

การสร้างชั้นพอร์สบนร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al

POROUS FABRICATION ON U-SHAPE OF Al/Ti/p-Si/Ti/Al PHOTODETECTOR



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2566

KMITL-2023-EN-M-XXX-XXX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

POROUS FABRICATION ON U-SHAPE OF Al/Ti/p-Si/Ti/Al PHOTODETECTOR



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN ELECTRONICS ENGINEERING
SCHOOL OF ENGINEERING
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG
2023
KMITL-2023-EN-M-XXX-XXX

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



COPYRIGHT 2023

SCHOOL OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การสร้างชั้นพอร์สบนร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al
นักศึกษา	นางสาวจิตาภา วิจฝืน
รหัสประจำตัว	61601217
ปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา	วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์
พ.ศ.	2566
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์	รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ

บทคัดย่อ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้นำเสนอเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู ซึ่งตัวตรวจวัดแสงชนิดนี้มีจุดเด่นในการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยเทคนิคของการกัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย HF : 3HNO₃ : 5DI และใช้แสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มแสง 30,000 ลักซ์ ในการกระตุ้นการเกิดพอร์สซิลิคอนด้วยเวลา 2 นาที โดยพอร์สหรือรูพรุนขนาดเล็กจะถูกสร้างขึ้นบนพีระมิตที่อยู่ระหว่างขั้วโลหะไททาเนียม (Ti) และอะลูมิเนียม (Al) บนฐานรองซิลิคอนชนิดพี สภาพต้านทาน 20 – 25 Ω.cm เพื่อช่วยลดการสะท้อนของแสง และช่วยให้ค่ากระแสแสงเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ยังมีการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering) สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al โดยพบว่า ตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบที่ซินเตอร์ริงด้วยอุณหภูมิ 250 °C มีการเกิดชั้นอินเตอร์เฟซบริเวณรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ และเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากมีค่ากระแสมืดต่ำที่สุด เท่ากับ 1.68 μA ที่แรงดันไบอัส 10 V ซึ่งต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสงที่ไม่ผ่านการซินเตอร์ริง 34% ในส่วนสุดท้ายเป็นการเปรียบเทียบคุณสมบัติทางกายภาพและทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู พบว่า ตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูมีการตอบสนองทางแสงจากความยาวคลื่น 635 nm กำลังแสง 6 mW เท่ากับ 98.91 μA ที่แรงดันไบอัส 10 V ซึ่งสูงกว่าค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู 10.99% และแบบเชิงราบ 35.64 % โดยสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูมีความขรุขระของพื้นผิวสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงชนิดอื่น ซึ่งมีลักษณะเป็นพอร์สหรือรูพรุนขนาดเล็กประมาณ 116 – 864 nm บริเวณพีระมิตแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู ทำให้ช่วยลดการสะท้อนแสงและดูดกลืนแสงได้มากขึ้น ดังนั้น การสร้างพอร์สพีระมิตเหมาะสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ต้องการให้ค่ากระแสแสงเพิ่มสูง

Thesis	Porous Fabrication on U-shape of Al/Ti/p-Si/Ti/Al Photodetector
Student	Ms.Jidapa Vijafun
Student ID.	61601217
Degree	Master of Engineering
Program	Electronics Engineering
Year	2023
Thesis Advisor	Assoc.Prof.Dr.Surasak Niemcharoen

ABSTRACT

This thesis proposes the Al/Ti/p-Si/Ti/Al photodetector including planar MSM, pyramid UMSM and porous pyramid UMSM that is fabricated by stain etching technique with the mixed of HF : 3HNO₃ : 5DI and use halogen lamp 30,000 lux to excite the porous formation in 2 minutes. The Porous is fabricated on pyramid between metal electrode titanium and aluminum on p-type silicon 20 - 25 Ω.cm to reduce the reflection of light and to increase a photo current. In addition, this thesis proposes a study of temperature in sintering process for Al/Ti/p-Si/Ti/Al photodetector. The experiment reveals evidence of the in interface between metal - semiconductor layer and the dark current of planar MSM photodetector with sintering at 250 °C is lowest as 1.68 μA at bias voltage 10 V, lower than dark current of photodetector without sintering 34%. In the final part of this thesis is the comparison physical and electrical characteristic of planar MSM, pyramid UMSM and porous pyramid UMSM photodetectors. The comparison reveals the porous pyramid UMSM photodetector respond light with wave length 635 nm and power 6 mW equal 98.91 μA at bias voltage 10 V that higher than pyramid UMSM and planar MSM photodetector 10.99% and 35.64 % respectively. The electrical characteristic correlates with the physical characteristic that silicon surface of porous pyramid UMSM photodetector is rougher than planar MSM and pyramid UMSM photodetector. Silicon surface of porous pyramid UMSM photodetector have porous 116 – 864 nm on pyramid in U-shape that can reduce the light reflection and increase the light absorption. Therefore the forming of porous is appropriate for the fabrication of U-shape metal-semiconductor-metal (UMSM) with high current.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จได้ด้วยความรู้ความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา รศ.ดร.สุรศักดิ์ เนียมเจริญ ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำชี้แนะและการแก้ปัญหาตลอดจนการให้ความรู้และประสบการณ์ เพื่อเป็นแนวทางในการเรียนและการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้จนบรรลุตามเป้าหมาย

ขอขอบคุณ คณะอาจารย์ทุกท่านที่ให้ความเมตตาประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ตลอดจนให้คำปรึกษาทางวิชาการ รวมไปถึงปลูกฝังสิ่งที่ตั้งใจให้แก่ลูกศิษย์

ขอขอบคุณ ดร.อัมพร โพธิ์ไย ผู้อำนวยการศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC), ดร. จิรวัฒน์ ปราบเขต, และนักวิจัยศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ทุกท่าน สำหรับการสนับสนุนเทคโนโลยีในการสร้างและเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณ คุณกมลวรรณ สุทธิเจริญ ที่ถ่ายทอดความรู้เกี่ยวกับกระบวนการสร้างและการวิเคราะห์ผลการทดลองบางส่วนรวมทั้งให้คำแนะนำเกี่ยวกับงานทางวิชาการที่มีประโยชน์ต่องานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้

ขอขอบคุณ บริษัทยูแทค ไทย จำกัด และบริษัทอินฟินีออน เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด สำหรับเครื่องมือในการวิเคราะห์ผลการทดลองสำหรับงานวิจัยนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกท่านที่คอยเป็นกำลังใจโดยตลอดมา รวมทั้งบุคคลอื่นๆ ที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ช่วยให้คำแนะนำและช่วยเหลือจนทำให้วิทยานิพนธ์นี้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

สำหรับคุณงามความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้กับบิดามารดา ซึ่งเป็นที่รักและเคารพยิ่ง ตลอดจนครูอาจารย์ที่เคารพทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้และถ่ายทอดประสบการณ์ที่ดีให้แก่ข้าพเจ้า

จิตาภา วิจฝัน

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	IX
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	3
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน.....	4
1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง.....	6
2.1 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	6
2.1.1 ลักษณะสมบัติทางแสง.....	7
2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน.....	7
2.1.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ.....	9
2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดของคู่อิเล็กตรอน - โฮล.....	10
2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน - โฮล.....	12
2.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ.....	14
2.2.1 การเกิดรอยสัมผัสแบบซีดต์กี๊ย์ในภาวะสมดุล.....	14
2.2.2 การทำงานของรอยสัมผัสแบบซีดต์กี๊ย์.....	15
2.2.3 ลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสซีดต์กี๊ย์.....	17
2.3 ตัวตรวจวัดแสง.....	18
2.3.1 ตัวตรวจวัดแสงในสภาวะสมดุล.....	18
2.3.2 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	21

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบ.....	21
2.4 พอร์สซิลิคอน.....	23
2.4.1 ประเภทของพอร์สซิลิคอน.....	24
2.4.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน.....	26
2.4.3 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน.....	28
2.4.4 กระบวนการสร้างพอร์สซิลิคอน.....	29
2.4.4.1 วิธีสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	29
2.4.4.2 วิธีสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยแสงเลเซอร์.....	30
2.4.4.3 วิธีการสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนจากคลื่นความถี่สูง.....	30
2.4.4.4 วิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี.....	31
2.4.4.5 วิธีการกัดข้อมสี (stain etching)	33
2.5 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน.....	35
2.6 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน.....	36
2.6.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์.....	36
2.6.2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-electronic).....	37
2.6.3 ชีวการแพทย์ (Biomedical).....	37
2.6.4 เครื่องตรวจจับ.....	38
บทที่ 3 การออกแบบและกระบวนการสร้าง.....	39
3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู.....	39
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย.....	41
3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นซิลิคอนเพื่อใช้ในสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al.....	41

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปด้วยชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al	42
3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและวัดสมบัติทางไฟฟ้า	44
3.3 กระบวนการสร้าง.....	44
3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน.....	45
3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะไทเทเนียมและอะลูมิเนียม.....	46
3.3.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์.....	46
3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี	46
3.3.5 การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด.....	50
3.3.6 กระบวนการกัด	52
3.3.7 กระบวนการชินเตอริง.....	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง.....	54
4.1 การศึกษาอุณหภูมิในกระบวนการชินเตอริงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	54
4.2 การศึกษาการสร้างพอร์สด้วยวิธีการกัดย้อนสปีบนผิวซิลิคอน.....	57
4.2.1 การศึกษาผลของแสงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน.....	57
4.2.2 การศึกษาผลของคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน	59
4.2.3 ผลของสารละลาย $HF + 3HNO_3 + 5H_2O$ ที่มีต่อชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียม.....	60
4.2.4 ผลของสารละลาย $HF + 3HNO_3 + 5H_2O$ ที่มีต่อชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)	62
4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจแสงแบบพีระมิตและพอร์สพีระมิตบนร่องรูปด้วย	64
4.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปด้วยด้วยเทคนิค SEM	64

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูด้วยเทคนิค SEM	66
4.3.3 การวิเคราะห์ธาตุบริเวณพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูด้วยเทคนิค EDX.....	67
4.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะความขรุขระพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูด้วยเทคนิค SEM....	68
4.4 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู.....	70
4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ.....	70
4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส – แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงตกกระทบบ.....	72
4.5 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า.....	74
4.5.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู.....	74
4.5.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบบ และได้รับแสงตกกระทบบของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู.....	77
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	79
เอกสารอ้างอิง	82
ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่.....	87
ประวัติผู้เขียน.....	98

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ ที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ (V)	56
4.2 เวลาในการเกิดพอร์สที่ความเข้มแสง 3,000, 10,000 และ 30,000 ลักซ์	58
4.3 เวลาในการเกิดพอร์สที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง และมีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง.....	60
4.4 ค่าความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู.....	69
4.5 ตารางเปรียบเทียบความขรุขระผิวเฉลี่ย ความลึกซิลิคอน ค่าเฉลี่ยขนาดฐานของพีระมิดค่าเฉลี่ยความสูงของพีระมิดของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM) และแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM).....	77
4.6 การเปรียบเทียบลักษณะคุณสมบัติไฟฟ้าที่แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ แบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู.....	78

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะแบบต่างๆ.....	2
1.2 ลักษณะพื้นผิวพอร์ซซิติกอนจากการกัดแบบย้อมสี.....	2
2.1 ลักษณะการสะท้อนแสงบนวัตถุที่พื้นผิวเรียบและหยาบ	6
2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กทรอนิกส์ของสารกึ่งตัวนำ.....	8
2.3 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ.....	9
2.4 การดูดกลืนแสงภายในสารกึ่งตัวนำ.....	9
2.5 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิค.....	11
2.6 การเกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เอ็กทรีนซิค.....	12
2.7 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ.....	13
2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อตีก็.....	14
2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อตีก็.....	15
2.10 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสขั้วต่อตีก็หลังจากได้รับแรงดันไบอัสตรง และแรงดันไบอัสย้อนกลับ.....	16
2.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของขั้วต่อตีก็ไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น.....	18
2.12 ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตีก็(โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น)	19
2.13 ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตีก็(โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี)	20
2.14 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตีก็เมื่อได้รับแรงดันไบอัส.....	21
2.15 แถบพลังงานของโครงสร้างสองรอยสัมผัสขั้วต่อตีก็เมื่อได้รับไบอัสและมีแสงตกกระทบ.....	22
2.16 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ.....	23
2.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องภาค	24

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
2.18 ประเภทของพอร์ซซิลิคอนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน.....	25
2.19 ประเภทของพอร์ซซิลิคอนแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน	25
2.20 ประเภทของพอร์ซซิลิคอนแบ่งตามขนาดของรูพรุน.....	26
2.21 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ.....	27
2.22 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานภายในพอร์ซซิลิคอน.....	28
2.23 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการสลายตัวของ ก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ.....	29
2.24 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรจากคลื่นความถี่สูง.....	30
2.25 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยการกัดทางไฟฟ้า-เคมี.	31
2.26 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อผลึกซิลิคอน.....	31
2.27 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดข้อมสี่.....	33
3.1 ลวดลายบนกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง.....	39
3.2 ภาพของภาคตัดขวางโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วยชนิด Al/Ti/p- Si/Ti/Al	40
3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นซิลิคอนเพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสง.....	42
3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของตัวตรวจวัดแสง.....	43
3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและวัดสมบัติทางไฟฟ้า.....	44
3.6 การลอกชั้นออกไซด์ที่เกิดจากธรรมชาติ (native oxide) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก.....	45
3.7 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพอร์ซ พีระมิตบนร่องรูปด้วย ชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al.....	49
3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% และ กรดซิลิซิก.....	51
3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนด้วยสารละลาย HF + 3HNO ₃ + 5H ₂ O.....	51
3.10 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย HF + 3HNO ₃ + 5H ₂ O.....	52
3.11 ตัวตรวจวัดแสงหลังการขึ้นเตอริงและนำมาเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน.....	53

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.1 ลักษณะตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ.....	54
4.2 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	55
4.3 ภาพตัดขวางบริเวณชั้นของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al.....	57
4.4 ลักษณะแผ่นซิลิคอนขณะกัดแบบย้อมสีเป็นเวลา 2 นาที.....	58
4.5 ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกัดแบบย้อมสีที่ฉายด้วยความเข้มแสง 30,000 ลักซ์ โดยใช้กล้องไมโครสโคป.....	59
4.6 ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกัดแบบย้อมสีที่ฉายด้วยความเข้มแสง 30,000 ลักซ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	59
4.7 ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์ซิลิคอนจากการกัดแบบย้อมสี โดยใช้กล้องไมโครสโคป.....	60
4.8 ภาพจำลองโครงสร้างแผ่นซิลิคอนและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al	61
4.9 ลักษณะของชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ถูกกัดด้วยสารละลาย $HF + 3HNO_3 + 5H_2O$	61
4.10 ภาพจำลองโครงสร้างแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่เคลือบด้วยไทเทเนียม อะลูมิเนียม และซิลิคอนไดออกไซด์.....	62
4.11 ลักษณะผิวของตัวตรวจวัดแสงที่กัดด้วยสารละลาย $HF + 3HNO_3 + 5H_2O$	63
4.12 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวบริเวณชั้นตัวตรวจวัดแสงหลังการกัดแบบย้อมสี	63
4.13 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al โดยกล้องไมโครสโคป.....	64
4.14 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวซิลิคอนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู.....	65
4.15 ภาพจำลองฟองก๊าซไฮโดรเจนบริเวณผิวหน้าซิลิคอนระนาบ (100)	65
4.16 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวซิลิคอนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบพอร์สพีระมิต.....	66
4.17 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวซิลิคอน.....	68

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.18 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณพื้นผิวซิลิคอน.....	69
4.19 เครื่องมือที่ใช้ในการหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน.....	70
4.20 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ.....	71
4.21 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู.....	72
4.22 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ.....	73
4.23 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวซิลิคอนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al.....	75
4.24 ภาพจำลองลักษณะพีระมิตแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (ก) ภาคตัดขวางของพีระมิต และ (ข) ภาพด้านบนพีระมิต.....	76

