเป็นเลนส์ชุดสุดท้ายจะทำหน้าที่โฟกัสลำอิเล็กตรอน (Electron beam) ให้ไปตกกระทบบนผิวตัวอย่างโดยมีสแกนคอยล์ (Scan coil) ทำหน้าที่กวาดอิเล็กตรอนให้ไปบนผิวตัวอย่างภายในกรอบพื้นที่สี่เหลี่ยมเล็กๆ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวอย่างบริเวณที่ถูกยิงด้วยลำอิเล็กตรอนจะเกิดสัญญาณต่างๆ ขึ้นหลายชนิดในเวลาเดียวกันและ SEM จะมีอุปกรณ์ตรวจจับสัญญาณและส่งไปประมวลเป็นภาพแสดงบนจอต่อไป[12-13]

3.3.4 การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

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

3.3.5 การวัดการตอบสนองทางแสง

การวัดการตอบสนองทางแสงนั้น ทำการวัดโดยใช้ หลอดฮาโลเจน ที่สามารถปรับสว่างของแสงที่ตกกระทบบนชิ้นงานได้ตั้งแต่ช่วง 5000 lux ถึง 25000 lux โดยการวัดการตอบสนองทางแสง โดยทำการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่อุปกรณ์วัดแสง -10 ถึง 10 V เพิ่มขึ้นครั้งละ 0.5 ทำการวัดกระแสที่ได้จากการไบอัสในช่วงต่าง ด้วยเครื่อง KEITHLEY 2400 นอกจากนี้ยังทำการวัดขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบนโดยใช้หลักการจ่ายแรงดันแบบเดียวกับขณะได้รับแสงตกกระทบบน เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสง



รูปที่ 3.13 เครื่องวิเคราะห์คุณลักษณะของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

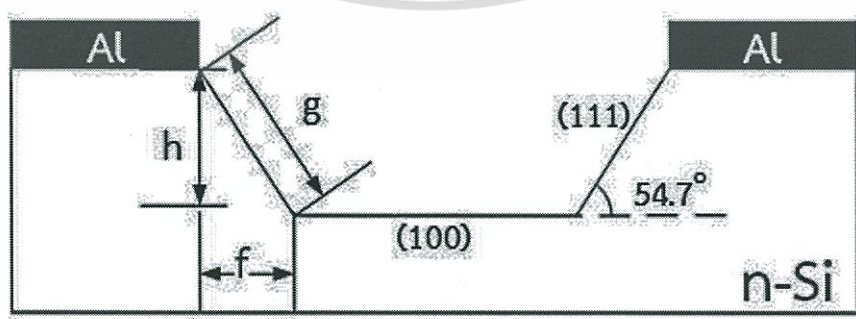
บทที่ 4

ผลการทดลอง

หลังจากทำการเตรียมชิ้นงานแล้ว ในบทนี้จะนำเสนอเกี่ยวกับการศึกษาลักษณะสัณฐานของพื้นผิวซิลิคอนและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านการกัดโดยสารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl ammonium Hydroxide : TMAH) ที่ผ่านการเติมโดยสารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต (Ammonium Peroxodisulphate ; AP) และกรด silicic ซึ่งส่วนแรกจะทำการศึกษาลักษณะสัณฐานของพื้นผิวซิลิคอนและอัตราการกัดของสารเคมี ในส่วนที่สองนั้น จะทำการศึกษาลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันทั้งในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบและไม่ได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงที่ได้สร้างขึ้น

4.1 ศึกษาลักษณะสัณฐานของพื้นผิวซิลิคอน

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนให้เป็นแบบร่องรูปตัวยู เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSP พบว่าลักษณะการกัดพื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะเป็นการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก ซึ่งมีลักษณะกัดทิศทางใดทิศทางหนึ่งมากกว่าทิศทางหนึ่ง จะเห็นว่าผลึกซิลิคอนระนาบ (111) และ (100) ถูกกัดออกไป โดยที่ระนาบ (100) จะถูกกัดออกไปมากที่สุด เนื่องจากอะตอมของซิลิคอนที่ถูกกัดจะมีอยู่สองอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีสองอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า ดังนั้นการที่อะตอมที่ผิวหน้าถูกดึงออกไปจะต้องมีการทำลายพันธะถึงสองพันธะด้วยกัน ส่วนผลึกซิลิคอนระนาบ (111) จะถูกกัดน้อยกว่า เนื่องจากในระนาบ (111) นี้จะมีอะตอมสามอะตอมที่อยู่ใต้ผิวหน้าของระนาบและมีหนึ่งอะตอมที่ถูกกัดออกไปก่อนหน้า จึงทำให้เป็นระนาบที่แข็งแรงที่สุดที่ทำให้เกิดร่องลึกขึ้น และจากปฏิกิริยาที่กล่าวไว้ข้างต้นนั้นจะทำให้ได้เป็นตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSP ดังแสดงในรูปที่ 4.1 ซึ่งเราจะทำการคำนวณหาพื้นที่ราบเอียงด้าน (g) ได้จาก $g=h/\sin\theta$ และพื้นที่ด้าน f ได้จาก $f=h/\tan\theta$



รูปที่ 4.1 ลักษณะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบ UMSM ที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียว นั้น พบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลาย TMAH ต่ำๆ จะทำให้สารละลายมีอัตราการกัดซิลิคอนที่เร็วซึ่งทำให้เวลาในการกัดน้อยลง และที่ความเข้มข้นต่ำจะช่วยลดปริมาณในการใช้สารเคมีลงไปได้ซึ่งจะทำให้ลดต้นทุนในการผลิตลง แต่จะเกิดปัญหาขึ้นเนื่องจากพื้นผิวของซิลิคอนหลังกระบวนการกัดจะมีความขรุขระมากโดยเราจะแก้ปัญหาด้วยการเติมสาร AP เข้าไป แต่สารละลายก็ยังมีอัตราการกัดช้าอะลูมิเนียมค่อนข้างมากอยู่ งานวิจัยนี้เราจึงทำการเติมกรด silicic ลงไปเพื่อช่วยลดอัตราการกัดของโลหะอะลูมิเนียมลงซึ่งจะเติมกรด silicic ที่ 34 g/l ทุกเงื่อนไขการทดลอง เพราะว่าที่ปริมาณกรด silicic 34 g/l มีอัตราการกัดโลหะอะลูมิเนียมน้อยมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.1 [13].

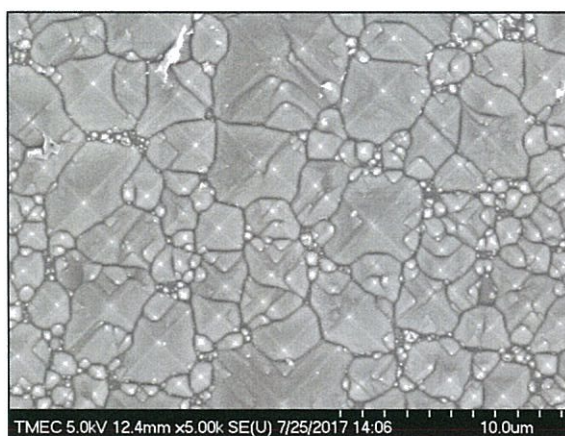
ตารางที่ 4.1 แสดงผลกระทบของการเติมกรด Silicic ต่ออัตราการกัดโลหะอะลูมิเนียม

Conditions	Al Etch Rate ($\mu\text{m/hr}$)
TMAH 5 %	115.3
TMAH 5 % + silicic acid 30 g/l	15.84
TMAH 5 % + silicic acid 34 g/l	0.232
TMAH 5 % + silicic acid 38 g/l	0.562

จากงานวิจัยก่อนหน้าที่เราได้ศึกษาพื้นผิวซิลิคอนหลังจากผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยสาร AP เพียงอย่างเดียวพบว่าที่ปริมาณสาร AP 7 g/l นั้นพื้นผิวซิลิคอนนั้นมีความเรียบเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสง แต่เมื่อเราทำการเติมกรด silicic ลงไปแล้วกลับทำให้ ปริมาตรมีขนาดใหญ่ขึ้นและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนก็จะเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.2