บทที่ 1

บทนำ

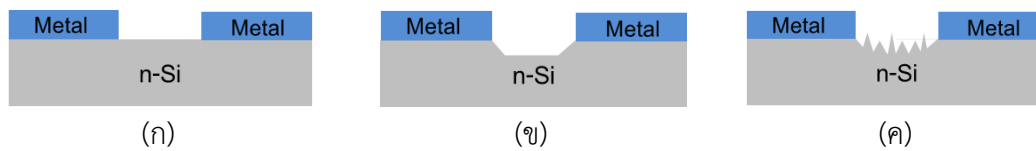
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของงานวิจัย

ในปัจจุบันอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้เข้ามามีบทบาทในการใช้ชีวิตประจำวันของมนุษย์ทั้งทางด้านการสื่อสาร การคมนาคม การแพทย์ เป็นต้น ดังนั้นทำให้การพัฒนาสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำซึ่งเป็นส่วนสำคัญของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์จึงมีความหลากหลายเพื่อตอบสนองกับการใช้งานในด้านต่างๆ ดังเช่น การเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานด้วยความเร็วสูง เพื่อให้อุปกรณ์มีการตอบสนองได้ทันที [1] การลดขนาดเพื่อให้สามารถเป็นอุปกรณ์ที่พกพาได้ การเลือกใช้วัสดุในการผลิตที่มีประสิทธิภาพ ซึ่งวัสดุที่นำมาใช้ในการสร้างสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย คือ ซิลิคอน เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติเป็นสารกึ่งตัวนำ มีค่าแถบช่องว่างพลังงานเท่ากับ 1.12 eV และสามารถการดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 480 nm ถึง 600 nm [2] ดังนั้น การนำซิลิคอนจึงมีความเหมาะสมสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ทางแสง นั่นคือ ตัวตรวจจับแสง ซึ่งตัวตรวจจับแสงนั้นเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน ทำให้สามารถลดต้นทุนและลดระยะเวลาในการสร้าง นอกจากนี้ มีความจุไฟฟ้าต่ำทำให้มีการตอบสนองที่ดี และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย [1] จุดเด่นเหล่านี้ทำให้ตัวตรวจจับแสงถูกนำมาพัฒนาอย่างต่อเนื่อง

ตัวตรวจจับแสง (Photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่รับสัญญาณทางแสงจากพลังงานโฟตอนที่ตกกระทบ เพื่อเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ตัวตรวจจับแสงมีหลายชนิด เช่น พี-เอ็นโฟโตไดโอด (p-n photodiode) พี-ไอ-เอ็นโฟโตไดโอด (p-i-n photodiode) อวาแลนซ์โฟโตไดโอด (Avalanche photodiode) และโลหะ-สารกึ่งตัวนำ (M-S photodiode) [3] ซึ่งเป็นชนิดที่จะนำมาศึกษาในงานวิจัยนี้ โดยตัวตรวจจับแสงที่จะนำมาศึกษาเป็นแบบโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal : MSM) เป็นโครงสร้างที่ไม่ซับซ้อน เนื่องจากมีชั้นโลหะเพียงชั้นเดียวที่สร้างบนสารกึ่งตัวนำ ดังรูปที่ 1.1(ก) ทำให้ลดขั้นตอนในการออกแบบลดความยุ่งยากแบบเพียงหนึ่งแผ่นเท่านั้น ประหยัดเวลาและขั้นตอนการสร้าง สำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับแสงมีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเพิ่มประสิทธิภาพของพื้นที่รับแสงบริเวณสารกึ่งตัวนำ และการลดกระแสมืด

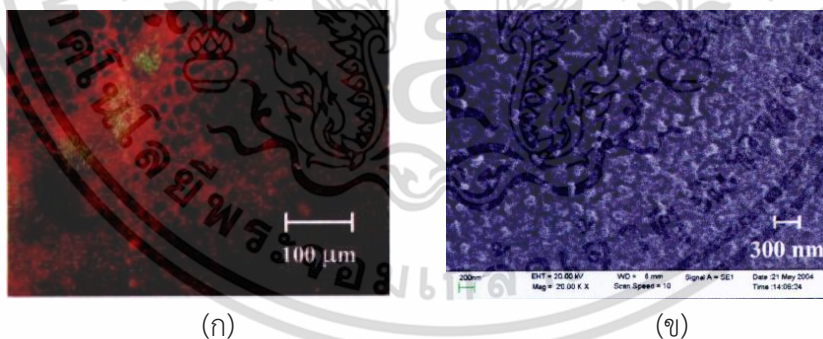
ตัวตรวจจับแสงชนิดโลหะ-สารกึ่งตัวนำถูกนำมาศึกษาและพัฒนาโครงสร้างพื้นที่รับแสงอย่างต่อเนื่อง โดยมีการเพิ่มพื้นที่รับแสงด้วยการกัดพื้นผิวซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยู (U-shaped Metal-Semiconductor-Metal : UMSM) ดังรูปที่ 1.1(ข) และในปี พ.ศ. 2561 มีการเพิ่มพื้นที่รับแสงด้วยการกัดพื้นผิวซิลิคอนให้เป็นพีระมิตบนร่องรูปตัวยู ดังรูปที่ 1.1(ค) ทำให้มีค่ากระแสแสงเพิ่มขึ้นจากตัวตรวจจับแสงโครงสร้างแบบเชิงราบประมาณ 2.4 เท่า [4]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 1.1 ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะแบบต่างๆ
 (ก) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM)
 (ข) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู (UMSM)
 (ค) ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM)

นอกจากนี้ การพัฒนาโครงสร้างพื้นทีรับแสงสามารถทำได้โดยการสร้างพอร์ซิลิคอน (Porous Silicon) ซึ่งแนวคิดการสร้างพอร์ซิลิคอนอ้างอิงมาจากการวิจัยในปี พ.ศ.2549 มีการสร้างพอร์ซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบข้อมสิี ดังรูปที่ 1.2 โดยวิธีการกัดแบบข้อมสิีมีกระบวนการสร้างที่ง่าย ใช้ระยะเวลาสั้น และราคาประหยัด การสร้างพอร์ซิลิคอนสามารถนำไปประยุกต์เป็นชั้นลดการสะท้อนแสงของเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน มีคุณสมบัติดูดกลืนแสงได้ดี ซึ่งผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้พอร์ซิลิคอนมีกำลังงานสูงสุด และประสิทธิภาพการแปลงพลังงานมากกว่าเซลล์แสงอาทิตย์ที่ใช้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ 45.843 % [5]



รูปที่ 1.2 ลักษณะพื้นผิวพอร์ซิลิคอนจากการกัดแบบข้อมสิี
 (ก) ภาพถ่ายได้กล้องไมโครสโคป
 (ข) ภาพถ่ายได้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

สำหรับการลดกระแสมืดสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การซินเตอร์ริง (Sintering) การสร้างชั้นซิลิคอน ไดออกไซด์บนชั้นลายวงจร และการสร้างชั้นฉนวนไดอิเล็กทริก เป็นต้น [6] ในงานวิจัยเลือกใช้การซินเตอร์ริง เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ไม่ซับซ้อน และใช้เวลาระยะสั้น การซินเตอร์ริงเป็นกระบวนการให้ความร้อนกับชิ้นงาน โดยความร้อนช่วยให้ชั้นการอินเตอร์เฟสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำสมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้กำแพง ศักย์สูงขึ้นและทำให้อิเล็กตรอนจากด้านโลหะข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำได้น้อย ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะ ส่งผลให้เกิดกระแสมืด ดังนั้น เมื่ออิเล็กตรอนเคลื่อนที่ข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำได้น้อย กระแสมืดก็จะลดลงตามไปด้วย [6], [7]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงนำจุดเด่นของงานวิจัยที่กล่าวมาข้างต้นมาประยุกต์รวมกัน เพื่อพัฒนาพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงโดยการสร้างพอร์สบนพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และลดกระแสมืดโดยการซินเตอร์ริง

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาคุณสมบัติในกระบวนการซินเตอร์ริงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/pSi/Ti/Al แบบเชิงราบ ที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ
2. ศึกษาการสร้างพอร์สด้วยวิธีการกัดย้อมสีบนผิวซิลิคอน
3. ศึกษาการสร้างพีระมิดบนร่องรูปตัวยู
4. ศึกษาลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงที่มีการสร้างพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู
5. เปรียบเทียบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และตัวตรวจวัดแสงที่มีการสร้างพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ

1.3 ขอบเขตการวิจัย

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาคุณสมบัติในกระบวนการซินเตอร์ริงที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และศึกษาการสร้างพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยูด้วยวิธีการกัดย้อมสี ซึ่งพอร์สพีระมิดจะถูกสร้างบนร่องรูปตัวยูที่อยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (Al/Ti) และคาดหวังว่าการสร้างพอร์สพีระมิดจะช่วยให้อิทธิพลของสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงให้ดียิ่งขึ้น โดยการทดลองแบ่งเป็น 4 ส่วนหลัก ดังนี้

ส่วนแรก การสร้างรอยสัมผัสขั้วไฟฟ้าจากการเคลือบชั้นอะลูมิเนียม (Al) และไททานเนียม (Ti) ด้วยวิธีอาร์เอฟสปีดเตอริงลงบนแผ่นซิลิคอนชนิดพี (p-Si) หนา 100 ไมครอน สภาพต้านทาน 20 Ω .cm จากนั้นทำการออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างร่องรูปตัวยูโดยการคำนวณหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ สำหรับใช้ในการกำหนดความลึกในการกัดร่องรูปตัวยู เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสง

ส่วนที่สอง การสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบบนซิลิคอนชนิดพี (p-Si) หนา (100) และทำการขึ้นเตอริงที่อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250 และ 300 °C จากนั้นเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ (กระแสมืด) ของตัวตรวจวัดแสงหลังจากขึ้นเตอริงทั้ง 5 อุณหภูมิ

ส่วนที่สาม การสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู โดยเริ่มจากการสร้างพีระมิตบนร่องรูปยูของซิลิคอนชนิดพี (p-Si) หนา (100) จากนั้นสร้างพอร์สพีระมิตที่อยู่บนร่องรูปตัวยูด้วยวิธีการกัดย้อนสี โดยมีการใช้สารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{DI}$ ในการกัดชั้นซิลิคอนและกระตุ้นการเกิดพอร์สด้วยแสงที่มีความเข้มแสง 3,000, 10,000 และ 30,000 lux และนำตัวตรวจวัดแสงไปผ่านกระบวนการขึ้นเตอริงโดยอ้างอิงอุณหภูมิจากการทดลองในส่วนที่สอง จากนั้นทำการวัดลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

ส่วนที่สี่ การวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู ซึ่งลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ (กระแสมืด) โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V และคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบ (กระแสแสง) โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 635 nm กำลังแสง 6 mW และจะทำการวัดที่แรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง 10 V

1.4 ขั้นตอนการวิจัยและวิธีการดำเนินงาน

1. ศึกษาทฤษฎีเกี่ยวกับหลักการทำงานของตัววัดแสงรอยสัมผัสชนิด AL/Ti/p-Si/Ti/Al
2. ศึกษาอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นเตอริงที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ
3. ศึกษากระบวนการสร้างพีระมิตบนร่องรูปตัวยู เพื่อนำไปประยุกต์กับการสร้างพอร์สซิลิคอน
4. ศึกษาการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดแบบย้อนสี เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสงขณะมีแสงตกกระทบ
5. ศึกษาเทคนิคการวัดและการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และโครงสร้างแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู จากนั้นสรุปผลการทดลอง

1.5 รายละเอียดของวิทยานิพนธ์

บทที่ 1 บทนำเป็นการกล่าวความเป็นมา ความสำคัญ และการปรับปรุงพัฒนาตัวตรวจวัดแสง จากนั้นกล่าวถึงวัตถุประสงค์ ขอบเขตงานวิจัย ขั้นตอนและวิธีดำเนินงาน สำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด AL/Ti/p-Si/Ti/Al โครงสร้างพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2 เป็นการรวบรวมทฤษฎีเกี่ยวกับสมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ รวมถึงการเกิดรอยสัมผัสแบบขอตต์ก็ย์ในภาวะสมดุล และขณะได้รับแสงตกกระทบ นอกจากนี้มีการกล่าวถึงพฤติกรรมและการสร้างพอร์สซิลิคอน และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

บทที่ 3 การออกแบบและการสร้างประกอบด้วย การออกแบบหลอดฉายต้นแบบ อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัด กระบวนการสร้างในแต่ละขั้นตอน และเครื่องมือที่ใช้ทั้งในการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางไฟฟ้า

บทที่ 4 ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง ประกอบด้วย ผลการศึกษาอุณหภูมิในกระบวนการซินเตอร์ริงที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ ลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู หัวข้อสุดท้าย คือ การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดโครงสร้างแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และโครงสร้างแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ เป็นการสรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับงานวิจัย เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงต่อไป

บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สมบัติทางแสงของสารกึ่งตัวนำ

แสงมีคุณสมบัติเป็นทั้งคลื่น (Wave) และอนุภาค (Practical) และมีคุณสมบัติที่เราพบเห็นในชีวิตประจำวัน เช่น การสะท้อนแสง ซึ่งเป็นคุณสมบัติของคลื่น โดยเป็นการที่แสงไปกระทบกับตัวกลางแล้วสะท้อนไปในทิศทางอื่นหรือสะท้อนกลับมาทิศทางเดิมการสะท้อนของแสงนั้นขึ้นอยู่กับพื้นผิวของวัตถุด้วยว่าเรียบหรือหยาบ โดยทั่วไปพื้นผิวที่เรียบและมันจะทำให้มุมของแสงที่ตกกระทบมีค่าเท่ากับมุมสะท้อนบนตำแหน่งที่แสงตกกระทบกับแสงสะท้อนบนพื้นผิวจะเป็นตำแหน่งเดียวกัน แต่ถ้าวัตถุที่พื้นผิวหยาบหรือขรุขระแสงจะสะท้อนในหลายทิศทางและไม่เป็นระเบียบ ช่วยให้ลดการสะท้อนแสง ดังแสดงรูปที่ 2.1 ส่วนปรากฏการณ์ที่แสดงให้เห็นหรืออธิบายได้ว่าแสงเป็นอนุภาค ได้แก่ การส่องแสงเข้าสู่ผิวโลหะและทำให้อิเล็กตรอนกระเด็นหลุดออกสู่อวกาศ ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์โฟโตอิเล็กทริก (External Photoelectric Effect) [7]



รูปที่ 2.1 ลักษณะการสะท้อนแสงบนวัตถุที่พื้นผิวเรียบและหยาบ

(ก) วัตถุที่พื้นผิวเรียบ

(ข) วัตถุที่พื้นผิวหยาบหรือขรุขระ

สารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) เป็นวัสดุทางไฟฟ้าที่มีความกว้างของช่องว่างระหว่างแถบพลังงาน (energy gap) และมีคุณสมบัติการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่างตัวนำไฟฟ้า (conductor) กับฉนวน (insulator) สารกึ่งตัวนำจะไม่นำไฟฟ้าในสภาวะปกติแต่สามารถนำไฟฟ้าได้เมื่อได้รับการกระตุ้นด้วยแสง ไฟฟ้า หรือความร้อนที่มีพลังงานเท่ากับหรือมากกว่าช่องว่างระหว่างแถบพลังงานอิเล็กตรอนในแถบวาเลนซ์ที่ได้รับพลังงานกระตุ้นจะหลุดจากโครงสร้างอะตอมข้ามช่องว่างระหว่างแถบพลังงานขึ้นไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้า (conduction band) ที่มีระดับพลังงานสูงกว่า และสามารถเคลื่อนที่ได้โดยอิสระทำให้เกิดสภาพนำไฟฟ้าได้ ธาตุที่มีสมบัติดังกล่าว ได้แก่ ซิลิคอน (Si) และเจอร์เมเนียม (Ge) ซึ่งใช้เป็นวัสดุหลักในชิ้นส่วนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.1.1 ลักษณะสมบัติทางแสง