ในงานวิจัยนี้เราจึงต้องทำการศึกษาผลกระทบของการเติมสาร AP ที่มีต่อขนาดของปิรามิด โดยในการทดลองจะทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนในเงื่อนไขที่สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/l อุณหภูมิในการกัด 80 °C ความเร็วรอบการปั่นเหวี่ยง 200 rpm และเวลาในการกัดตลอดการทดลองเป็น 10 นาที โดยทำการศึกษาผลกระทบของการเติมสาร AP ที่ปริมาณ 9, 9.5, 10, 10.5, 11 และ 11.5 g/l ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ผลการทดลองด้วยภาพจากกล้อง Optical Microscope Model : OLYMPUS BX 51 ที่กำลังขยาย 500 เท่า ซึ่งจะทำให้การวิเคราะห์ขนาดของปิรามิดและความขรุขระของพื้นผิว เพื่อที่จะหาเงื่อนไขที่ปิรามิดมีขนาดเล็กและพื้นผิวมีความเรียบอยู่ที่ช่วง 5-10 นาโนเมตร โดยจะใช้เงื่อนไขที่ดีที่สุดไปทำการทดลองหาอัตราการกัดของสารเคมีต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.2 ภาพจากกล้อง Scanning Electron Microscope (SEM) กำลังขยาย 5,000 เท่า แสดงให้เห็นลักษณะของผิวซิลิโคนที่กักด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เต็มกรด silicic ปริมาณ 34 g/l และสาร AP 7 g/l.

จากการทดลองเติมสาร AP ที่ปริมาณ 9 g/l และที่ปริมาณ 9.5 g/l พบว่าเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 9 g/l นั้นพื้นผิวของซิลิโคนยังคงมีความขรุขระอยู่บ้างมีปริมาตรเกิดขึ้นในบางจุดบนพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ก) และในเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 9.5 g/l พบว่าพื้นผิวของซิลิโคนจะมีความขรุขระใกล้เคียงกันและมีปริมาตรเกิดขึ้นในบางจุดบนพื้นผิวเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ข)



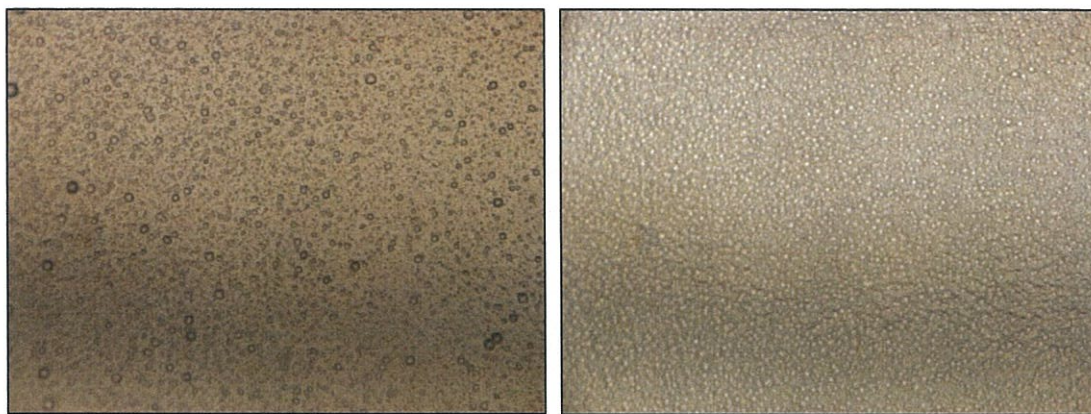
(ก)

(ข)

รูปที่ 4.3 ภาพจากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิวซิลิโคนที่ถูกกักด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เต็มกรด silicic ปริมาณ 34 g/l โดย (ก) เติมด้วยสาร AP 9 g/l และ (ข) เติมด้วยสาร AP 9.5 g/l

จากการทดลองเติมสาร AP ที่ปริมาณ 10 g/l และที่ปริมาณ 10.5 g/l พบว่าเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 10 g/l นั้นพื้นผิวของซิลิโคนมีความขรุขระมากและมีปริมาตรเกิดขึ้นเกือบจะทั่วทั้งพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ค) และในเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 10.5 g/l พบว่าพื้นผิวของซิลิโคนยังมีความขรุขระอยู่และมีปริมาตรเกิดขึ้นทั่วทั้งพื้นผิวดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการวิจัยและพัฒนา ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

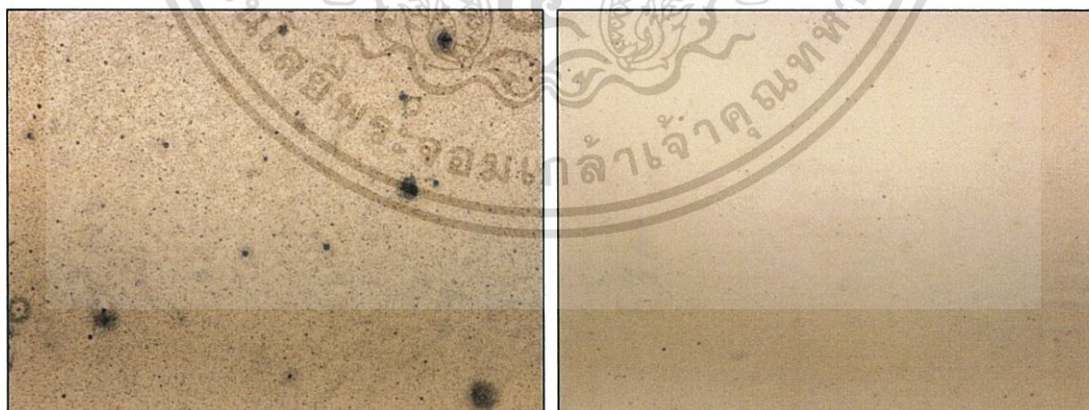


(ค)

(ง)

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ภาพจากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนที่ ถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/L โดย (ค) เติมด้วยสาร AP 10 g/L และ (ง) เติมด้วยสาร AP 10.5 g/L

จากการทดลองเติมสาร AP ที่ปริมาณ 11 g/L และที่ปริมาณ 11.5 g/L พบว่าเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 11 g/L นั้นพื้นผิวของซิลิคอนจะเกิดปริมาตรที่มีขนาดไม่ใหญ่มากซึ่งจะเกิดขึ้นเป็นบางจุดของพื้นผิวและพื้นผิวนั้นก็ยังมี ความขรุขระอยู่บ้างดังแสดงในรูปที่ 4.3 (จ) และในเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 11.5 g/L พบว่าปริมาตรที่เกิดบนพื้นผิวซิลิคอนนั้นมีขนาดค่อนข้างเล็กและเกิดขึ้นเป็นบางจุดของพื้นผิวเช่นกัน แต่ในเงื่อนไขพื้นผิวของซิลิคอนจะมีความเรียบมากที่สุดดังแสดงในรูปที่ 4.3 (ฉ) ซึ่งเราจะนำไปใช้ในการทดลองถัดไป



(จ)

(ฉ)

รูปที่ 4.3 (ต่อ) ภาพจากกล้อง Microscope กำลังขยาย 500 เท่า แสดงลักษณะของพื้นผิวซิลิคอนที่ ถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/L โดย (จ) เติมด้วยสาร AP 11 g/L และ (ฉ) เติมด้วยสาร AP 11.5 g/L

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

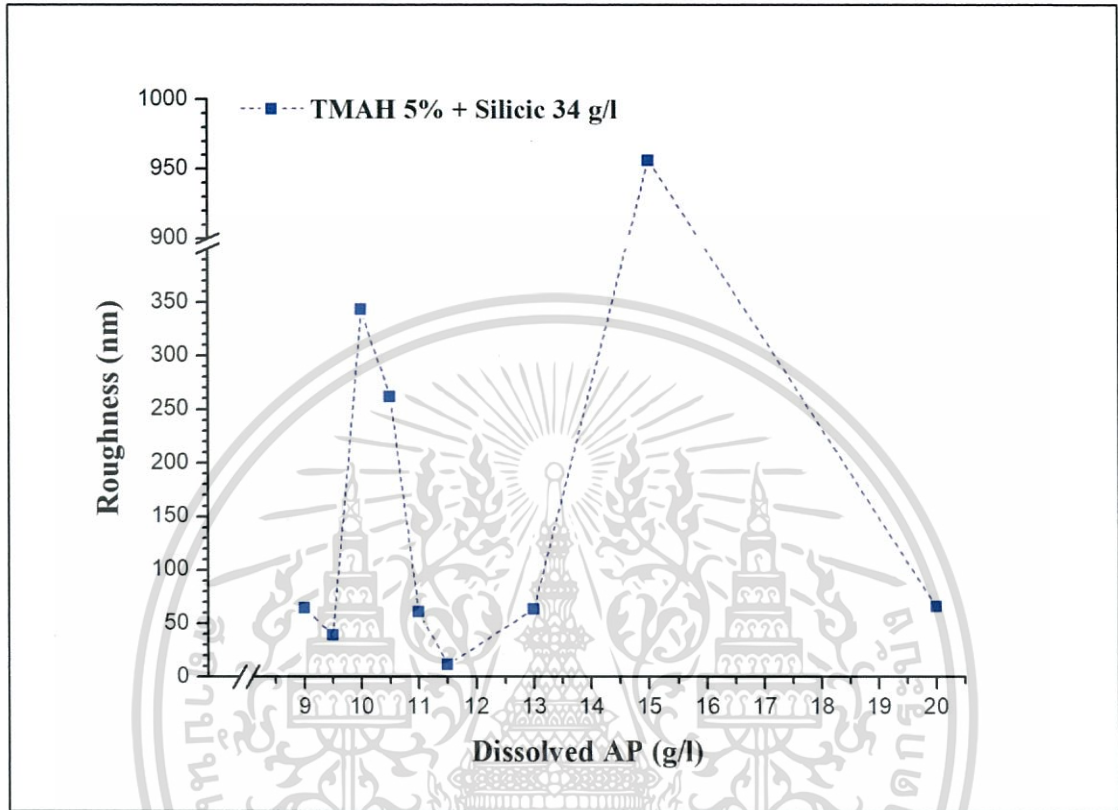
ตารางที่ 4.2 ผลกระทบของการเติมสาร AP ต่อขนาดฐานของปิรามิดหลังผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมด้วยกรด silicic 34 g/l

Dissolved AP (g/l)	Pyramid size range (μm)
7	2.2-4.2
9	1.5-2.3
9.5	2.0-2.9
10	1.2-2.2
10.5	1.2-1.5
11	0.6-2.1
11.5	0.5-1.5

จากตารางที่ 4.2 สังเกตเห็นได้ว่าในเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 7 g/l ที่เราได้อ้างอิงมาจากงานวิจัยที่เราเคยทำในครั้งก่อนนั้น พอเติมกรด silicic ลงไปกลับพบว่าปิรามิดมีขนาดใหญ่มากไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ทำการทดลองต่อ และหลังจากนั้นเมื่อเราเติมสาร AP ที่ 9 และ 9.5 g/l พบว่าขนาดของปิรามิดจะใหญ่ขึ้นตามปริมาณของสาร AP ที่เติมลงไป จากนั้นขนาดของปิรามิดก็จะเริ่มเล็กลงตั้งแต่เงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 10 g/l ไปจนถึงเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 11.5 g/l ซึ่งจะเห็นว่าปิรามิดจะมีขนาดเล็กมากที่สุดเพียงแค่ 0.5 μm [9] แต่พอเราได้ทำการทดลองเพิ่มในเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 13 g/l กลับพบว่าปิรามิดจะกลับมามีขนาดใหญ่ขึ้นอีกครั้ง จึงทำให้ทราบว่าแนวโน้มของขนาดปิรามิดนั้นจะแกว่งไปมาขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยจึงควรเลือกช่วงปริมาณการเติมสาร AP ให้เหมาะกับการทดลอง โดยทั้งขนาดและการกระจายตัวของปิรามิดนั้นจะเกิดมาจากฟองแก๊สไฮโดรเจน[15] ที่เกิดมาจากปฏิกิริยาในการแตกตัวของน้ำ จึงทำให้เกิดปิรามิดแบบสุ่มขึ้นบนพื้นผิวของซิลิคอน ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้พบว่าเงื่อนไขที่เติมสาร AP 11.5 g/l เป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุด

ในการทดลองถัดไปเราจะนำชิ้นงานไปตรวจวัดความขรุขระของพื้นผิว (Surface Roughness) จากเครื่อง Profilometer โดยใช้ปลายวัดลากไปบนพื้นผิวที่ต้องการวัดในระยะทางที่กำหนด จากนั้นเครื่องจะเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าเป็นค่าคุณสมบัติของผิว ซึ่งทำให้เราสามารถวิเคราะห์ผลกระทบของการเติมสาร AP ที่มีต่อความขรุขระและความเรียบของพื้นผิวได้ โดยจะนำชิ้นงานในเงื่อนไขการเติมสาร AP ที่ปริมาณ 9, 9.5, 10, 10.5, 11, 11.5, 13, 15 และ 20 g/l ที่เราได้ทำการทดลองเพิ่มในภายหลังมาวิเคราะห์ดูความขรุขระของพื้นผิวด้วยแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.4

แต่เราจะไม่นำเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 7 g/l มาพิจารณาเพราะว่าในเงื่อนไขนี้พบว่ามีขนาดปริมาตรที่ค่อนข้างใหญ่ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.2 จึงทำให้ไม่น่าสนใจและไม่มี ความเหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการทดลอง



รูปที่ 4.4 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนในระนาบ(100) กับปริมาณของสาร AP ที่เติมลงไป

จากรูปที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าในเงื่อนไขที่เราเติมสาร AP ปริมาณ 9 และ 9.5 g/l พื้นผิวซิลิคอนจะมีความขรุขระน้อยลงตามปริมาณของสาร AP ที่เพิ่มเข้าไปซึ่งมีความขรุขระเพียงแค่ประมาณ 40 nm แต่พอมาถึงเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 10 g/l พื้นผิวซิลิคอนก็กลับมาขรุขระอีกครั้ง โดยมีความขรุขระมากถึง 340 nm แล้วพื้นผิวซิลิคอนก็จะเริ่มเรียบมากขึ้นตามปริมาณของสาร AP ที่เพิ่มขึ้น จนถึงเงื่อนไขที่เติมสาร AP ปริมาณ 11.5 g/l ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่พื้นผิวมีความเรียบมาก มีค่าความขรุขระเหลือเพียงแค่ประมาณ 10 nm และเมื่อเติมสาร AP ปริมาณ 13 g/l พื้นผิวซิลิคอนก็จะเริ่มกลับมาขรุขระขึ้นอีกครั้ง ซึ่งความสัมพันธ์ระหว่างความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนกับปริมาณของสาร AP ที่เติมลงไปนี้มีแนวโน้มใกล้เคียงกับขนาดของปริมาตร จึงทำให้เราสามารถระบุได้ว่าสาร AP ที่ได้เติมลงไปนั้นมีส่วนต่อสภาพพื้นผิวค่อนข้างมาก

จากการทดลองที่ผ่านมาพบว่าที่เงื่อนไขการเติมสาร AP ปริมาณ 11.5 g/l เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดที่เราจะนำไปใช้ทดลองเพื่อหาค่าความลึกของพื้นผิว และอัตราการกัดของสารละลายด้วยเครื่อง Profilometer อีกครั้งหนึ่ง

4.2 ศึกษาอัตราการกัดของสารละลาย

ในงานวิจัยนี้กระบวนการสร้างของตัวตรวจวัดแสงนั้น เราจะต้องทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนแบบ แอนไอโซทรอปิก ซึ่งมีลักษณะการกัดในทิศทางของระนาบ 100 มากกว่าทิศทางอื่น ที่บริเวณ ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ทำให้เป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสง โดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า โดยเราจะทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยสารละลายเตตระเมท- จิวแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethyl ammonium Hydroxide : TMAH) ที่ผ่านการเติมด้วย สารแอมโมเนียมเปอร์ร็อกโซไดซัลเฟต (Ammonium Peroxodisulphate ; AP) และกรด silicic โดย ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงนั้น เราจำเป็นจะต้องคำนึงถึงความลึกของพื้นผิวที่ถูกกัดลงไปให้มีความ เหมาะสมกับบริเวณหลอดพาหะที่จะขยายออกมาหลังจากที่ป้อนแรงดันไบอัสเข้าไป