แสงเป็นพลังงานรูปหนึ่งที่สามารถแสดงตัวเป็นได้ทั้ง “คลื่น” และ “อนุภาค” [7] ซึ่งปรากฏการณ์ของแสงที่เกี่ยวข้องกับการถ่ายเทพลังงานมักจะอธิบายได้โดยพิจารณาว่าแสงเป็นอนุภาค พลังงานของแสงไม่ได้กระจายไปตามลำแสงแต่รวมกันอยู่ในบริเวณที่จำกัดเหมือนอนุภาคที่กำลังเคลื่อนที่ และเรียกอนุภาคของแสงว่า โฟตอน (Photon) จากงานวิจัยของพลังค์ (Planck) เกี่ยวกับการเปล่งแสงจากวัตถุดำ ซึ่งพบว่าพลังงานของแสงมีค่าเป็นจำนวนเท่าของหน่วยพลังงานที่มีค่าต่ำสุดค่าหนึ่ง ขนาดของหน่วยพลังงานนี้เรียกว่า ควอนตัม (Quantum) ซึ่งขึ้นอยู่กับความยาวคลื่นของแสงอ้างอิงจากสมการ 2.1 และ 2.2

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

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

โดยที่

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

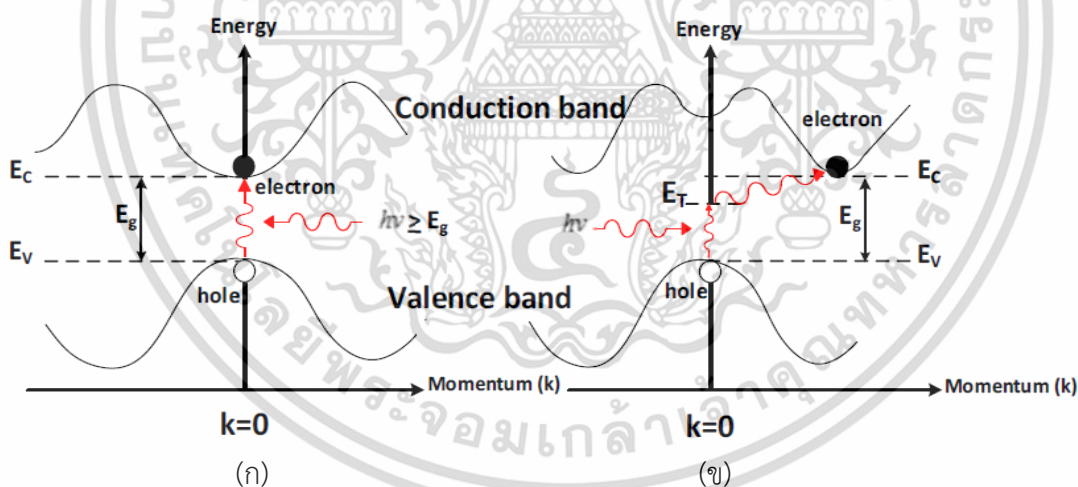
เมื่อค่าพลังงานโฟตอนแสง (E_{Photon}) มากกว่าขนาดช่องว่างพลังงาน (Energy gap : E_g) ของสารกึ่งตัวนำ หรือ $E_{\text{Photon}} \geq E_g$ สารกึ่งตัวนำจะดูดกลืนพลังงานแสง ทำให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ขึ้นไปยังแถบนำได้และเกิดเป็นคู่อิเล็กตรอน-โฮล ในสารกึ่งตัวนำ โดยความนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำจะเพิ่มขึ้นเมื่อได้รับแสง

2.1.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงาน

ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานของสารกึ่งตัวนำแบบช่องตรง (Direct band gap semiconductor) คือ อิเล็กตรอนได้รับพลังงานโฟตอนที่มีค่าเท่ากับขนาดของช่องว่างแถบพลังงาน $E_g = h\nu$ เมื่ออิเล็กตรอนดูดกลืนพลังงานโฟตอนนั้นและอยู่ในสภาวะถูกกระตุ้นจะย้ายสถานะพลังงานทรานซิชันจากจุดสูงสุดของแถบวาเลนซ์ไปยังจุดต่ำสุดของแถบนำกลายเป็นอิเล็กตรอนและโฮลอิสระ โดยไม่มีการสูญเสียพลังงานให้แก่โครงสร้างผลึกซึ่งจะสอดคล้องกับกฎของการอนุรักษ์โมเมนตัม การเปลี่ยนแปลงสถานะพลังงานอิเล็กตรอนจะไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่าโมเมนตัม (k) ของอิเล็กตรอน เนื่องจากระดับพลังงานสูงสุดของแถบวาเลนซ์กับแถบ

ระดับพลังงานต่ำสุดของแถบนำไฟฟ้าอยู่ตำแหน่งเลขคลื่นเดียวกัน ($k=0$) นั่นคือ ไม่มีการสร้างหรือทำลายโฟนอน ดังแสดงในรูปที่ 2.2 (ก) ตัวอย่างของสารกึ่งตัวนำประเภทนี้ ได้แก่ อินเดียมแกลเลียมอาร์เซไนด์ (InGaAs) แกลเลียมอาร์เซไนด์ (GaAs) และอินเดียมฟอสไฟด์ (InP) เป็นต้น

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



รูปที่ 2.2 ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานและการย้ายสถานะของพลังงานอิเล็กตรอนของสารกึ่งตัวนำ

(ก) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบช่องตรง

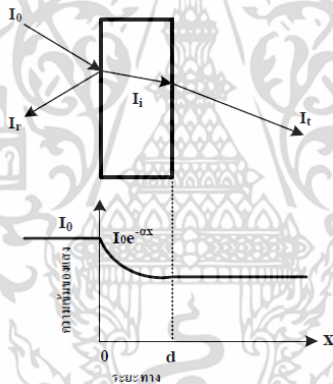
(ข) ลักษณะโครงสร้างแถบพลังงานแบบช่องไม่ตรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

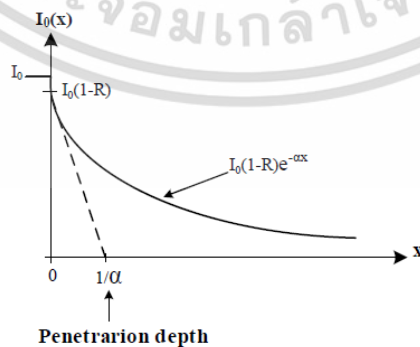
2.1.3 การดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ

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

เมื่อแสงเดินทางไปกระทบผิวหน้าแล้วผ่านเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ โดยที่ถ้าพลังงานแสงตกกระทบมีพลังงานมากพอที่จะทำให้เกิดพาหะขึ้น และพลังงานแสงนี้จะลดลงอย่างต่อเนื่องขึ้นอยู่กับโครงสร้างผลึกของสารกึ่งตัวนำในลักษณะของสนามแสง (Optical field) ซึ่งเคลื่อนที่ผ่านเข้าไปในสารกึ่งตัวนำ แสงบางส่วนจะสะท้อนกลับที่ผิวของสารกึ่งตัวนำ บางส่วนของแสงจะเดินทางเข้าไปในสารกึ่งตัวนำและถูกดูดกลืน ดังแสดงในรูปที่ 2.3 และรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.3 แผนภาพเมื่อแสงตกกระทบลงบนสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.4 การดูดกลืนแสงภายในสารกึ่งตัวนำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมการความเข้มของแสงสะท้อนมีค่าเป็น

$$I_r = RI_0 \quad (2.3)$$

เพราะฉะนั้น ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำมีค่า

$$I_i = I_0 - I_r = I_0 - RI_0 = (1 - R)I_0 \quad (2.4)$$

เมื่อแสงนี้เดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำจะถูกดูดกลืนทำให้ความเข้มแสงภายในสารกึ่งตัวนำลดลงแบบเอกซ์โพเนนเชียลในรูปของพลังงานที่ถูกส่งผ่านไปยังสารกึ่งตัวนำ การดูดกลืนแสงที่ผ่านเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำจะมีค่าลดลงกับระยะทาง ดังนั้นความเข้มแสงที่ส่งผ่านสารกึ่งตัวนำมีค่าเป็น

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

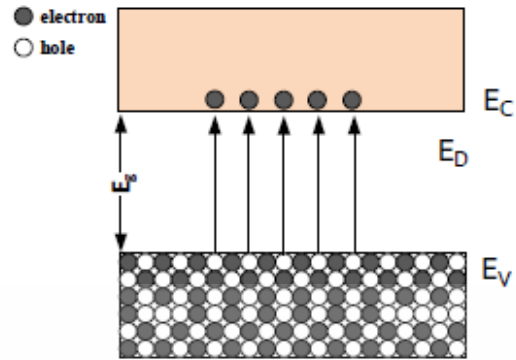
โดยที่	I_0	คือ ความเข้มแสงตกกระทบสารกึ่งตัวนำ
	I_r	คือ ความเข้มแสงสะท้อนจากสารกึ่งตัวนำ
	I_t	คือ ความเข้มแสงส่งผ่านออกมาจากสารกึ่งตัวนำ
	I_i	คือ ความเข้มแสงที่เดินทางเข้าสู่สารกึ่งตัวนำ
	R	คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนแสง
	α	คือ สัมประสิทธิ์การดูดกลืนแสง
	x	คือ ระยะทางที่แสงเดินทางในสารกึ่งตัวนำหรือความหนาของสารกึ่งตัวนำ

2.1.3.1 การดูดกลืนแสงและการเกิดของคู่อิเล็กตรอน - โฮล

กระบวนการเกิดการดูดกลืนโฟตอน (Energy absorption) ในวัสดุสารกึ่งตัวนำหรือเรียกกระบวนการนี้ว่าการผลิตพาหะหรือเกิดของคู่อิเล็กตรอน-โฮล (Generation process) จะเกิดขึ้นเมื่อมีแสงหรือโฟตอนซึ่งมีพลังงานมากพอ เมื่อตกกระทบสารกึ่งตัวนำแล้วถูกดูดกลืนเข้าไปในเนื้อสารกึ่งตัวนำ โดยแสงจะสามารถกระตุ้นอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดไปยังแถบนำไฟฟ้าได้ กระบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำมีหลายชนิด ในที่นี้จะขอกกล่าวถึงกระบวนการดูดกลืนแสงของสารกึ่งตัวนำ 2 ชนิด ดังต่อไปนี้

1. การดูดกลืนแสงแบบอินทรินซิก (Intrinsic absorption) จะเกิดจากการให้พลังงานความร้อนที่มีค่ามากพอ ($> E_g$) หรือการให้แสงหรือโฟตอน ($h\nu \geq E_g$) ที่มีพลังงานมากพอที่จะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อดูดกลืนแสงเข้าไปแล้วสามารถกระตุ้นให้อิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์กระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ที่แถบนำไฟฟ้าได้แล้วกลายเป็นอิเล็กตรอนนำไฟฟ้าที่มีสภาพเป็นอิสระ และทิ้งให้เกิดเป็นที่ว่างขึ้นที่แถบวาเลนซ์ซึ่งก็คือ โฮล ซึ่งการเกิดคู่อิเล็กตรอนอิสระจะทำให้เกิดโฮลขึ้นเป็นคู่กันเสมอ [8] ดังแสดงในรูปที่ 2.5

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 การเกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล จากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำอินทรีนซิก

การดูดกลืนแสงแบบนี้จะเกิดขึ้นในตัวตรวจวัดแสงทุกชนิด เนื่องจากพลังงานโฟตอนต้องมีค่ามากพอที่จะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ซึ่งสามารถทำได้ในเทอมของ $h\nu \geq E_g$ หรือ $hc/\lambda \geq E_g$ และถ้าจัดให้อยู่ในเทอมของความยาวคลื่นคutoff (Long wavelength cutoff: λ_{max}) คือ ความยาวคลื่นสูงสุดที่สามารถทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล ดังสมการที่ 2.6

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

โดยที่

c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 m/sec

h คือ ค่าคงที่ของพลังค์ มีค่าเท่ากับ 6.626×10^{-34} J-s

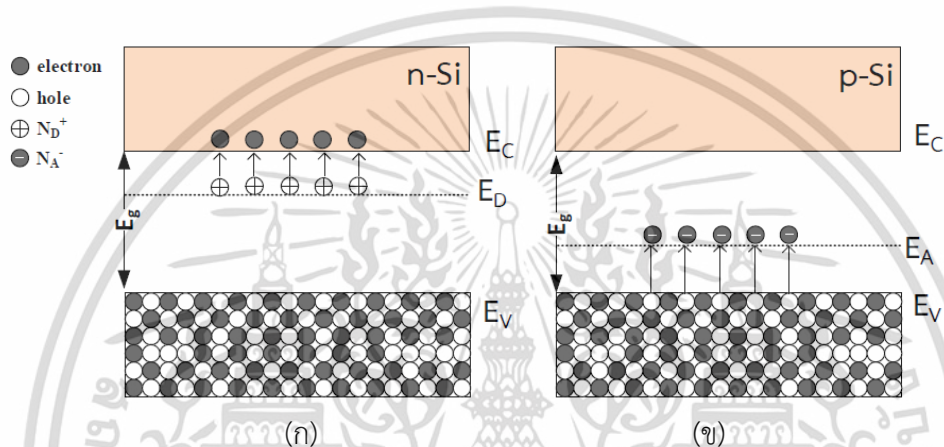
ตารางที่ 2.1 ความยาวคลื่นสูงสุดของสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆ [3]

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

2. การดูดกลืนแสงแบบเอ็กทรีนซิก (Extrinsic absorption) เกิดเนื่องจากการเติมอะตอมของสารเจือเข้าไป เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยฟอสฟอรัสจะทำให้สารกึ่งตัวนำชนิดนี้เรียกว่า สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n-type semiconductor) และจะทำให้เกิดระดับผู้ให้ (Donor level: E_D) ขึ้นในช่องว่างแถบพลังงานอาจเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความบกพร่องของผลึก ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากระดับสารเจือผู้ให้หลุดไปอยู่ในแถบนำไฟฟ้าได้ ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ก) ในส่วนของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p-type semiconductor) เช่น ซิลิคอนถูกเติมด้วยโบรอน จะทำให้เกิดระดับผู้รับ (Acceptor level: E_A) ขึ้นในช่องว่างพลังงาน ซึ่งจะทำให้สารกึ่งตัวนำเมื่อได้รับพลังงานที่น้อยกว่าช่องว่างแถบพลังงานสามารถเกิดพาหะอิสระขึ้นได้ โดยอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์เข้าไปอยู่ในระดับผู้รับ [9] ดังแสดงในรูปที่ 2.6 (ข)



รูปที่ 2.6 การเกิดคู่พาหะอิเล็กตรอน - โฮลจากการดูดกลืนแสงในสารกึ่งตัวนำ เอ็กทริกซิค (ก) ชนิดเอ็น และ (ข) ชนิดพี

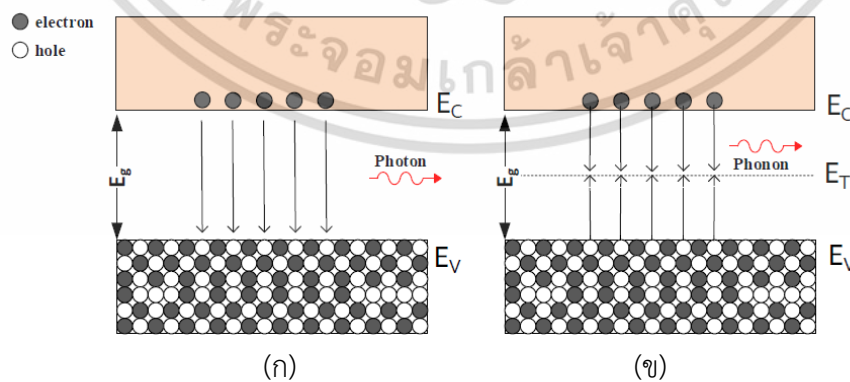
2.1.3.2 การรวมตัวใหม่ของคู่อิเล็กตรอน - โฮล