ในการประมาณค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนนั้นเราจำเป็นต้องทราบอัตราการกัดซิลิคอนก่อน นั้นหมายถึงค่าความลึกของพื้นผิวจะเกี่ยวข้องกันโดยตรงกับอัตราการกัด ซึ่งจากปัจจัยที่กล่าวมา ข้างต้นนี้จะมีความเกี่ยวข้องกับสาร AP และกรด silicic โดยจะแสดงผลกระทบของการเติมทั้งสาร AP และกรด silicic ลงไปให้เห็นดังแสดงในตารางที่ 4.3

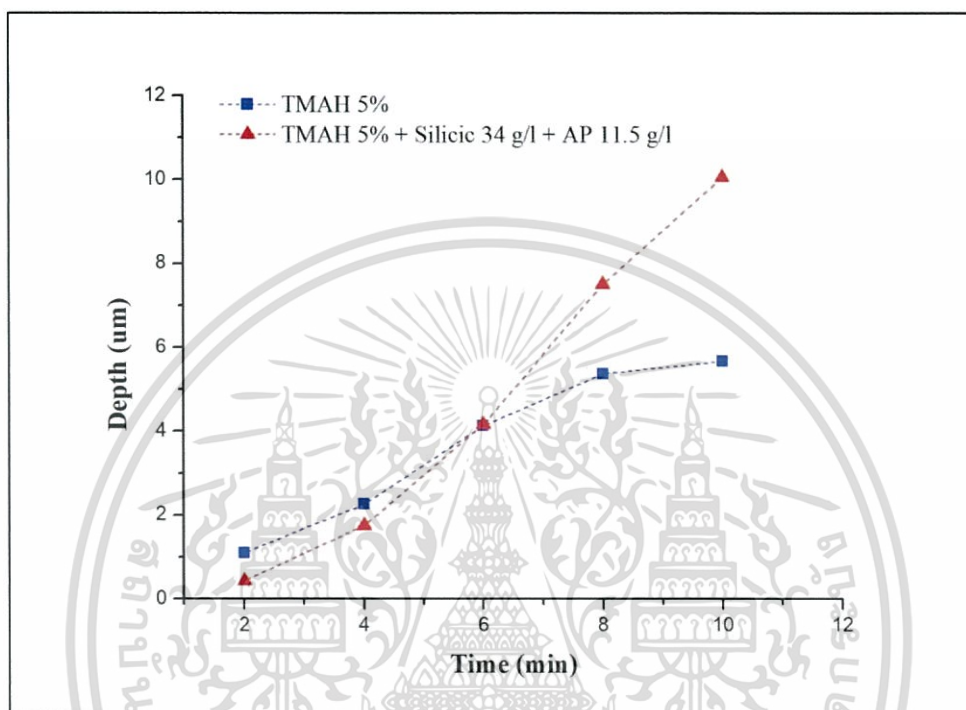
ตารางที่ 4.3 แสดงการเปรียบเทียบค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนหลังผ่านการกัดด้วยสารเคมี

Time (min)	Depth (μm)	
	TMAH 5wt%	TMAH 5wt% + silicic 34 g/l + AP 11.5 g/l
2	1.10	0.44
4	2.26	1.75
6	4.13	4.16
8	5.37	7.50
10	5.67	10.04

จากตารางที่ 4.3 นั้นเราได้ทำการทดลองกัดพื้นผิวซิลิคอนที่เงื่อนไขของสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เพียงอย่างเดียวและในเงื่อนไขที่มีการเติมสาร AP และกรด silicic ลงไป ที่เวลา ในการกัดต่างกันว่า 2, 4, 6, 8 และ 10 นาที เพื่อที่จะแสดงให้เห็นถึงความลึกของพื้นผิวซิลิคอนที่ผ่าน การกัดในเวลาที่แตกต่างกันของทั้งสองเงื่อนไขการกัด

จากทดลองจะสังเกตเห็นได้ว่าที่เวลาการกัดผ่านไป 2 นาที ค่าความลึกของเงื่อนไขที่เติมสาร AP และกรด silicic นั้นจะยังมีค่าน้อยกว่าในเงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียว ซึ่งมีค่าความ ลึกสารเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปเผยแพร่ขึ้นต้นการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลึกอยู่ที่ $0.44 \mu\text{m}$ และ $1.10 \mu\text{m}$ ตามลำดับ แต่พอเวลาในการกัดผ่านไป 10 นาที ค่าความลึกของเงื่อนไขที่เติมสาร AP และกรด silicic ลงไปนั้นจะมีค่าอยู่ที่ $10.04 \mu\text{m}$ และที่เงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียวจะมีค่าความลึกอยู่ที่ $5.67 \mu\text{m}$ โดยจะเป็นการง่ายต่อการวิเคราะห์และอธิบายผลการทดลอง เราจึงได้แสดงค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนให้เห็นอยู่ในรูปแบบของกราฟเส้นตรงดังแสดงในรูปที่ 4.5

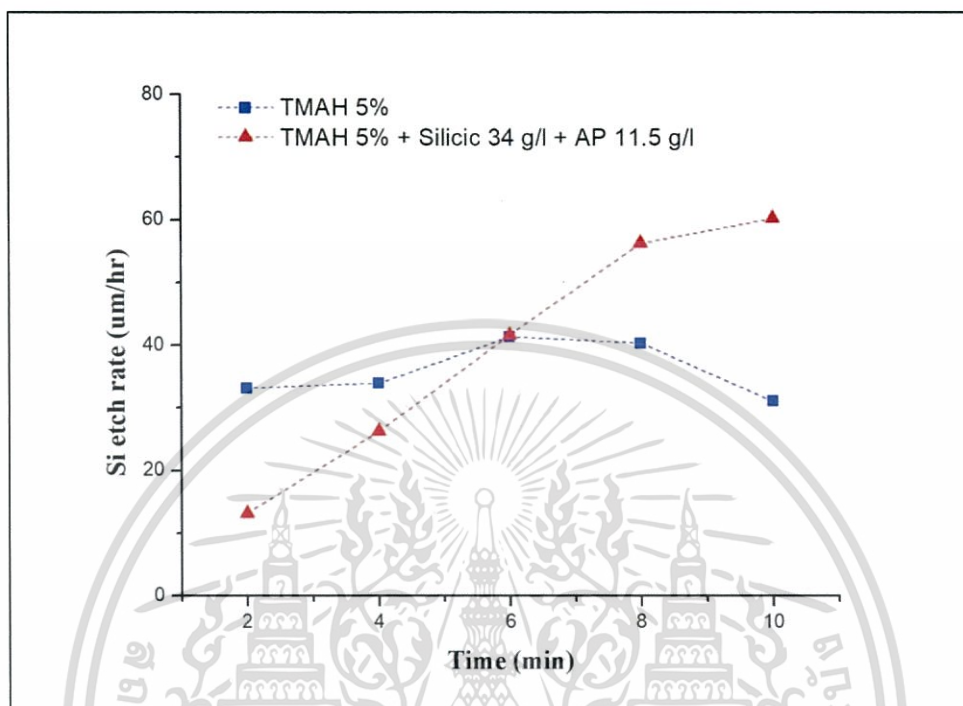


รูปที่ 4.5 กราฟแสดงความลึกของพื้นผิวหลังผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5% เติมกรด silicic 34 g/l และสาร AP 11.5 g/l เปรียบเทียบกับการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5% เพียงอย่างเดียว

จากรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนต่อเวลาในการกัดที่ต่างกันของทั้งสองเงื่อนไขการกัด ซึ่งจากการทดลองจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงแรกที่เวลาในการกัดผ่านไป 2-4 นาที ค่าความลึกของเงื่อนไขการกัดที่ทำการเติมสาร AP และกรด silicic ลงไปจะมีค่าน้อยกว่าในเงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียว นั่นหมายถึงในช่วงเวลานี้สารละลาย TMAH ที่เติมด้วยสาร AP และกรด silicic ลงไป จะมีอัตราการกัดน้อยกว่า หลังจากนั้นค่าความลึกจะมามีค่าเท่ากันที่เวลาการกัดผ่านไป 6 นาที หมายถึงจุดนี้อัตราการกัดซิลิคอนของทั้งสองเงื่อนไขจะมีค่าประมาณเท่ากัน และเมื่อเวลาในการกัดมากกว่า 6 นาทีขึ้นไปค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนในเงื่อนไขการกัดที่ทำการเติมสาร AP และกรด silicic ลงไปจะมีค่ามากกว่า ซึ่งหมายถึงในช่วงเวลานี้ค่าอัตราการกัดของพื้นผิวซิลิคอนของสารละลาย TMAH ที่เติมด้วยสาร AP และกรด silicic จะมีค่ามากกว่าเงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียวแล้ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนนั้นจะทำให้เราสามารถทราบถึงอัตราการกัดของพื้นผิวซิลิคอนได้ โดยการคำนวณจากการนำค่าความลึกของพื้นผิวซิลิคอนหารด้วยเวลาที่ใช้กัด ซึ่งจะแสดงให้เห็นถึงอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนในรูปแบบของกราฟเส้นตรงได้ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 กราฟแสดงอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนระหว่างการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5% เติมกรด silicic 34 g/l และสาร AP 11.5 g/l เปรียบเทียบกับการกัดด้วยสารละลาย TMAH 5%

จากกราฟแสดงอัตราการกัดในรูปที่ 4.6 นี้จะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงแรกของการกัด ที่เวลาในการกัดน้อยกว่า 6 นาทีพบว่าอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนของเงื่อนไขการกัดที่ใช้สารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียวจะมีความมากกว่าในเงื่อนไขที่เติมด้วยสาร AP และกรด silicic แต่พอเวลาในการกัดผ่านไปถึง 6 นาทีกลับพบว่าอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนของทั้งสองเงื่อนไขการกัดจะมีค่าเกือบเท่ากัน และหลังจากนั้นที่เวลาในการกัดมากกว่า 6 นาทีพบว่าอัตราการกัดซิลิคอนของเงื่อนไขที่เติมด้วยสาร AP และกรด silicic จะมีความมากกว่าเงื่อนไขการกัดที่ใช้สารละลาย TMAH เพียงอย่างเดียวแล้ว จะมีค่ามากกว่าประมาณ 2 เท่า ซึ่งจากแนวโน้มของกราฟนี้ทำให้เราสรุปได้ว่าอาจจะมีสาเหตุมาจากคุณสมบัติเฉพาะตัวของสาร AP และกรด silicic โดยที่ในช่วงแรกของการกัดนั้นสาร AP ที่ทำหน้าที่เป็นตัวออกซิไดซ์ซึ่งจะทำให้อัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนของสารละลายสูงขึ้น และกรด silicic ที่ทำหน้าที่ทำให้สารละลายมีอัตราการกัดซิลิคอนที่ช้าลงอาจจะยังไม่เกิดปฏิกิริยาในการกัดที่สมบูรณ์ แต่พอเวลาการกัดเป็น 6 นาที สารเคมีก็จะเริ่มเกิดปฏิกิริยาที่สมบูรณ์แล้ว อัตราการกัดจะเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง สังเกตได้จากอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่เริ่มมีแนวโน้มที่จะมากกว่าเงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH ที่ไม่มีการเติมสารอื่น ซึ่งอัตราการกัดคงที่ และในจุดนี้ความลึกของพื้นผิวซิลิคอนก็จะมีค่าประมาณ 4 μm ซึ่งเป็นค่าความลึกที่เราต้องการจะนำไปใช้สร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงเพื่อที่จะ

ตารางที่ 4.4 แสดงการเปรียบเทียบอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนของสารละลาย

Conditions	Si Etch Rate ($\mu\text{m/hr}$)
TMAH 5 wt%	34.02
TMAH 5 wt% + silicic 34 g/l + AP 11.5 g/l	60.24
TMAH 25 wt% + IPA 30 vol%	20.40

เมื่อนำค่าอัตราการกัดของสารเคมีมาแสดงให้เห็นในรูปแบบของตารางโดยที่เราได้นำค่าอัตราการกัดของสารในเงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt.% เติมด้วยสารลดแรงตึงผิว IPA [16] เข้ามาเปรียบเทียบกับเนื่องจากคุณสมบัติของสารลดแรงตึงผิว IPA และสาร AP นั้นมีความคล้ายคลึงกันตรงที่สามารถทำให้พื้นผิวซิลิคอนมีความเรียบเพิ่มขึ้นหลังผ่านการกัด แต่สารลดแรงตึงผิว IPA กลับทำให้อัตราการกัดของสารละลายนั้นช้าลง นั้นทำให้ต้องใช้เวลามากขึ้นในการสร้างชิ้นงาน นอกจากนี้สารลดแรงตึงผิว IPA ยังสามารถระเหยได้ที่อุณหภูมิสูงขึ้นและยังมีราคาแพงอีกด้วย ซึ่งในเงื่อนไขของการเติมสารลดแรงตึงผิว IPA ที่เรานำมาเปรียบเทียบกับนี้เป็นเงื่อนไขที่มีความเรียบใกล้เคียงกันกับเงื่อนไขที่เติมกรด silicic และสาร AP แต่จะสังเกตเห็นได้ว่าในเงื่อนไขที่เติมกรด silicic และสาร AP นั้นจะมีอัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนมากกว่าในเงื่อนไขที่เติมสารลดแรงตึงผิว IPA ถึง 3 เท่า ซึ่งทำให้ในการสร้างชิ้นงานจะทำได้รวดเร็วมากขึ้น ดังแสดงให้เห็นในตารางที่ 4.4

4.3 ศึกษาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและแบบร่องรูปด้วย

ในการศึกษาลักษณะสมบัติของกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงนั้น ในงานวิจัยนี้จะทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบมาใช้ในการเปรียบเทียบ เนื่องจากการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบมีกระบวนการสร้างที่ง่าย ไม่ซับซ้อนและในส่วนของศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ได้ทำการศึกษาการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบมาอย่างยาวนานจึงทำให้ผลลัพธ์ที่ได้ใกล้เคียงกับทฤษฎีและงานวิจัยอื่นๆ ซึ่งในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงนั้นจะทำการวัดโดยใช้เครื่อง I-V probe station ซึ่งอยู่ในกล่องป้องกันไม่ให้แสงจากภายนอกเข้าไปมีผลกระทบกับตัวตรวจวัดแสง เครื่องมือนี้จะทำหน้าที่เชื่อมต่อขาของขั้วอะลูมิเนียมที่อยู่บนแผ่นซิลิคอน จากนั้นจะทำการป้อนค่าแรงดันเพื่อใช้หาค่ากระแสจากระบบเครื่องมือวัด โดยจะป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V ทำการวัดทั้งในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบและไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยในส่วนที่ได้รับแสงตกกระทบนั้นจะมีการทดสอบประสิทธิภาพทั้งในส่วนของการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสและเปลี่ยนแปลงความเข้มแสง เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการตรวจวัดแสงทั้งในขณะที่ความเข้มแสงน้อยและความเข้มแสงมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

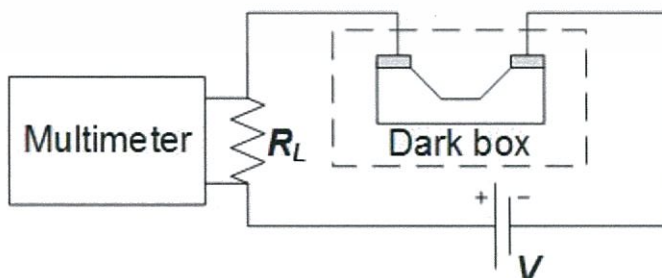
ก่อนที่จะนำตัวตรวจวัดแสงไปทำการตรวจวัดคุณลักษณะของกระแส-แรงดันนั้นเราจะต้องนำตัวตรวจวัดแสงที่สร้างขึ้นไปทำการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าด้วยความร้อนหรือเรียกว่ากระบวนการซินเตอร์ริง[16] เพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและฐานรองซิลิคอนมีความสมบูรณ์มากที่สุดซึ่งจะต้องผ่านกระบวนการซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 15 นาทีที่ก่อนดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ตัวตรวจวัดแสงขณะทำกระบวนการซินเตอร์ริง