เมื่อเกิดความไม่สมดุลเชิงความร้อน อิเล็กตรอนที่ถูกกระตุ้นนั้นจะกลับสู่สถานะพลังงานต่ำ เกิดการคายพลังงาน (Energy emission) เรียกว่ากระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination process) เป็นกระบวนการตรงข้ามกับการเกิด คือ เป็นการรวมตัวระหว่างอิเล็กตรอนกับโฮล โดยที่อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับพลังงานกลับลงไปรวมกับโฮลที่แถบวาเลนซ์ ทำให้โฮลและอิเล็กตรอนลดลงหรือหายไป เนื่องจากการชนกันกับโครงร่างผลึก โดยที่กระบวนการรวมตัวใหม่นี้จะเกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำในเวลาเดียวกันกับการเกิดพาหะ เรียกว่า กระบวนการรวมตัวใหม่และการเกิดของพาหะ (Recombination and Generation process) [9] สำหรับสารกึ่งตัวนำในภาวะสมดุลความร้อนที่อุณหภูมิใดๆ พลังงานจากความร้อนจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮลขึ้น และมีการรวมตัวใหม่อย่างต่อเนื่องตลอดเวลาโดยมีอัตราการเกิดและอัตราการรวมตัวใหม่ของพาหะเท่ากัน ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกระบวนการรวมตัวใหม่ที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำเพียง 2

กระบวนการหลัก คือ กระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยตรง และกระบวนการรวมตัวใหม่แบบโดยอ้อม มีรายละเอียดดังนี้

1. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบตรง (Direct recombination process) เป็นกระบวนการรวมตัวใหม่ของพาหะที่เกิดขึ้นในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบตรง คือ อิเล็กตรอนนำไฟฟ้าจากแถบนำไฟฟ้าลดระดับกลับลงไปรวมตัวกับโฮลในแถบวาเลนซ์โดยตรง จะทำให้อิเล็กตรอนอิสระและโฮลหายไปคล้ายเป็นกระบวนการย้อนกลับของการเกิดพาหะโดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ก) ซึ่งการรวมตัวใหม่แบบโดยตรงนี้จะทำให้มีการปลดปล่อยพลังงานออกมาในรูปของแสงหรือโฟตอนได้ง่าย โดยการเปล่งแสงที่มีพลังงานโฟตอนเท่ากับผลต่างของระดับพลังงานอิเล็กตรอนและโฮล หรือเรียกการรวมตัวในลักษณะนี้ว่า การรวมตัวแบบเปล่งแสง (Radiative recombination)

2. กระบวนการรวมตัวใหม่แบบอ้อม (Indirect recombination process) จะเกิดในสารกึ่งตัวนำแบบช่องแถบไม่ตรง คือ อิเล็กตรอนจากแถบนำไฟฟ้าลดลงไปยังระดับพลังงานระดับหนึ่งที่อยู่ในช่องว่างพลังงานก่อนที่จะตกลงไปยังแถบวาเลนซ์ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 (ข) ซึ่งระดับพลังงานหรือสถานะพลังงานที่ปรากฏอยู่ในช่องว่างแถบพลังงานเป็นสถานะพลังงานที่อะตอมสารกึ่งตัวนำไม่สามารถมีได้ ดังนั้นสถานะพลังงานเหล่านี้จึงเกิดขึ้นจากอะตอมสารเจือ อะตอมแปลกปลอมอื่นๆ หรืออาจเกิดเนื่องจากจุดบกพร่องของโครงผลึก โดยระดับพลังงานที่ช่วยให้เกิดกระบวนการรวมตัวใหม่เรียกว่า ศูนย์กลางการรวมตัวใหม่ของพาหะ (Recombination center: R-center) [10] กระบวนการรวมตัวใหม่โดยอ้อมนี้ ปกติจะมีการปลดปล่อยพลังงานออกมา และอาจมีผลทำให้อะตอมภายในโครงผลึกเกิดการสั่นได้โดยพลังงานที่ใช้สำหรับการสั่นนี้อยู่ในรูปของพลังงานความร้อน หรือเรียกว่า โฟนอน (Phonon) ในการปลดปล่อยพลังงานความร้อน (โฟนอน) ให้กับโครงผลึกเรียกการรวมตัวในลักษณะแบบนี้ว่า การรวมตัวแบบไม่เปล่งแสง (Non-radiative recombination)



รูปที่ 2.7 กระบวนการรวมตัวใหม่ในสารกึ่งตัวนำ (ก) แบบตรง และ (ข) แบบอ้อม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.2 รอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ

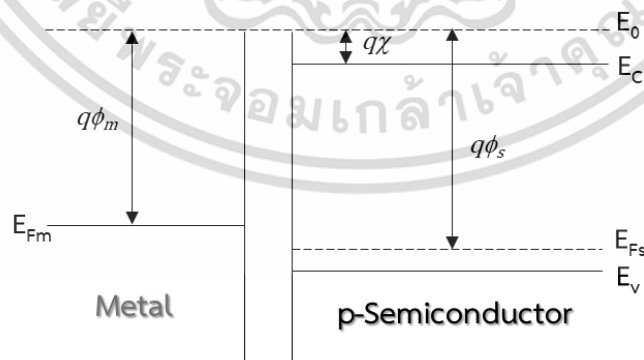
รอยสัมผัสที่เกิดระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (Metal-semiconductor contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความสำคัญอย่างยิ่งกับอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำทุกชนิด สามารถแบ่งได้ออกเป็น 2 ชนิด คือ

1. รอยสัมผัสโอห์มิก (Ohmic contact) เป็นรอยสัมผัสที่มีความนำไฟฟ้าสูง กระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ทั้งสองทิศทางและไม่มีแรงดันตกคร่อมรอยสัมผัส ซึ่งมีลักษณะตรงกันข้ามกับรอยต่อแบบเรกติไฟร์ ส่วนมากนิยมใช้เป็นเชื่อมต่อลวดลายโลหะระหว่างส่วนต่างๆภายในตัว

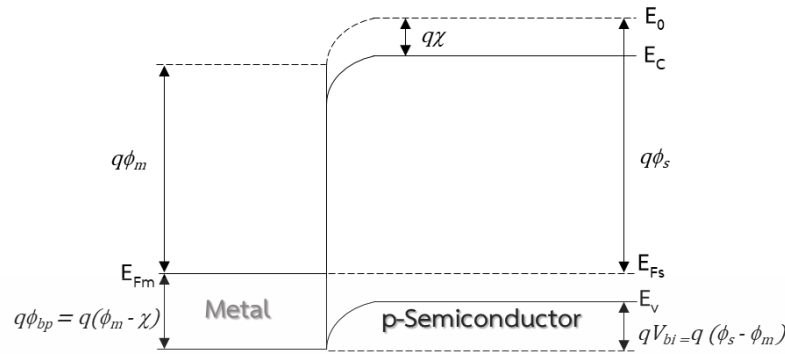
2. รอยสัมผัสช็อตต์กี (Schottky contact) หรือเรกติไฟร์ เป็นรอยสัมผัสที่ยอมให้กระแสไหลผ่านได้ทิศทางเดียว โดยแสดงคุณสมบัติเรกติไฟร์คล้ายกับรอยต่อ p-n แต่มีคุณสมบัติบางส่วนที่มีข้อได้เปรียบกว่า เช่น แรงดันภายในมีค่าต่ำกว่า ความจุไฟฟ้าแฝงภายในโครงสร้างมีค่าต่ำกว่า และทำงานด้วยพาหะส่วนมาก เป็นต้น โดยในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงเฉพาะรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี (Ti/p-Si)

2.2.1 การเกิดรอยสัมผัสแบบช็อตต์กีในภาวะสมดุล

การเกิดรอยสัมผัสแบบช็อตต์กีในรูปที่ 2.8 เป็นแถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี โดยฟังก์ชันงานของโลหะมีค่าน้อยกว่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ($q\phi_m < q\phi_s$) และระดับเฟอร์มิของโลหะ (Fermi level : E_{Fm}) อยู่สูงกว่าระดับเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ (E_{Fs}) และเมื่อนำโลหะและสารกึ่งตัวนำมาสัมผัสกันจะเกิดการถ่ายเทประจุอิเล็กตรอน โดยอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะเคลื่อนที่ผ่านรอยสัมผัสไปยังด้านสารกึ่งตัวนำจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งจะทำให้มีสนามไฟฟ้าเกิดขึ้นที่ผิวสัมผัสทางด้านสารกึ่งตัวนำ ทำให้แถบพลังงานด้านสารกึ่งตัวนำเกิดการโค้งงอ การเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจะดำเนินไปจนกระทั่งสนามไฟฟ้ามีค่าสูงขึ้นจนสามารถต้านทานการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนได้ [11] ซึ่งจะทำให้รอยสัมผัสอยู่ในภาวะสมดุลความร้อนดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.8 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีก่อนเกิดรอยสัมผัสช็อตต์กี



รูปที่ 2.9 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสชนิดซีดตี

ในภาวะสมดุลความร้อน ระดับเฟอร์มิของทั้งโลหะและสารกึ่งตัวนำจะอยู่ในระดับเดียวกัน การโค้งงอของแถบพลังงานทางด้านสารกึ่งตัวนำ คือ กำแพงศักย์ภายใน (Potential barrier : qV_{bi}) ซึ่งมีค่าเท่ากับผลต่างระหว่างฟังก์ชันงานของโลหะและฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำ ดังสมการที่ 2.7

$$qV_{bi} = q\phi_m < q\phi_s \quad (2.7)$$

ส่วนความสูงกำแพงศักย์ด้านโลหะที่ เรียกว่า กำแพงศักย์ซีดตี (Schottky barrier : $q\phi_{bp}$) ซึ่งรอยสัมผัสของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดต่างๆกัน จะทำให้ได้ค่ากำแพงศักย์ซีดตีต่างๆกัน [12] สามารถคำนวณหาได้ดังสมการที่ 2.8

$$q\phi_{bp} = q\phi_m - \chi \quad (2.8)$$

โดยที่ ค่าความแตกต่างของระดับสัญญาณและระดับนำไฟฟ้าของสารกึ่งตัวนำ เรียกว่า ค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตี (Electron affinity : χ) เป็นสมบัติพื้นฐานของสารกึ่งตัวนำแต่ละชนิด เช่น ซิลิคอน มีค่าอิเล็กตรอนแอฟฟินิตีเท่ากับ 4.05 V

2.2.2 การทำงานของรอยสัมผัสแบบซีดตี

การทำงานของรอยสัมผัสแบบซีดตีแบ่งออกได้เป็นการให้แรงดันไบอัสตรง (Forward bias) และการให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (Reverse bias) โดยการให้แรงดันไบอัสตรง (V_F) แก่รอยสัมผัสด้วยการให้แรงดันบวกเข้าที่ขั้วแอนอด (ด้านสารกึ่งตัวนำ) และแรงดันลบเข้าที่ขั้วคาโทด (ด้านโลหะ) ดังรูปที่ 2.10 (ก) ทำให้ความสูงกำแพงศักย์ภายในที่รอยสัมผัสมีค่าลดลงเป็น ($V_{bi} - V_F$) และทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำ ดังนั้นโฮลจากสารกึ่งตัวนำสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ ทำให้มีกระแสไฟฟ้าไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปทางด้านโลหะ ในขณะที่เดียวกันก็มีโฮลจากโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงซีดตีเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำด้วยเช่นกัน เป็นผลให้มีกระแสไฟฟ้าไหลในทางตรงข้ามกับกระแสที่ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังโลหะ แต่เนื่องจากกำแพงซีดตีก็มีค่าคงที่ไม่เปลี่ยนแปลง

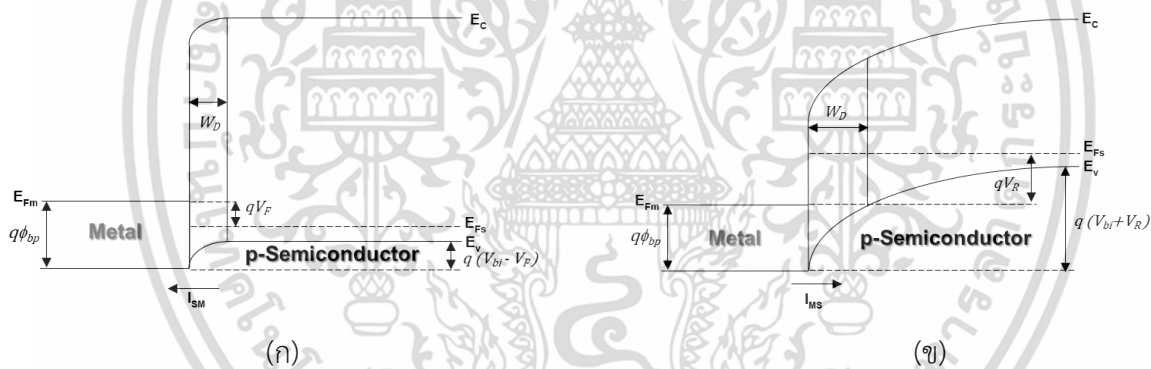
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กับแรงดัน กระแสในส่วนที่ไหลจากโลหะไปยังสารกึ่งตัวนำนี้จึงมีค่าน้อยและเท่ากับค่ากระแสในภาวะสมดุล โดยกระแสทั้งหมดที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสตรง (I_F) [1,4,13]มีค่าดังสมการที่ 2.9

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

โดยที่

- A คือ พื้นที่รอยสัมผัส (cm^2)
 R คือ ค่าคงตัวริชาร์ดสัน (p-Si) มีค่า $32 \text{ A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$ [14]
 ϕ_{bp} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคกี (eV)
 q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ $1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$
 k คือ ค่าคงที่โบสท์มันน์มีค่าเท่ากับ $8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$
 T คือ อุณหภูมิสัมบูรณ์(K)



รูปที่ 2.10 แถบพลังงานของโลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพีหลังเกิดรอยสัมผัสช็อคกี

(ก) แรงดันไบอัสตรง และ (ข) แรงดันไบอัสย้อนกลับ

การให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ (V_A) แก่รอยสัมผัสโดยให้แรงดันลบเข้าที่ขั้ววาโนด (ด้านสารกึ่งตัวนำ) และแรงดันบวกเข้าที่ขั้วคาโทด (ด้านโลหะ) แสดงดังรูปที่ 2.10 (ข) กรณีนี้จะทำให้ระดับพลังงานเฟอร์มิของสารกึ่งตัวนำสูงกว่าระดับพลังงานเฟอร์มิของโลหะ และกำแพงศักย์ภายในจะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น $(V_{bi} + V_R)$ และบริเวณปลอดพาหะจะขยายกว้างขึ้น ดังนั้นโฮลจากด้านสารกึ่งตัวนำจึงไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปทางด้านโลหะได้ แต่จะมีโฮลในโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ช็อคกีเข้าไปในด้านสารกึ่งตัวนำทำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ให้เกิดมีกระแสไหลจากด้านโลหะไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ซึ่งกระแสในส่วนนี้ยังคงมีค่าเท่ากับกระแสในภาวะสมดุล [1,4,13] โดยกระแสที่ไหลในกรณีที่ได้รับไบอัสย้อนกลับ (I_R) มีค่าดังสมการที่ 2.10

$$I_{FR} = ART^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{bp}}{kT}\right) \tag{2.10}$$

เมื่อมีการแรงดันไบอัสค่าต่างๆ จะมีการเปลี่ยนแปลงความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ (Depletion width : W_D) โดยเมื่อแรงดันไบอัสย้อนกลับมีค่าสูงขึ้นความกว้างบริเวณปลอดพาหะจะมีขนาดที่กว้างขึ้นตาม ดังสมการที่ 2.11

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

- โดยที่ ϵ_s คือ ค่าเปอร์มิตติวี่ของสารกึ่งตัวนำ
- q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} C
- N_D คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือ
- V_{bi} คือ กำแพงศักย์เกิดขึ้นในด้านสารกึ่งตัวนำ (V)
- V_A คือ แรงดันไบอัส (V)

ฟังก์ชันงานของโลหะกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นและชนิดพีในทางอุดมคติที่ทำให้เกิดรอยสัมผัสโอห์มิกและรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ ดังแสดงในตารางที่ 2.2

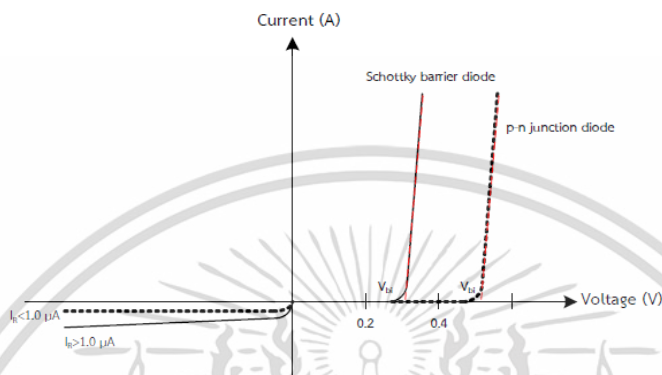
ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติการเกิดรอยสัมผัสโอห์มิกและรอยสัมผัสช็อตต์กีย์ [1]