4.3.1 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

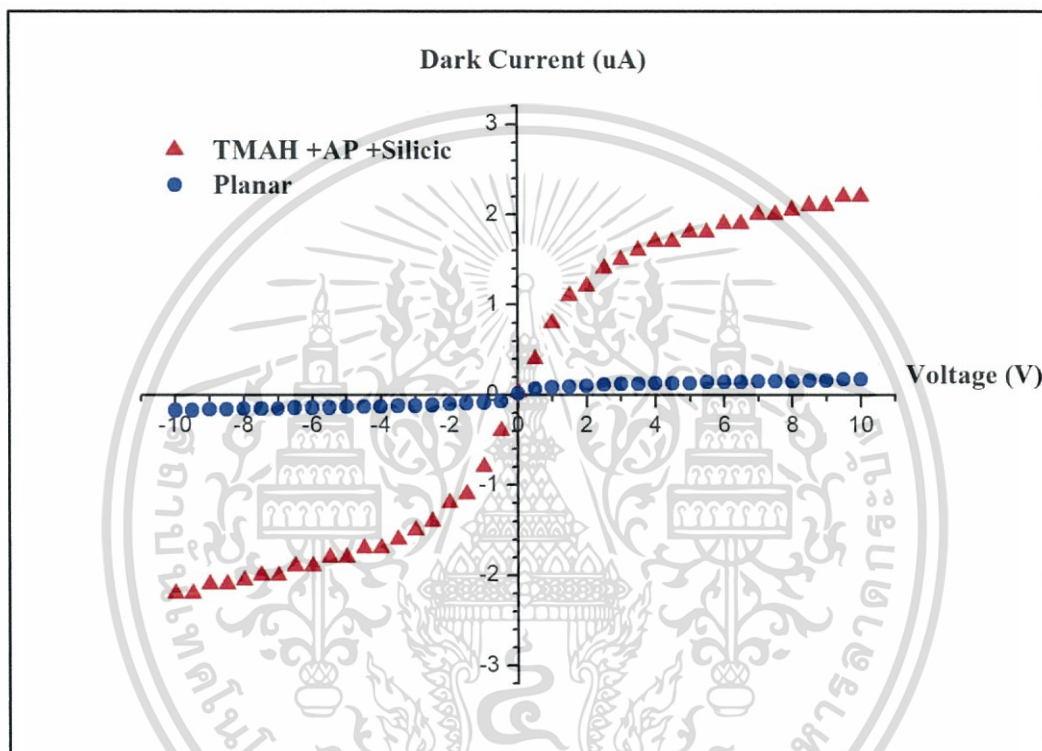
ทำการทดลองในขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบแต่จะมีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสง โดยให้ขั้วโลหะด้านหนึ่งได้รับไบอัสตรง และขั้วโลหะอีกด้านได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ โดยขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้ จะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะเคลื่อนตัวข้ามกำแพงศักย์ช็อคตักก็ไปยังด้านของสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่ว หรือเรียกว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเราจะทำการหาความสัมพันธ์ของกระแสที่ได้ในขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบต่อแรงดันไบอัสที่ป้อนเข้าไป โดยต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 4.8



รูปที่ 4.8 แผนภาพชุดการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยในการทดลองนี้เราจะนำค่ากระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านการชินเตอริงมาแล้วที่อุณหภูมิ 500 °C เป็นเวลา 15 นาที ทั้งตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบซึ่งมีลักษณะเด่นคือสามารถสร้างได้ง่ายและมีค่ากระแสรั่วต่ำ มาเปรียบเทียบกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่ผ่านการกัดในเงื่อนไขที่ใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมนครด silicic ปริมาณ 34 g/l และเติมสาร AP ปริมาณ 11.5 g/l เพื่อแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของค่ากระแสรั่วที่มีความเกี่ยวเนื่องกันกับการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างลักษณะทางกายภาพตัวตรวจวัดแสง ดังที่ได้แสดงให้เห็นดังรูปที่ 4.9

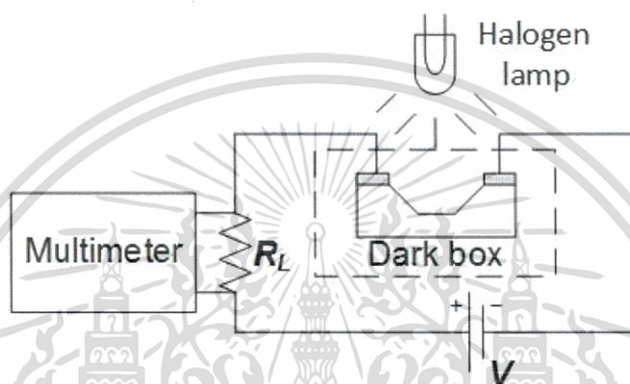


รูปที่ 4.9 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ และโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

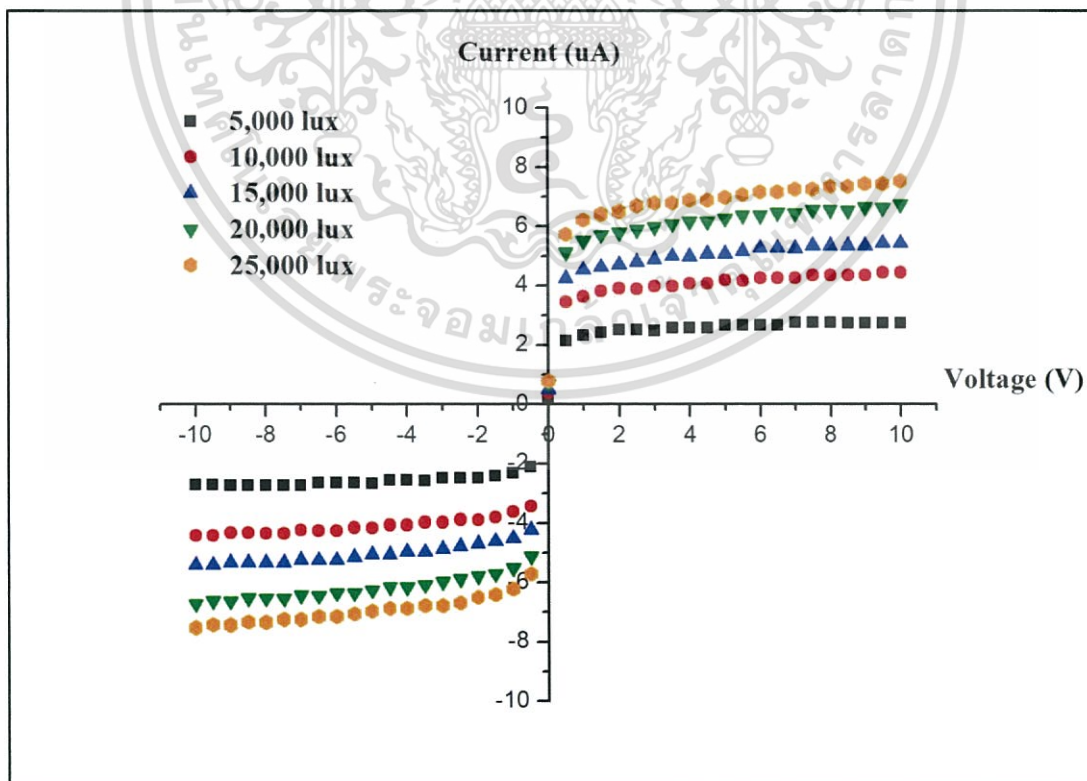
จากรูปที่ 4.9 พบว่าตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านกระบวนการกัดด้วยสารละลาย TMAH มีค่ากระแสรั่วเพิ่มขึ้นจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบอยู่พอสมควร เนื่องจากการกัดด้วยสารละลาย TMAH นั้นจะเป็นกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยใช้สารเคมีในการกัด ซึ่งกระบวนการกัดแบบนี้มีความสกปรกมากกว่ากระบวนการกัดแบบแห้งที่ใช้ก๊าซในการกัด และสารละลายที่เราใช้ทำการกัดก็อาจจะทิ้งประจุตกค้างหลังการกัดไว้ได้ โดยค่ากระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นจะมีค่าเป็น 0.17 μA และ 2.2 μA ตามลำดับ ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัส 10 V

4.3.2 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบบ

ในหัวข้อนี้จะทำการศึกษาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ และตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบบ โดยในการทดลองจะทำการเปลี่ยนแปลงความเข้มแสงในค่าที่ต่างกัน ซึ่งจะให้เห็นถึงความสามารถในการตอบสนองต่อแสงที่ความเข้มแสงต่างๆ ซึ่งจะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากหลอดฮาโลเจน (halogen lamp) โดยทำการต่อชุดการทดลองดังรูปที่ 4.10 และจะทำการวัดที่แรงดันไบอัส -10 V ถึง 10 V ที่ความเข้มแสงต่างกันคือ 5,000 lux, 10,000 lux, 15,000 lux, 20,000 lux และ 25,000 lux แสดงในรูปที่ 4.11, 4.12 และ 4.13



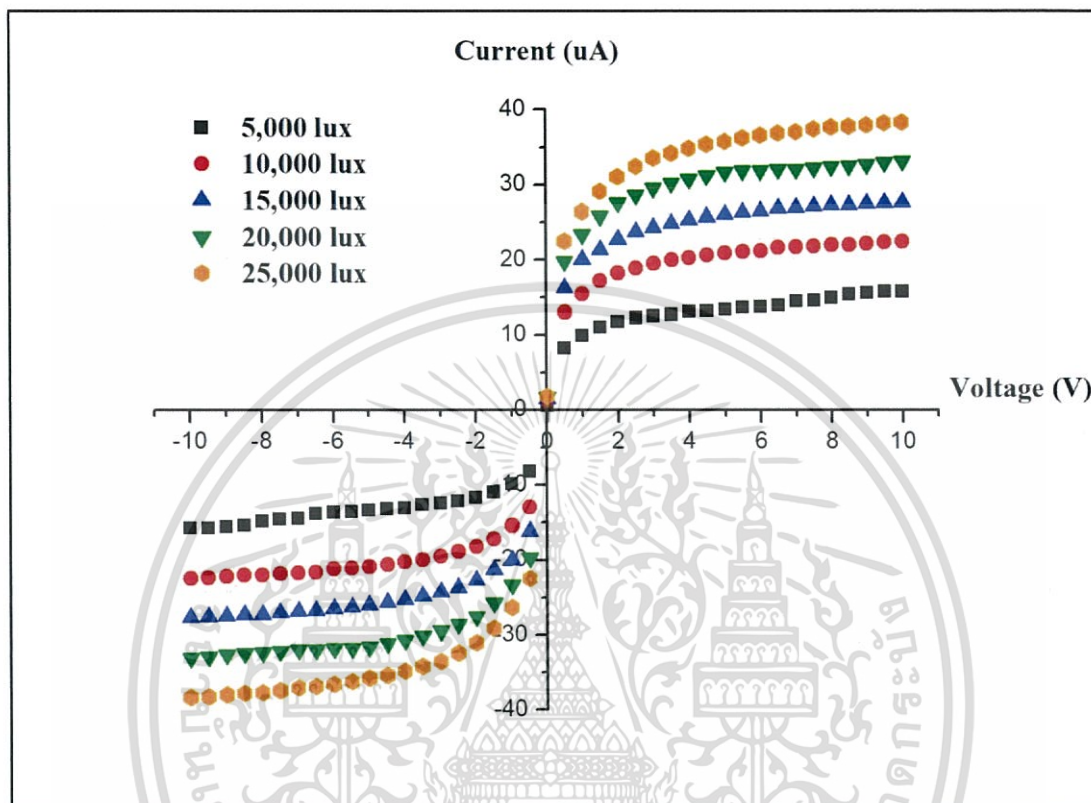
รูปที่ 4.10 แผนภาพชุดการทดลองลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบบ



รูปที่ 4.11 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ ขณะที่ได้รับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่การหาค่ากระแสแสง (Photocurrent) นั้นจะสามารถหาได้โดยการนำค่ากระแสที่ได้จากการวัดทั้งหมด ลบด้วยกระแสมืดหรือกระแสรั่วที่ได้ ซึ่งจะได้กราฟความสัมพันธ์ลักษณะสมบัติของกระแสแสง-แรงดัน ของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ดังแสดงในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ตามลำดับ

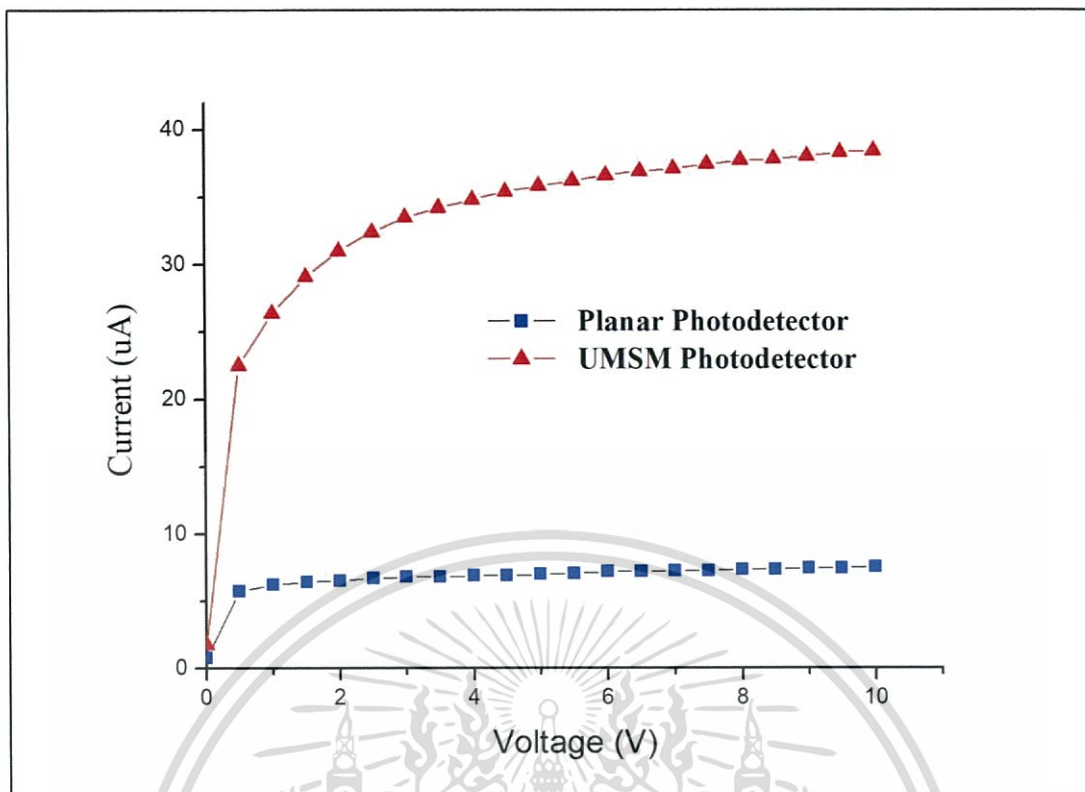


รูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.11 และรูปที่ 4.12 ลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู นั้น พบว่าตัวตรวจวัดแสงทั้งสองโครงสร้างสามารถตอบสนองต่อแสงได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ยังพบว่ากระแสแสงจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อให้ความเข้มแสงมากขึ้น เนื่องจากความเข้มแสงที่มากขึ้นจะทำให้ปริมาณโฟตอนที่ตกกระทบลงบนตัวตรวจวัดแสงมีค่าเพิ่มมากขึ้น จึงทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลเพิ่มสูงขึ้นไปด้วย และเมื่อปริมาณพาหะทำให้เกิดกระแสมีค่าสูงขึ้นจึงทำให้กระแสแสงที่วัดได้มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่ตกกระทบด้วย

ในการทดลองยังสังเกตเห็นอีกว่าตัววัดแสงเมื่อผ่านการกัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรด silicic และสาร AP เพื่อให้เกิดเป็นโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้น จะมีค่ากระแสแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบที่ค่าแรงดันไบอัสและปริมาณความเข้มแสงเดียวกัน เราจึงได้ทำการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองโครงสร้างนี้ โดยใช้ความเข้มแสงจากหลอดฮาโลเจน (Halogen lamp) ที่ปริมาณความเข้มแสง 25,000 lux ขณะที่ยอนแรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง 10 V ดังแสดงในรูปที่ 4.13