ชนิดรอยสัมผัส	รอยสัมผัสโอห์มิก	รอยสัมผัสช็อตต์กีย์
สารกึ่งตัวนำชนิดพี	$q\phi_m > q\phi_s$	$q\phi_m < q\phi_s$
สารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น	$q\phi_m < q\phi_s$	$q\phi_m > q\phi_s$

2.2.3 ลักษณะเฉพาะกระแส - แรงดันของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์

รอยสัมผัสช็อตต์กีย์จะคล้ายกับไดโอดรอยต่อแบบพี-เอ็น คือ ยอมให้กระแสไหลผ่านในทิศทางเดียว แต่เมื่อให้แรงดันไบอัสย้อนกลับ จะมีกระแสไหลน้อยมาก (กระแสรั่ว) ดังแสดงในรูปที่ 2.11 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์มีค่าประมาณ 0.2-0.4 V โดยที่แบบรอยสัมผัสแบบพี-เอ็นมีค่าประมาณ 0.5-0.7 V ซึ่งแรงดันภายในของรอยสัมผัสช็อตต์กีย์จะมีค่าต่ำกว่ารอยสัมผัสแบบพี-เอ็นและเนื่องจากกระแสที่

ไหลเป็นกระแสของพาหะส่วนมาก จึงทำให้ไม่มีประจุไฟฟ้าสะสมจากพาหะส่วนน้อยส่งผลให้มีการตอบสนองที่รวดเร็ว [9] ส่วนกระแสรั่วของรอยสัมผัสชนิดทังสเตนมีค่าสูงกว่ารอยสัมผัสแบบพี-เอ็น ประมาณ 10^4 เท่า เป็นผลมาจากความไม่สมบูรณ์ของรอยสัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ



รูปที่ 2.11 ลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของชนิดทังสเตนไดโอดและไดโอดแบบรอยต่อพี-เอ็น

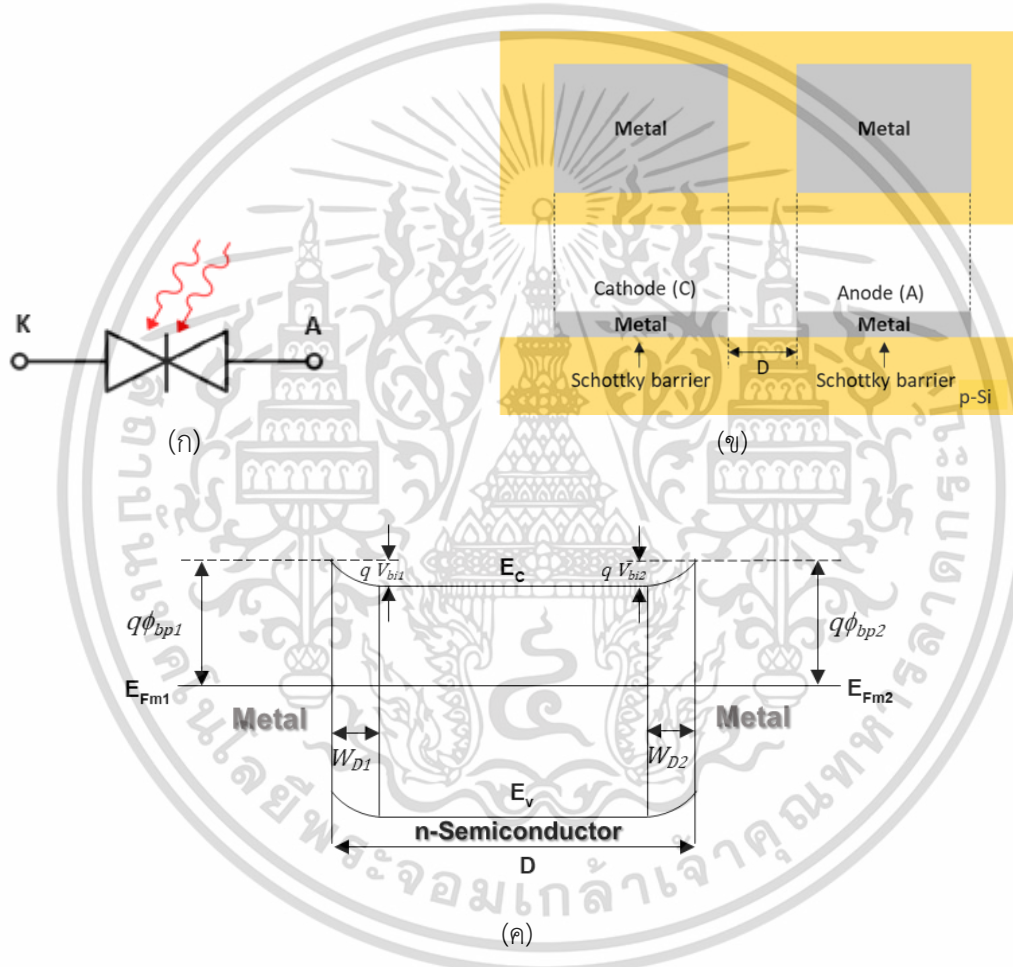
2.3 ตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสง (Photodetector) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่รับสัญญาณทางแสงแล้วเปลี่ยนให้เป็นสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานทั้งในด้านภาพและแสงอย่างกว้างขวาง นอกจากนี้ยังเป็นส่วนประกอบอยู่ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในชีวิตประจำวันต่างๆ โดยลักษณะโครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงมีอยู่หลายลักษณะด้วยกัน ซึ่งลักษณะหนึ่งที่มีความน่าสนใจคือ โครงสร้างแบบโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (MSM) หรือโครงสร้างแบบเชิงราบ (Planar) [7] เป็นอุปกรณ์ที่มีกระบวนการสร้างไม่ซับซ้อน และง่ายต่อการผลิต งานวิจัยในวิทยานิพนธ์นี้จึงได้มุ่งเน้นการศึกษาหลักการทํางาน และความสัมพันธ์ทางแสงที่สามารถอธิบายเกี่ยวกับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดทังสเตน AL/Ti/p-Si/Ti/Al เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดทังสเตนมีจุดเด่นคือ มีสภาพการตอบสนองทางแสงที่ดีกระแสรั่วไหลต่ำมีเสถียรภาพที่ดี และสามารถสร้างเป็นวงจรรวมได้ง่าย

2.3.1 ตัวตรวจวัดแสงในสถานะสมดุล

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดทังสเตน AL/n-Si/Al ประกอบด้วยรอยสัมผัส ระหว่างโลหะ (อะลูมิเนียม) และสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็นจำนวนสองรอยสัมผัสเชื่อมต่อกันแบบหันชนกัน (Back to back) [3] โดยมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสอง (D) ในรูปที่ 2.12 จะแสดงแถบพลังงานของ ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดทังสเตนในสถานะสมดุลความร้อนจะเกิดบริเวณปลอดพาหะ และกำแพงศักย์ขึ้นที่รอยสัมผัสทั้งสอง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของรอยสัมผัสชนิดทังสเตนที่ได้กล่าวมาแล้ว โดยรอยสัมผัสด้านซ้าย

กำหนดให้เป็นขั้วแคโทด (Cathode: K) และรอยสัมผัสด้านขวากำหนดให้เป็นขั้วแอโนด (Anode: A) [15] โดยทั่วไปโลหะที่ใช้ทำขั้วแคโทดและขั้วแอโนดจะเป็นโลหะ (อะลูมิเนียม) ชนิดเดียวกัน เพื่อลดจำนวนต้นแบบและกระบวนการสร้างลง จึงทำให้ค่าฟังก์ชันช็อตต์กีของขั้วแคโทด (ϕ_{bn1}) และขั้วแอโนด (ϕ_{bn2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $\phi_{bn1} = \phi_{bn2} = \phi_{bn}$ ค่าฟังก์ชันภายในของขั้วแคโทด (V_{bi1}) และขั้วแอโนด (V_{bi2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $V_{bi1} = V_{bi2} = V_{bi}$ ทำให้โครงสร้างนี้มีลักษณะสมมาตร และความกว้างบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_{d1}) และด้านแอโนด (W_{d2}) มีขนาดเท่ากัน หรือ $W_{d1} = W_{d2} = W_d$ ซึ่งมีสอดคล้องกับสมการที่ 2.11 เมื่อให้ $V_A = 0$



รูปที่ 2.12 ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กี (โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น)

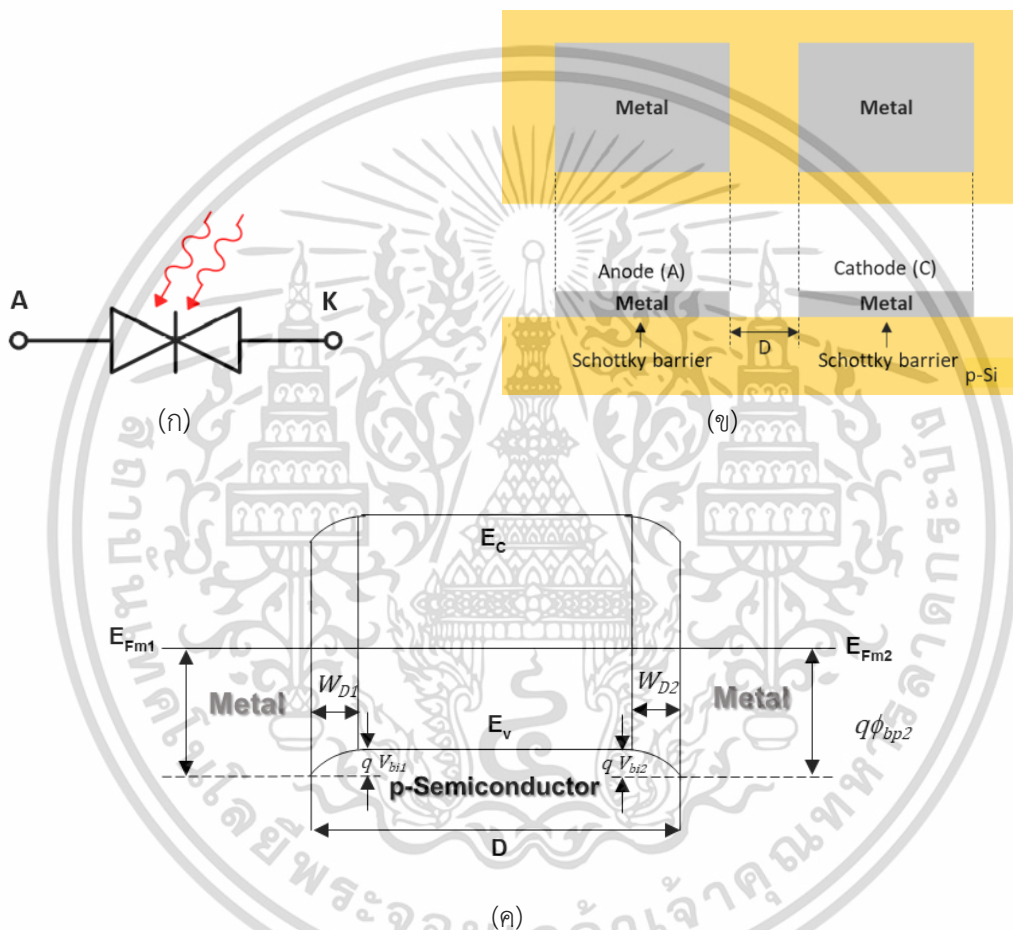
(ก) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง

(ข) ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ

(ค) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสช็อตต์กีในสภาวะสมดุล
ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในวิทยานิพนธ์นี้จะปรับเปลี่ยนโครงสร้างจากตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีชนิด AL/n-Si/Al เป็นชนิด AL/Ti/p-Si/Ti/Al โดยที่หลักการการทำงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพี (p type) สามารถพิจารณาได้ในทำนองเดียวกันกับสารกึ่งตัวนำชนิดเอ็น (n type) แต่ค่าฟังก์ชันงานของสารกึ่งตัวนำชนิดพีจะต้องมีค่ามากกว่าฟังก์ชันงานของโลหะ ($q\phi_s > q\phi_m$) ทำให้แถบพลังงานของโครงสร้างรอยสัมผัสชนิดพีเกิดการโค้งงอ [1] ดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพี (โลหะและสารกึ่งตัวนำชนิดพี)

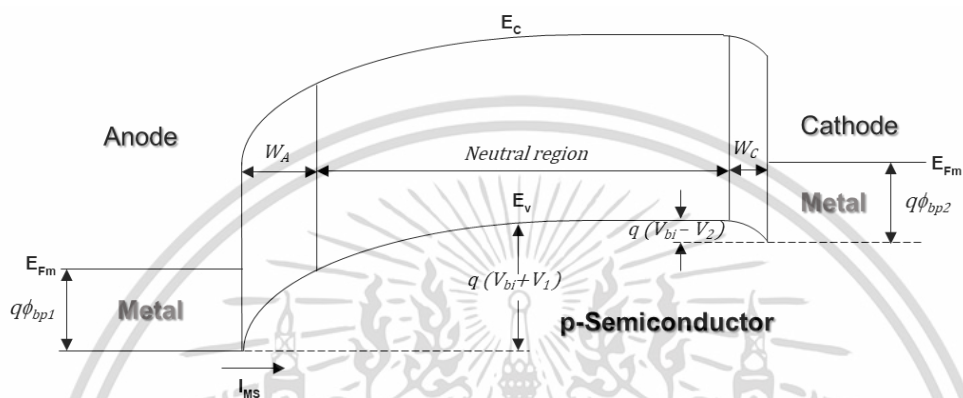
- (ก) สัญลักษณ์ทางวงจรไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสง
 (ข) ภาพตัดขวางของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ
 (ค) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีในสภาวะสมดุล
 ความร้อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3.2 ตัวตรวจวัดแสงเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

ตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเมื่อได้รับการไบอัสดังแสดงในรูปที่

2.14 โดยรอยสัมผัสด้านซ้ายมือเป็นขั้วแอโนดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสย้อนกลับ รอยสัมผัสด้านขวามือเป็นขั้วแคโทดเกิดเป็นลักษณะของการไบอัสตรง



รูปที่ 2.14 แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเมื่อได้รับแรงดันไบอัส

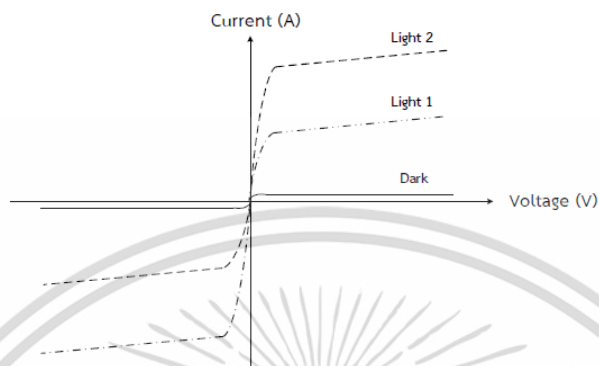
การไบอัสย้อนกลับ จะทำให้บริเวณปลอดพาหะด้านแอโนด (W_A) มีการขยายตัวกว้างมากขึ้นและมีกำแพงศักย์ภายในสูงขึ้นเป็น $V_{bi} + V_1$ อิเล็กตรอนจากทางด้านสารกึ่งตัวนำไม่สามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสไปยังด้านโลหะได้ จะมีเพียงอิเล็กตรอนส่วนน้อยที่มีพลังงานมากพอจากด้านโลหะเคลื่อนที่ข้ามกำแพงศักย์ชนิดพีไปยังด้านสารกึ่งตัวนำได้ ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้ามีทิศทางที่ไหลจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งมีค่าเท่ากับกระแสรั่วไหลของรอยสัมผัสชนิดพี ส่วนด้านแคโทดที่ได้รับการไบอัสตรงบริเวณปลอดพาหะด้านแคโทด (W_C) แคบมากขึ้น และมีค่าของกำแพงศักย์ภายในลดลงเท่ากับ $V_{bi} - V_1$ ดังนั้นอิเล็กตรอนจากสารกึ่งตัวนำ จึงสามารถเคลื่อนที่ข้ามรอยสัมผัสเข้าไปทางด้านโลหะได้ และทำให้มีกระแสไฟฟ้า (I_{MS}) ไหลจากสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ แต่เนื่องจากมีอิเล็กตรอนที่ เคลื่อนที่จากทางด้านแคโทดเข้ามาที่สารกึ่งตัวนำ มีปริมาณน้อยอยู่แล้วจึงทำให้กระแสนี้มีค่าน้อยตาม ไปด้วยซึ่งก็คือ กระแสรั่วไหลหรือกระแสมืด (Dark current : I_{dark}) ของโครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพี

2.3.3 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะได้รับแสงตกกระทบ

โครงสร้างสองรอยสัมผัสชนิดพีเมื่อได้รับแสงตกกระทบ พื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงจะอยู่ตรงพื้นที่ของระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน (D) แถบพลังงานของตัวตรวจวัดแสงภายใต้การให้แรงดันไบอัสแสดงดังรูปที่ 2.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัมผัสข้อต่อที่เมื่อได้รับความเข้มแสงตกกระทบมีความสมมาตรกันทั้งด้านที่ได้รับไบอัสตรงและไบอัสกลับ ซึ่งกระแสจะมีค่ามากขึ้นเมื่อได้รับค่าความเข้มแสงที่สูงขึ้นด้วย



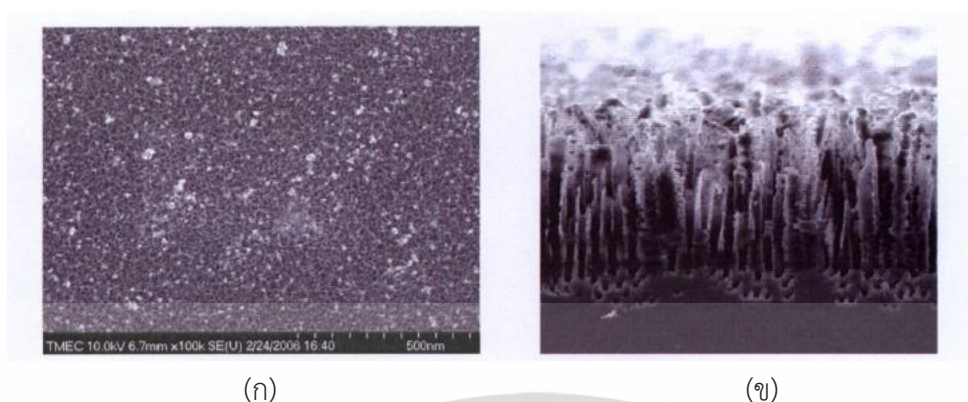
รูปที่ 2.16 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของ MSM เมื่อได้รับแสงตกกระทบ

2.4 พอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอนเป็นเนื้อซิลิคอนที่มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก ถูกค้นพบเมื่อปี ค.ศ. 1956 Uhler [16] แต่คุณสมบัติบางประการที่สำคัญซึ่งแตกต่างจากซิลิคอนโดยสิ้นเชิง เช่น คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (photoluminescence) และคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ลูมิเนสเซนซ์ (Electroluminescence) ที่อุณหภูมิห้อง เพิ่งเป็นที่รู้จักเมื่อปี ค.ศ. 1990 โดย Leigh Canham [17] นอกจากนี้ ชั้นของพอร์สซิลิคอนยังสามารถดูดกลืนรังสีได้ดี และมีดัชนีการหักเห (refractive index) ต่ำและอยู่ในช่วงกว้าง คือ 1.25 - 3 อีกด้วย [18] ซึ่งคุณสมบัติดังกล่าวนี้ ทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานได้อย่างกว้างขวาง อาทิ ทางชีวการแพทย์ (biomedical) เครื่องตรวจจับต่างๆ (sensor) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (optoelectronics) ในหัวข้อนี้จะได้กล่าวถึง คุณสมบัติ ลักษณะแถบพลังงาน กระบวนการสร้างและการนำชั้นพอร์สซิลิคอนไปประยุกต์ใช้งานต่างๆ

พอร์สซิลิคอน (Porous Silicon : PS) มาจากคำว่า พอร์ส (porous) ที่หมายถึง รูพรุน รวมกับคำว่า ซิลิคอน (silicon) ซึ่งเป็นธาตุของแข็ง ใช้อธิบายผลึกขนาดระดับนาโนเมตรของซิลิคอน (nanocrystallites silicon) ที่เป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมาก มีลักษณะที่แข็งและเปราะ โครงสร้างระดับนาโนนี้ส่วนใหญ่จะประกอบไปด้วยลักษณะแท่ง (columnar) หรือทรงกลม (dot or sphere) หรือลักษณะคล้ายฟองน้ำ (spongy skeleton) [19] จากลักษณะโครงสร้างดังกล่าว จึงเรียกผลึกระดับนาโนเมตรของซิลิคอนนี้ว่า พอร์สซิลิคอน ลักษณะผิวหน้าและภาคตัดขวางแสดงได้ดังรูปที่ 2.17

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.17 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องภาค

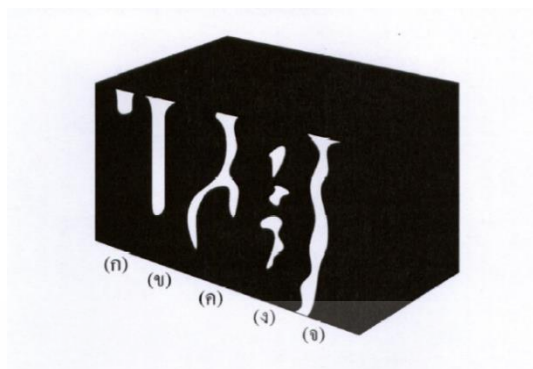
(ก) ลักษณะผิวหน้า (ข) ภาคตัดขวาง

2.4.1 ประเภทของพอร์สซิลิคอน

โครงสร้างของชั้นพอร์สซิลิคอนประกอบด้วยรูพรุนขนาดเล็กหลายลักษณะแทรกตัวอยู่ระหว่างเนื้อซิลิคอน ซึ่งสามารถแบ่งประเภทของพอร์สซิลิคอนได้ 3 ประเภทตามลักษณะของรูพรุน ได้แก่ แบ่งตามลักษณะของรูพรุน (Pore type) แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (Pore shape) และแบ่งตามขนาดของรูพรุน (Pore size) [20]

ประเภทของพอร์สซิลิคอนที่แบ่งตามลักษณะของรูพรุน (pore type) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 ลักษณะ ดังรูปที่ 2.18 คือ

1. ลักษณะหลุมตัน (Blind or saccate) เกิดขึ้นในกรณีที่ชั้นพอร์สซิลิคอนมีความบางมากๆ เหมือนเป็นฟิล์มบาง [21]
2. ลักษณะถุง (Dead-end or saccate) ลักษณะรูพรุนคล้ายถุง และคล้ายกับลักษณะแบบหลุมตัน แต่แบบถุงจะมีความลึกที่มากกว่า
3. ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน (Interconnected or branched) รูพรุนมีลักษณะแตกกิ่งก้านและเชื่อมต่อกันคล้ายรากไม้ที่มีรากฝอยกระจายทั่วไป
4. ลักษณะโพรงปิด (Totally isolated or closed) เหมือนมีโพรงอากาศแทรกอยู่ในเนื้อซิลิคอนจำนวนมาก [22-24]
5. ลักษณะการทะลุ (Through pores) รูพรุนจะเปิดที่ปลายทั้งสองด้าน โดยจะพบลักษณะนี้ในโครงสร้างแบบเมมเบรน (Membrane) ที่มีการกัดแบบนานๆ ให้รูพรุนทะลุเนื้อซิลิคอนอีกด้านหนึ่ง [25]

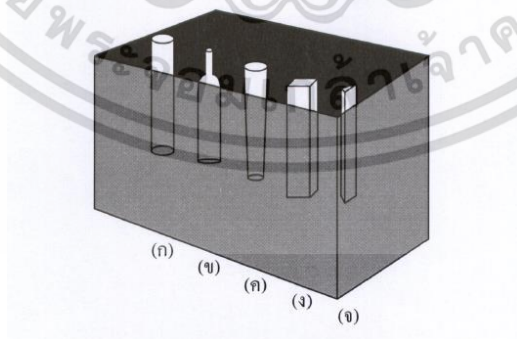


รูปที่ 2.18 ประเภทของพอร์สซิลิโคนแบ่งตามลักษณะของรูพรุน

- (ก) ลักษณะหลุมตัน
- (ข) ลักษณะถุง
- (ค) ลักษณะแตกกิ่งและเชื่อมถึงกัน
- (ง) ลักษณะโพรงปิด
- (จ) ลักษณะทะเล [26]

ประเภทของพอร์สซิลิโคนที่แบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (pore shape) สามารถแบ่งออกได้เป็น 5 รูปร่าง ดังรูปที่ 2.19 คือ

1. ทรงกระบอก (Cylindrical)
2. ทรงขวดหมึก (Ink-bottle) [27-28]
3. ทรงกรวย (Funnel)
4. ทรงลูกบาศก์ (Cuboid or slit) [29]
5. ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด (Triangular or pyramidal)

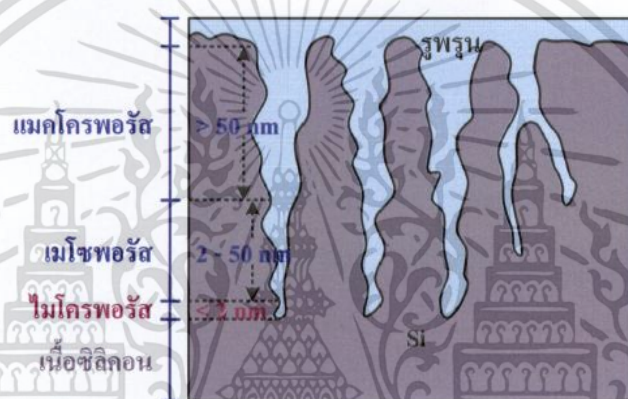


รูปที่ 2.19 ประเภทของพอร์สซิลิโคนแบ่งตามรูปร่างของรูพรุน (ก) ทรงกระบอก (ข) ทรงขวดหมึก (ค) ทรงกรวย (ง) ทรงลูกบาศก์ (จ) ทรงสามเหลี่ยมหรือทรงพีระมิด [26]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประเภทของพอร์สซิลิคอนที่แบ่งตามขนาดของรูพรุน (Pore size) สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขนาด [30] แสดงดังรูปที่ 2.20 คือ

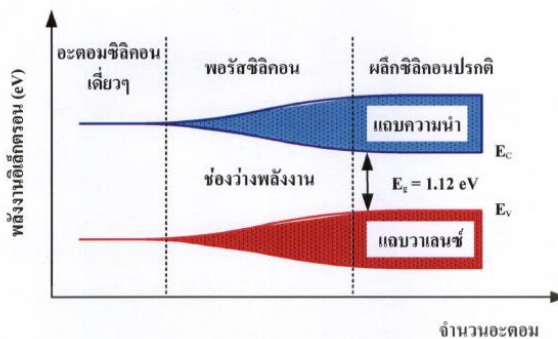
1. ไมโครพอร์ส (Microporous) มีขนาดความกว้างของหลุม (Pore width) น้อยกว่าหรือเท่ากับ 2 นาโนเมตร โดยชั้นไมโครพอร์สนี้จะมีโครงสร้างที่ติดกับเนื้อของซิลิคอน
2. เมโซพอร์ส (Mesoporous) มีขนาดความกว้างของหลุม (Pore width) ในช่วง 2 ถึง 50 นาโนเมตร
3. แมคโครพอร์ส (Macroporous) มีขนาดความกว้างของหลุม (Pore width) มากกว่า 50 นาโนเมตร



รูปที่ 2.20 ประเภทของพอร์สซิลิคอนแบ่งตามขนาดของรูพรุน

2.4.2 ลักษณะแถบพลังงานของพอร์สซิลิคอน

เมื่ออะตอมของผลึกซิลิคอนมาอยู่ใกล้ชิดกัน จนเกิดการเหลื่อมล้ำกันของระดับพลังงานในอะตอม ทำให้เกิดการแยกของระดับพลังงานเหล่านั้นขึ้น ซึ่งจำนวนของระดับพลังงานที่แยกออกมานั้นจะมีค่าเท่ากับจำนวนของอะตอมที่อยู่ใกล้ชิดกัน จากหลักการดังกล่าวถ้าสามารถทำการลดจำนวนอะตอมภายในผลึกลงได้ ก็จะทำให้ปฏิกริยาระหว่างอะตอมที่มีต่อกันนั้นมีจำนวนลดลงด้วย ซึ่งจะมีผลต่อลักษณะของแถบพลังงานในส่วนช่องว่างพลังงาน (band gap energy) ที่จะมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเนื้อของผลึกซิลิคอนเดิม



รูปที่ 2.21 ลักษณะแถบพลังงานของผลึกซิลิคอนที่จำนวนอะตอมต่างๆ [31]

จากรูปที่ 2.21 พบว่า เมื่อจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนมีค่าลดลง จะมีผลทำให้ช่องว่างพลังงานมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งในทางปฏิบัติการลดจำนวนอะตอมของผลึกซิลิคอนลงนั้น สามารถทำได้โดยการลดหรือบีบขนาดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนให้มีขนาดเล็กลงอยู่ในระดับของนาโนเมตรจนสามารถเกิดปรากฏการณ์ทางควอนตัม ซึ่งจะมีผลทำให้ลักษณะโครงสร้างทางช่องว่างพลังงานมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นจากเนื้อผลึกซิลิคอนเดิม เรียกปรากฏการณ์เช่นนี้ว่า ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (Quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เม้นเอฟเฟค (Quantum confinement effect)

พาหะนำกระแสที่อยู่ภายในโครงสร้างเล็กๆเหล่านี้จะเสมือนถูกกักขังให้อยู่ภายในบริเวณที่มีเนื้อที่จำกัดไม่สามารถเคลื่อนที่ไปมาได้อย่างอิสระในแบบ 3 มิติเหมือนในเนื้อผลึกซิลิคอนปกติ ทำให้คุณสมบัติทางไฟฟ้าและคุณสมบัติทางแสงแตกต่างไปจากเนื้อซิลิคอนเดิม

ทิศทางการเคลื่อนที่โดยรวมของพาหะนำกระแสจะถูกบีบหรือบังคับด้วยลักษณะ และขนาดของโครงสร้างผลึก ทำให้ปรากฏการณ์ ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (Quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนไฟน์เม้นเอฟเฟค (quantum confinement effect) สามารถแบ่งออกได้ 3 ประเภทด้วยกัน คือ

1. ควอนตัมในเชิง 2 มิติ (Quantum well)
2. ความตัมในเชิง 1 มิติ (Quantum wire)
3. ควอนตัมในแบบไม่มีมิติ (Quantum dot)

เนื่องจากเนื้อซิลิคอนในโครงสร้างส่วนใหญ่ของชั้นพอร์สซิลิคอนจะมีลักษณะเป็นแท่ง (Silicon wires) หรือลักษณะเสาแคบๆ ที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร ทำให้ปรากฏการณ์ทางควอนตัมที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน จัดอยู่ในประเภทควอนตัม 1 มิติ (quantum wire) ซึ่งความกว้างของช่องพลังงาน (E_{ps}) มีค่าขึ้นอยู่กับโครงสร้างระดับนาโนเมตรของพอร์สซิลิคอน

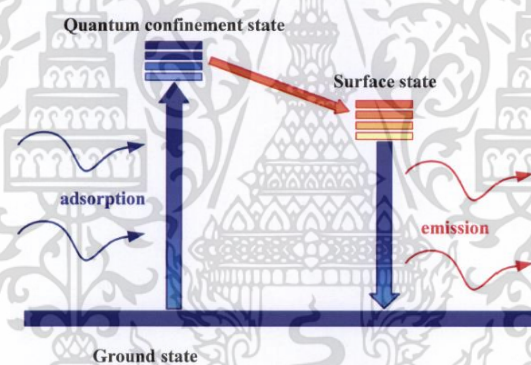
2.4.3 พฤติกรรมทางแสงของพอร์สซิลิคอน

คุณสมบัติของโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนเกิดขึ้นมาจากสาเหตุสำคัญ 2 ประการร่วมกัน คือ