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 เปรียบเทียบลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ และโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ขณะที่ได้รับแสงความเข้มแสง 25,000 lux

จากการเปรียบเทียบลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้น พบว่าขณะที่ป้อนแรงดันไบอัสให้กับตัวตรวจวัดแสง 10 V ที่ปริมาณความเข้มแสงตกกระทบ 25,000 lux ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นมีค่ากระแสแสงเป็น 7.53 μA และ 38.4 μA ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูนั้นมีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้นจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบอยู่ประมาณ 5 เท่า อันเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงจากการกัดพื้นผิวซิลิคอนเป็นแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งทำให้มีพื้นที่รับแสงบริเวณระหว่างขั้วไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น โดยที่ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบนั้น จะมีพื้นที่รับแสงจำกัดอยู่ที่บริเวณที่ใช้รับแสงหรือระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองเท่านั้น และจากการทดลองวัดลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันนี้ ซึ่งทำให้เราสามารถสรุปได้ว่า การสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูมีผลกระทบต่อตอบสนองของกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงเป็นอย่างมาก ดังนั้นการทดลองนี้จึงจะเป็นการศึกษาที่มีส่วนสำคัญอย่างยิ่งต่อการสร้างตัวตรวจวัดแสงในอนาคต

สรุปผลการทดลอง

สรุปผลการทดลอง

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปด้วย โดยใช้สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Tetramethylammonium Hydroxide : TMAH) ที่ผ่านการเติมด้วยสารแอมโมเนียมเปอร์ออกไซด์ซัลเฟต (Ammonium Peroxodisulphate ; AP) และกรด silicic ในการกัดพื้นผิวซิลิคอนที่บริเวณระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่รับแสงให้กับตัวตรวจวัดแสงโดยไม่ต้องเพิ่มระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า ซึ่งส่วนแรกจะทำการศึกษาลักษณะพื้นฐานของพื้นผิวซิลิคอนและอัตราการกัดของสารเคมี ในส่วนที่สองนั้น จะทำการศึกษาลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันทั้งในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบและไม่ได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงที่เราได้สร้างขึ้น

ในการศึกษาลักษณะพื้นฐานของพื้นผิวซิลิคอนและอัตราการกัดของสารเคมีนั้น พบว่าในเงื่อนไขการกัดที่ใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt.% เติมกรด silicic ปริมาณ 34 g/l เติมสาร AP ปริมาณ 11.5 g/l ซึ่งเป็นเงื่อนไขที่ดีที่สุดที่พื้นผิวซิลิคอนมีความเรียบเหมาะสมที่จะนำไปสร้างเป็นตัวตรวจวัดแสงขึ้นซึ่งมีความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนเหลือเพียงแค่ประมาณ 10 nm เท่านั้น และเมื่อนำเงื่อนไขการกัดนี้ไปทำการศึกษ้อัตราการกัดพื้นผิวซิลิคอนพบว่ามีอัตราการกัดเป็น 60.24 $\mu\text{m/hr}$ ซึ่งจะมากกว่าในเงื่อนไขการกัดที่ใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 25 wt.% เติมด้วยสารลดแรงตึงผิว IPA ถึง 3 เท่าในขณะที่มีความเรียบของพื้นผิวใกล้เคียงกัน หลังจากนั้นจะทำการตรวจวัดลักษณะสมบัติของกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงทั้งโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวอยู่ในสภาวะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบก่อนซึ่งพบว่า ในขณะที่ได้รับแรงดันไบอัส 10 V ค่ากระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวอยู่นั้น จะมีค่าเป็น 0.17 μA และ 2.2 μA ตามลำดับ และเมื่อนำมาทดสอบในขณะที่ได้รับแสงตกกระทบพบว่า ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวอยู่นั้นมีค่ากระแสแสงเป็น 7.53 μA และ 38.4 μA ตามลำดับ ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ชัดว่าตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวอยู่นั้นมีกระแสแสงเพิ่มมากขึ้นจากโครงสร้างแบบเชิงราบอยู่ประมาณ 5 เท่าซึ่งจากการทดลองในครั้งนี้ทำให้สังเกตเห็นได้ว่าการเติมสาร AP เข้าไปนั้น นอกจากจะมีคุณสมบัติที่ทำให้พื้นผิวของซิลิคอนมีความเรียบแล้ว ยังมีส่วนไปช่วยเพิ่มอัตราการกัดของสารเคมีด้วย ซึ่งทำให้เราลดเวลาในการสร้างตัวตรวจวัดแสงลงไปได้ และในเมื่อพื้นผิวมีความเรียบมากทั้งที่เราใช้สารละลาย TMAH ความเข้มข้นต่ำนั้น ก็ทำให้เราสามารถลดปริมาณความสิ้นเปลืองของการใช้สารละลาย TMAH ลงไปได้ อีกทั้งตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวอยู่นี้ยังทำให้กระแสแสงที่ได้รับเพิ่มมากขึ้นกว่าโครงสร้างแบบเชิงราบอีกด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ัญญะ ศักดิ์โสภิชฐ์, “ทรานซิสเตอร์ความดันชนิดซิลิกอนแบบเปียโซรีซิสทีปบนไดอะแฟรมบาง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2534
- [2] งามจิต มงคลธนานนท์, “การศึกษาการกัดแผ่นผลึกซิลิกอนแบบร่องรูปด้วยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบ UMSM”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2559
- [3] Werasak Sonphao, “Silicon Anisotropic Etching of TMAH Solution”, ISIE 2001, Pusan, KOREA
- [4] Kejia (Albert) Wang, “Wire textured, multi-crystalline Si solar cells created using self-assembled masks”, OPTICS EXPRESS A568. Vol. 18, No. S4
- [5] D. Xuefeng, “Microfabrication Using Bulk Wet Etching with TMAH”. Master Degree Thesis of McGill University. 2005
- [6] Xiaoge Gregory Zhang “Electrochemistry of Silicon and Its Oxide”. Cominco Ltd. Mississauga, Ontario, Canada and McMaster University Hamilton, Ontario, Canada. 2001
- [7] Avinash P. Nayak, Logeeswaran VJ and M. Saif Islam “Wet and Dry Etching”. University of California, Davis. California. 2011
- [8] ศรีเมฆ รัตนชัย, “เทคนิคการกัดคานเดี่ยวซิลิกอนเพื่อเป็นตัวตรวจจับอัตราเร่ง”, วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2542
- [9] K. Biswas, S. Das, “Etch characteristics of KOH, TMAH and dual TMAH for bulk micromachining of silicon”. Microelectronics Journal 37 (2006) 321–327
- [10] J. LACONTE, “Micromachined Thin-Film Sensors for SOI-CMOS Co-Integration”. Intersema Sensoric SA, Bevaix, Switzerland . 2006
- [11] สมเกียรติ ศุภเดช, “เทคโนโลยีจรรวม 2”, แผนกตำราคณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- [12] ผลของการสะท้อนแสงของผิวเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซิลิกอนที่มีลวดลายพีระมิด, กิตติศักดิ์ อมรสุนทรทวงศ์, ดร.ทิพย์วรรณ พิงสุวรรณรักษ์ การประชุมเชิงวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 6 5 - 7 พฤษภาคม 2553 มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

- [13] K. Sato, M. Shikida, T. Yamashiro, M. Tsunekawa, S. Ito, *Roughness of single-crystal silicon surface etched by KOH water solution*, Sens. Actuators A 73 (1999) 122-130
- [14] *Characterization of pyramid formation arising from the TMAH etching of silicon* W.K. Choi *, J.T.L. Thong, P. Luo, C.M. Tan, T.H. Chua, Y. Bai Received 3 April 1998, accepted 5 June 1998
- [15] ธเนศ โชะเหม, “การออกแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/n-Si/Al แบบพลาแนร์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2548
- [16] วุฒิไกร คำอ่อน, “การกัดผิวซิลิคอนให้เรียบโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al แบบร่องรูปตัวยู”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560
- [17] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “โครงการวิจัย การพัฒนาเทคโนโลยีกระบวนการสร้างวงจรรวมแบบ ซิมอส ระดับ 5 ไมครอน”, ทุนอุดหนุนการวิจัย พัฒนา และวิศวกรรม, ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ. 2545