1. การเกิดปรากฏการณ์ควอนตัมไซส์เอฟเฟค (Quantum size effect) หรือ ควอนตัมคอนฟินเมนต์คอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (Quantum confinement effect) [32-33] ภายในชั้นของนาโนพอร์สซิลิคอนทำให้ขนาดช่องว่างของแถบพลังงานของนาโนพอร์สซิลิคอนมีความกว้างมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับขนาดของช่องว่างแถบพลังงานเดิมของผลึกซิลิคอน

2. การเกิดระดับพลังงานที่ผิว (Surface state) ของนาโนพอร์สซิลิคอน [34] ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการที่มีพันธะของไฮโดรเจนและอะตอมของธาตุอื่นๆ ที่อยู่ที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอน

จากสาเหตุทั้ง 2 ประการทำให้สามารถอธิบายคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ของพอร์สซิลิคอนได้ โดยอาศัยแบบจำลองสถานะของระดับพลังงาน 3 ระดับ (three level luminescent state model) ดังแสดงในรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 แบบจำลองสถานะของระดับพลังงานภายในพอร์สซิลิคอน

จากรูปที่ 2.22 แสดงให้เห็นได้ว่า มีสถานะของระดับพลังงานกระตุ้น (Excited state) อยู่สองระดับ โดยสถานะแรกเป็นสถานะของระดับพลังงานภายในนาโนพอร์สซิลิคอนที่เกิดขึ้นเนื่องจากผลของควอนตัมคอนไฟน์เมนต์เอฟเฟค (Quantum confinement effect) หรือควอนตัมเอฟเฟค (Quantum effect) ส่วนสถานะที่สองจะเป็นสถานะของระดับพลังงานที่ผิวของนาโนพอร์สซิลิคอน จากแบบจำลองนี้เมื่ออิเล็กตรอนภายในนาโนพอร์สซิลิคอนได้รับพลังงานกระตุ้นจากแสงจนมีพลังงานเพียงพอที่จะกระโดดข้ามช่องว่างพลังงานขึ้นไปอยู่ในสถานะ Quantum confinement state ได้ แต่เนื่องจากช่องว่างพลังงานของระดับพลังงานที่มีขนาดเล็กกว่าช่องว่างพลังงานในนาโนพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้อิเล็กตรอนซึ่งอยู่ในสถานะไม่เสถียรเหล่านี้มีการเปลี่ยนแปลงสถานะย้ายลงสู่สถานะของระดับพลังงานที่ผิวก่อนที่จะเกิดการรวมตัวใหม่

(Recombination) กับไฮลที่อยู๋ในสถานะพื้น (Ground state) โดยในการรวมตัวใหม่นี้ทำให้อิเล็กตรอนมีการคายพลังงานออกมา ซึ่งอยู๋ในรูปของโฟตอนหรือแสง

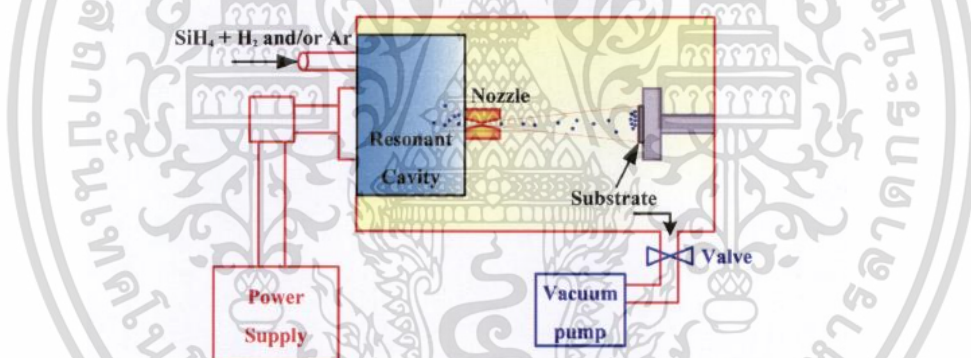
2.4.4 กระบวนการสร้างพอร์ซซิลิคอน

กระบวนการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน มีอยู่หลายวิธี ได้แก่

2.4.4.1 วิธีสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

วิธีสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ

(Microwave plasma decomposition SiH_4) สามารถสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู๋ในระดับนาโนเมตร ซึ่งสามารถแสดงคุณสมบัติการเปล่งแสงในช่วงที่ตามองเห็นได้ ณ อุณหภูมิห้อง [35] ซึ่งมีหลักการ คือ ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู๋ในระดับนาโนเมตรจะถูกสร้างขึ้นมาจากการสลายตัวของก๊าซไซเรน (SiH_4) กับก๊าซไฮโดรเจน (H_2) หรือก๊าซผสมของอาร์กอน (Ar) โดยใช้คลื่นไมโครเวฟที่มีกำลัง 150 วัตต์ ที่ความถี่ 2.45 GHz โดยลักษณะของอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการสร้างแสดงในรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรด้วยวิธีการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยคลื่นไมโครเวฟ [35]

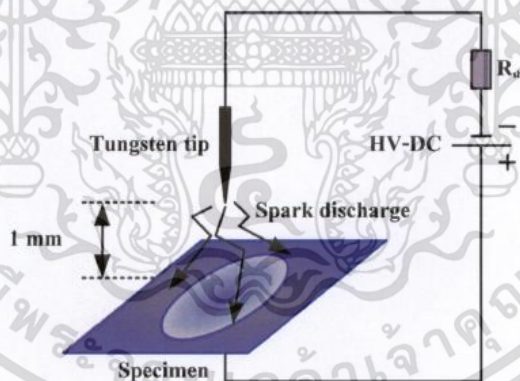
ขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางตั้งแต่ 2.5 จนไปถึง 2 นาโนเมตร ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนผสมของก๊าซกับกำลังของคลื่นไมโครเวฟที่ใช้ หลังจากนั้นผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู๋ในระดับนาโนเมตรนี้จะถูกปล่อยผ่านท่อที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางภายในเท่ากับ 4.5 มิลลิเมตรไปยังภาชนะระบบปิด (Chamber) ที่ภายในมีความดันอยู๋ในระดับ 10^{-6} Torr โดยผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู๋ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นนี้จะถูกปล่อยให้ไปตกเคลือบอยู่บนฐานรองที่เป็นควอทซ์ ณ ที่อุณหภูมิห้อง

2.4.4.2 วิธีสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยแสงเลเซอร์

ผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรยังสามารถสร้างขึ้นได้จากการสลายตัวของก๊าซไซเรนด้วยแสงเลเซอร์ (Laser breakdown SiH₄) [36-37] โดยวิธีสร้างเริ่มต้นจากการที่ก๊าซไซเรนบริสุทธิ์ (Pure SiH₄) ที่มีความดันเท่ากับ 10, 15 หรือ 20 Torr ถูกปล่อยเข้าไปยังภาชนะระบบปิด (Chamber) ซึ่งภายในมีความดัน (Background pressure) ที่ต่ำกว่า 10⁻⁶ Torr ความดันของก๊าซไซเรนต่างๆ เหล่านี้เป็นตัวกำหนดขนาดของผลึกซิลิคอนที่เกิดขึ้น ในส่วนของเลเซอร์ที่ใช้นั้นมีแหล่งกำเนิดมาจากระบบ Nd³⁺ : YAG laser system โดยแสงเลเซอร์ที่ได้ออกมาจะถูกโฟกัสให้ผ่านเข้าไปยังภาชนะระบบปิด เพื่อทำให้เกิดการสปาร์ค (Spark) ภายในผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรที่เกิดขึ้นจะเคลือบ (Deposit) ลงบนฐานรองที่เป็นควอทซ์หรือแผ่นเยอร์มันเนียม

2.4.4.3 วิธีการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอนจากคลื่นความถี่สูง

เทคนิคในการสร้างผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรด้วยคลื่นความถี่สูง (High-frequency spark discharge) [38-39] ใช้การ spark discharge จากแหล่งจ่ายไฟกระแสตรงที่ความต่างศักย์สูงขนาด 15 กิโลโวลต์ ซึ่งในการ spark แต่ละครั้งใช้เวลาประมาณ 20 นาโนวินาที และเกิดทุกๆ 60 ไมโครวินาที ดังแสดงในรูปที่ 2.24



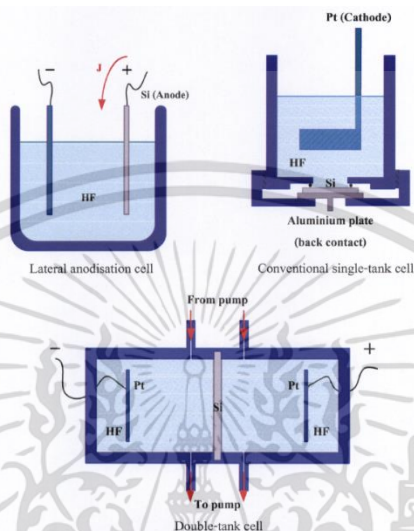
รูปที่ 2.24 อุปกรณ์ที่ใช้สร้างผลึกซิลิคอนในระดับนาโนเมตรจากคลื่นความถี่สูง

จากรูปจะเห็นได้ว่าการ Spark discharge จะเกิดขึ้นระหว่างปลายสุดของลวดทังสเตน ซึ่งอยู่ที่ขั้วแอโนดกับแผ่นผลึกซิลิคอนซึ่งอยู่ที่ขั้วแคโทด โดยการ spark นั้นจะทำให้บริเวณซึ่งเกิดโครงสร้างของผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรมีลักษณะเป็นบริเวณวงกลมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 3 ถึง 5 มิลลิเมตร บนแผ่นผลึกซิลิคอน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

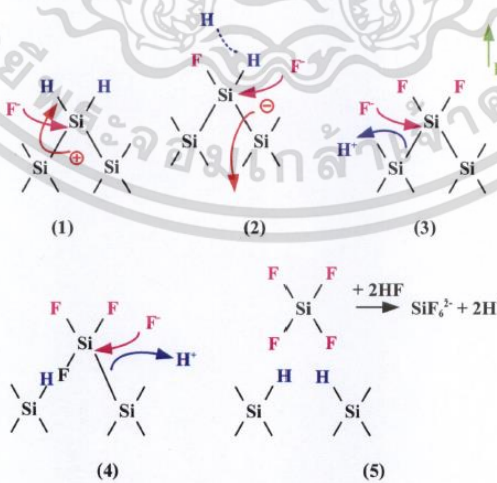
2.4.44 วิธีการกัดทางไฟฟ้า-เคมี

พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างขึ้นบนแผ่นผลึกซิลิคอนได้โดยตรง โดยอาศัยกระบวนการกัดทางไฟฟ้า-เคมี (Electrochemical etching) ที่เรียกว่า แอนโอดิซเซชัน (Anodisation) โดยใช้อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมี ดังแสดงในรูปที่ 2.25



รูปที่ 2.25 ภาคตัดขวางของอุปกรณ์ที่ใช้ในการสร้างพอร์สซิลิคอนด้วยการกัดทางไฟฟ้า-เคมี

อุปกรณ์เซลล์ไฟฟ้าเคมีที่ใช้ในกระบวนการกัดเนื้อผลึกซิลิคอนนี้ จะประกอบด้วยแผ่นผลึกซิลิคอนอยู่ที่ขั้วแอโนด และขั้วแคโทดจะใช้ทองเป็นขั้ว โดยวัสดุทั้งสองจะถูกจุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์(สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก) โดยมีกลไกการเกิดพอร์สซิลิคอน ดังรูปที่ 2.26



รูปที่ 2.26 ขั้นตอนและกลไกทางเคมีในการกัดเนื้อผลึกซิลิคอน [38]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เริ่มต้นจากการไม่ไบอัสแบบแอนดิก ซึ่งเป็นกระบวนการในการป้อนศักย์ไฟฟ้าชั่ววอกให้เข้ากับ ซิลิคอน (Si) ที่บริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีอะตอมของไฮโดรเจนปกคลุมอยู่เต็ม มีผลทำให้อิออนของ ฟลูออรีนที่อยู่ในสารละลายกรดไม่สามารถที่จะเข้ามาทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมได้ (Si - H) แต่เมื่อมีการไบอัสเซลล์ไฟฟ้าเคมีแบบแอนดิก โดยป้อนศักย์ไฟฟ้าชั่ววอกให้แก่ซิลิคอน (Si) จน พหุอะตอมไฮโดรเจนสามารถเคลื่อนที่มาถึงบริเวณผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกมีผล ทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจนอะตอมที่ผิว สามารถถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีนที่อยู่ใน สารละลายกรด เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F) ขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 1 และ เนื่องจากอิทธิพลในการ polarizing ของพันธะฟลูออรีนที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรก ส่งผลทำให้อิออนของ ฟลูออรีน (F) อีกตัวที่อยู่ในสารละลายกรดสามารถที่จะเข้าทำลายพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับไฮโดรเจน อะตอม (Si - H) ที่ยังคงเหลืออยู่อีกข้างหนึ่งได้พร้อมกับเกิดโมเลกุลของก๊าซไฮโดรเจน (H₂) และมีการปล่อย พหุอะตอมอิเล็กตรอน 1 ตัวไปยังซิลิคอน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 2 และ 3 ต่อจากนั้นก็เกิดการเหนี่ยวนำวาเลนซ์ อิเล็กตรอน (Polarization induced) โดยกลุ่มของพันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับฟลูออรีน (Si - F groups) ที่ เกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 และ 3 มีผลทำให้พันธะเคมีระหว่างซิลิคอนกับซิลิคอนที่อยู่ถัดเข้ามามีความแข็งแรง ลดลง ทำให้พันธะเคมีดังกล่าวสามารถที่จะถูกทำลายได้โดยอิออนของฟลูออรีน เกิดเป็นพันธะเคมีระหว่าง ซิลิคอนกับฟลูออรีนขึ้นมาแทน ดังแสดงในขั้นตอนที่ 3 และ 4 ซึ่งจากขั้นตอนนี้อะตอมของซิลิคอนจะถูกดึงให้ หลุดออกมาจากผิวหน้าของผลึกซิลิคอน พร้อมกับเกิดการเกิดพันธะเคมีระหว่างไฮโดรเจนกับซิลิคอนอะตอมที่อยู่ ถัดเข้ามา ดังแสดงไว้ขั้นตอนที่ 5

ปฏิกิริยาเคมีในการกัดที่เกิดขึ้นสามารถเขียนเป็นสมการเคมีได้ดังนี้ คือ [38]



จากสมการที่ 2.2 และสมการที่ 2.3 สามารถเขียนสมการปฏิกิริยาเคมีรวมใหม่ได้เป็น



จากสมการปฏิกิริยาเคมีที่แสดงข้างต้น เริ่มต้นจากปฏิกิริยาเคมีในสมการที่ 2.1 ที่มีผลึกซิลิคอน (Si) เป็นสารเริ่มต้นและอยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) โดยปฏิกิริยาเคมีนี้อาศัยโฮลในการเกิดปฏิกิริยา เคมี ซึ่งจะทำให้เกิด SiF₂ ขึ้นที่บริเวณผิวของผลึกซิลิคอนต่อจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF₂ กับ สารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกดังแสดงในสมการที่ 2.2 ได้ผลลัพธ์เป็น SiF₄ หลุดออกมาจากผิวของผลึกซิลิคอน ในระหว่างกระบวนการกัดขั้นนี้เอง สังเกตได้ว่าจะเกิดก๊าซไฮโดรเจน (H₂) ขึ้นที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนที่ถูกกัด

หลังจากนั้นก็เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่าง SiF_4 กับสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย คือ สารละลาย H_2SiF_6 อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก ดังแสดงในสมการที่ 2.3

กระบวนการสร้างพอร์ซซิลิคอนจากวิธีกัดด้วยไฟฟ้า-เคมี มีปัจจัยหลายประการที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอน ซึ่งพอร์ซซิลิคอนที่มีโครงสร้างที่แตกต่างกันย่อมมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันด้วย เช่น พอร์ซซิลิคอนที่มีค่าความพรุนมากๆ จะมีขนาดโครงสร้างแท่งซิลิคอนที่เล็กลง เป็นผลให้ช่องว่างพลังงานที่บริเวณชั้นพอร์ซซิลิคอนกว้างมากขึ้น เป็นต้น

ปัจจัยหลักที่มีผลต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างด้วยวิธีการกัดด้วยไฟฟ้า-เคมี คือ สภาพความต้านทานของผลึกซิลิคอน ชนิดของสารเจือในเนื้อผลึกซิลิคอน ความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา ความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด

จากการศึกษา พบว่า โครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนจะมีค่าความพรุนสูงขึ้น และมีความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนมากขึ้นเมื่อเพิ่มค่าสภาพความต้านทานในผลึกซิลิคอนชนิดพี หรือลดค่าสภาพความต้านทานในผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น การเพิ่มความหนาแน่นกระแสที่ไบอัสเพื่อให้เกิดปฏิกิริยา การลดความเข้มข้นของสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก และการเพิ่มเวลาที่ใช้ในกระบวนการกัด [39]

2.4.4.5 วิธีการกัดย้อมสี (stain etching)

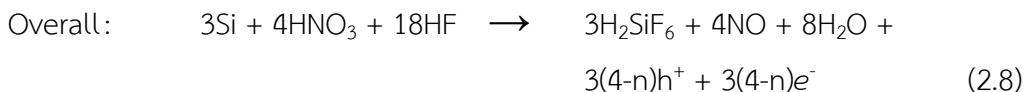
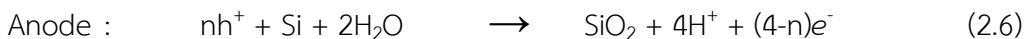
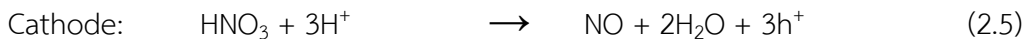
การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดย้อมสี (Stain etching) เริ่มนำมาใช้ตั้ง ค.ศ.1960 [43] ซึ่งเทคนิคการกัดย้อมสีผลึกซิลิคอนเพื่อสร้างชั้นพอร์ซเป็นเทคนิคที่ง่าย โดยจุ่มผลึกซิลิคอนลงในสารละลาย ซึ่งประกอบด้วยกรดไฮโดรฟลูออริกที่มีความเข้มข้น 47wt% กรดไนตริกที่มีความเข้มข้น 60 wt.% และน้ำบริสุทธิ์ ในอัตราส่วน 1:3:5 ตามลำดับ [40] นอกจากนี้สามารถใช้แสงสว่างเพื่อช่วยกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีในขณะทำการกัดได้ด้วย



รูปที่ 2.27 การสร้างพอร์ซซิลิคอนด้วยวิธีการกัดย้อมสี

ตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์ซขึ้น คือ การเกิดโฮล (h^+) ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาการเกิดก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) ดังสมการที่ (2.5) [41]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ปฏิกิริยาเริ่มต้นจากกรดไนตริก (HNO_3) ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ที่อยู่ในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) เกิดเป็นก๊าซไนโตรเจนมอนอกไซด์ (NO) น้ำ (H_2O) และไฮโดรเจนไอออน (h^+) ที่เกิดขึ้นนี้จะเข้าทำปฏิกิริยากับซิลิคอน (Si) และน้ำ เกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ไฮโดรเจนไอออน และอิเล็กตรอน (e^-) ดังสมการที่ (2.6) ซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริกได้เป็นสารละลาย H_2SiF_6 ดังสมการที่ (2.7) จากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องกันไปเรื่อยๆนี้ ทำให้เนื้อซิลิคอนบางส่วนถูกละลายออกไป และมีรูพรุนขนาดเล็กๆเกิดขึ้นกลายเป็นชั้นพอร์ซซิลิคอนที่มีสีต่างๆปรากฏขึ้น โดยปฏิกิริยาเคมีรวมแสดงได้ดังสมการที่ (2.8)

ในระหว่างกระบวนการกัดจะสังเกตเห็นว่าบริเวณที่กำลังทำปฏิกิริยามีสีเปลี่ยนแปลงไปในรูปแบบที่คล้ายกับวงเวียนสีของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ทั้งนี้เนื่องจากปรากฏการณ์การแทรกสอดของคลื่นแสงและความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้น เช่น วงรอบการเปลี่ยนสีจากสีน้ำเงินเป็นสีเขียวและสีทองตามลำดับ (หลายๆครั้ง) ก็จะได้ความหนาของชั้นพอร์ซซิลิคอนที่เพิ่มขึ้นจากประมาณ 0.1 ไมโครเมตรถึงประมาณ 1.5 ไมโครเมตร เป็นต้น [42] นอกจากนี้ในกระบวนการกัดย่อมมีความจำเป็นที่จะต้องมีการบ่มสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริกร่วมกับกรดไนตริกก่อนที่จะนำไปทำการสร้างชั้นพอร์ซซิลิคอน ซึ่งเรียกช่วงเวลาดังกล่าวว่า เวลาการบ่มสารละลาย (Incubation period) [43]

ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อโครงสร้างของพอร์ซซิลิคอนที่สร้างจากวิธีการกัดย่อมมี คือ

1. อัตราส่วนของสารละลายที่ใช้ทำปฏิกิริยา [48] โดยเฉพาะอย่างยิ่งความเข้มข้นของกรดไนตริกซึ่งจะมีผลอย่างมากต่อการเกิดไฮโดร (h^+) ซึ่งเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกิดชั้นพอร์ซขึ้น อัตราส่วนของสารละลายที่นิยมใช้ได้แก่ $\text{HF}:\text{HNO}_3:\text{H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1:3:5 เป็นต้น

2. ชนิดของสารเจือ และค่าสภาพความต้านทานของแผ่นผลึกซิลิคอนที่นำมากัดพอร์ซ มีผลอย่างมากต่อเวลาการเหนี่ยวนำ (Induction time) ให้เกิดชั้นพอร์ซซิลิคอนโดยตรง [49] เช่น ในซิลิคอนชนิดพี เวลาการเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้น (สภาพต้านทาน 0.004 $\Omega\cdot\text{cm}$ ใช้เวลาการเหนี่ยวนำ 30 วินาที เพิ่มขึ้นเป็น 9 นาทีเมื่อสภาพต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 50 $\Omega\cdot\text{cm}$) ถ้าเป็นผลึกซิลิคอนชนิดเอ็น เวลาการเหนี่ยวนำจะลดลง เวลาการเหนี่ยวนำจะลดลงเมื่อค่าสภาพต้านทานเพิ่มขึ้น (สภาพต้านทาน 0.15 $\Omega\cdot\text{cm}$ ใช้เวลาในการเหนี่ยวนำ 10 นาที ลดลงเหลือ 8 นาทีเมื่อสภาพต้านทานเพิ่มขึ้นเป็น 20 $\Omega\cdot\text{cm}$)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. สภาพของผลึกซิลิคอนมีผลต่อการเกิดโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน [44] มีการทดลองกับแผ่นซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยว แผ่นซิลิคอนแบบผลึกหลายรูป แผ่นซิลิคอนแบบอะมอร์ฟัส และอัลลอยด์ของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($Si_{1-x}Ge_x$) ที่สร้างจากกระบวนการอพีแทกซี (Epitaxy process) เมื่อนำมาสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนด้วยวิธีการกัดย้อมสี พบว่า การกระตุ้นด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต (UV) พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนแบบผลึกเดี่ยวและแบบผลึกหลายรูปสามารถแสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ได้ แต่พอร์สซิลิคอนที่สร้างจากแผ่นซิลิคอนที่มีโครงสร้างผลึกแบบอะมอร์ฟัสกลับไม่แสดงคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ ส่วนอัลลอยด์ของซิลิคอนกับเจอร์เมเนียม ($Si_{1-x}Ge_x$) พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนของเจอร์เมเนียม ($x = 0.04-0.41$) จะทำให้ความเข้มของแสงจากการเกิดโฟโตลูมิเนสเซนซ์ลดลง ในขณะที่ค่าความยาวคลื่นสูงสุดที่ปล่อยออกมายังคงมีค่าเท่าเดิม

4. การใช้คลื่นเสียงในระหว่างกระบวนการกัดจะช่วยให้การทำปฏิกิริยาบนพื้นผิวของซิลิคอนที่สัมผัสกับสารละลายเกิดการทำปฏิกิริยาอย่างมีระเบียบมากขึ้น และทำให้ชั้นพอร์สซิลิคอนมีความหนาขึ้น แต่ขณะเดียวกันก็จะได้โครงสร้างพอร์สซิลิคอนที่หยาบกว่าการสร้างพอร์สโดยไม่ใช้คลื่นเสียงร่วมด้วย [45]

วิธีการสร้างพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้หลายวิธี ดังที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเทคนิคการปลูกผลึกซิลิคอนที่มีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตรขึ้นมาโดยตรง โดยเทคนิคต่างๆเหล่านี้จำเป็นต้องอาศัยเทคนิคการสร้างและอุปกรณ์เครื่องมือที่มีความแม่นยำสูงในการปลูกผลึกให้มีโครงสร้างอยู่ในระดับชั้นของโมเลกุลได้ ซึ่งอุปกรณ์เหล่านี้จะมีราคาสูงมาก แต่วิธีการสร้างพอร์สที่ง่ายที่สุดและประหยัดที่สุด [46] คือวิธีการกัดย้อมสี (Stain etching) ผลึกซิลิคอนด้วยสารละลายของกรดไฮโดรฟลูออริก กรดไนตริก และน้ำ

2.5 คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจหลายประการ คือ

1. คุณสมบัติทางกายภาพของพอร์สซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีลักษณะที่แข็ง เปราะ มีรูพรุนมากมาย และมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรสูง
2. คุณสมบัติทางฟิสิกส์ของพอร์สซิลิคอน พอร์สซิลิคอนมีช่องว่างพลังงานกว้างกว่าซิลิคอนทำให้มีความต้านทานมากกว่าซิลิคอน และสามารถสร้างเป็นสารไดอิเล็กทริก (Dielectric) ได้ นอกจากนี้พอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีการหักเหที่ต่ำกว่าซิลิคอน ทำให้พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติอิเล็กทรอนิกส์ (Electroluminescence) หรือคุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) โดยคุณสมบัติเหล่านี้สามารถควบคุมได้จากลักษณะโครงสร้างของพอร์สซิลิคอน ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการสร้าง และเนื่องจากคุณสมบัติที่หลากหลายของพอร์สซิลิคอนนี้ทำให้พอร์สซิลิคอนสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆ มากมาย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.6 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอน

พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติที่น่าสนใจซึ่งแตกต่างกับซิลิคอนทั่วไป ทำให้พอร์สซิลิคอนถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่างๆอย่างแพร่หลาย ได้แก่

2.6.1 การประยุกต์ใช้งานพอร์สซิลิคอนในเซลล์แสงอาทิตย์ [47]

ฟิล์มบางของพอร์สซิลิคอนมีค่าดัชนีหักเหขึ้นอยู่กับค่าความพรุนซึ่งอยู่ในช่วงกว้างตั้งแต่ 1.25 ถึง 3 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้ในช่วงกว้าง โดยศักยภาพของพอร์สซิลิคอนในการประยุกต์ใช้ในเซลล์แสงอาทิตย์ประกอบด้วย

1. การสะท้อนแสง (Integrated reflectance) โดยโครงสร้างที่เป็นพื้นผิวขรุขระอย่างมากของพอร์สซิลิคอนจะช่วยเพิ่มพื้นที่การรับแสง (Light trapping) ในเซลล์แสงอาทิตย์ ชั้นพอร์สซิลิคอนที่สร้างขึ้นเพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนนั้น นอกจากจะมีการสะท้อนแสงที่น้อยกว่าการใช้สารละลายโพแทสเซียม-ไฮดรอกไซด์ (KOH) ในการกัดผิวหน้าของผลึกซิลิคอนระนาบ (100) แล้ว การกัดผิวหน้าด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) จะสามารถทำได้เฉพาะกับผลึกรูปเดี่ยวของซิลิคอนที่มีระนาบ (100) เท่านั้น แต่ในขณะที่พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้ในผิวหน้าของผลึกรูปเดี่ยวซิลิคอนไม่ว่าระนาบใดก็ได้ หรือในผลึกหลายรูปของซิลิคอนก็ตาม และมีประสิทธิภาพการลดการสะท้อนได้ดีกว่าชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่นิยมอย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมการผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ของผลึกซิลิคอน และเมื่อเปรียบเทียบการสะท้อนแสงของพอร์สซิลิคอนที่สร้างบนผลึกหลายรูปของซิลิคอนกับชั้นลดการสะท้อนแสงแบบอื่นๆ พบว่า การสร้างพอร์สซิลิคอนที่ผิวหน้าของผลึกซิลิคอนจะมีการสะท้อนแสงเทียบได้กับวิธีการกัดผิวหน้าวิธีอื่นๆ ที่มีความซับซ้อนมากกว่า นอกจากนี้พอร์สซิลิคอนสามารถสร้างได้ง่าย ไม่ซับซ้อน มีข้อจำกัดน้อย และยังมีราคาถูกกว่าการใช้ชั้นลดการสะท้อนแสงที่ซับซ้อนมาก

2. คุณสมบัติการดูดกลืนแสง (Absorption property) และคุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอน (Light-emission property) สามารถปรับแต่งได้ในช่วงที่กว้าง และเนื่องจากขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงาน (Band gap) ในพอร์สซิลิคอนสามารถปรับได้ จึงมีความเหมาะสมในการหาจุดสมดุลสำหรับการดูดกลืนพลังงานแสงอาทิตย์ เนื่องจากเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนจะมีการตอบสนองทางแสงอย่างมากในช่วงความยาวคลื่น 400 – 1000 นาโนเมตร จากทฤษฎีเซลล์แสงอาทิตย์ ขนาดความกว้างช่องว่างพลังงานของชั้นดูดกลืนแสงประมาณ 1.5 อิเล็กตรอนโวลต์ จะมีประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานสูงที่สุด ซึ่งขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานนี้อยู่ในช่วงที่ขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานในพอร์สซิลิคอนสามารถสร้างขึ้นได้ เนื่องจากการขยายได้ของขนาดความกว้างของช่องว่างพลังงานในพอร์สซิลิคอนนี้เอง จึงทำให้พอร์สซิลิคอนเป็นวัสดุทางอุดมคติสำหรับชั้นรอยต่อบนสุดของเซลล์อาทิตย์ หรือใช้เป็นตัวดูดกลืนแสงที่ส่วนบนสุดของเซลล์แสงอาทิตย์

3. คุณสมบัติโฟโตลูมิเนสเซนซ์ (Photoluminescence) ของพอร์สซิลิคอนจะช่วยเปลี่ยนแสงอัลตราไวโอเล็ต (Ultraviolet) และแสงสีน้ำเงิน (Blue light) ให้เป็นแสงที่มีความยาวคลื่นมากขึ้น ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพการเปลี่ยนพลังงานในเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอน

4. พอร์สซิลิคอนที่ถูกสร้างขึ้นที่ผิวด้านหลังของแผ่นซิลิคอนที่ปลูกผลึกด้วยวิธีโซคาลาสกี (Czochralski-grown) จะมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวรับอะตอมแปลกปลอมภายนอก หรืออีกนัยหนึ่ง คือ เป็นศูนย์กลางของสิ่งแปลกปลอมที่มารวมสมุขขณะทำการออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงไม่แพร่กระจาย ซึ่งคุณสมบัตินี้จะมีประโยชน์อย่างมากต่อเซลล์แสงอาทิตย์ เพราะการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์จากผลึกซิลิคอนให้มีประสิทธิภาพสูงนั้นมีหลายขั้นตอนที่เกี่ยวข้องกับออกซิเดชันที่อุณหภูมิสูง

5. ศักยภาพของการสร้างพอร์สซิลิคอนในพื้นที่ขนาดใหญ่ จะช่วยให้พอร์สซิลิคอนเป็นเทคนิคที่เหมาะสมมากในการประยุกต์ใช้กับเซลล์แสงอาทิตย์ที่มีพื้นที่ขนาดใหญ่ได้เป็นอย่างดี

อย่างไรก็ตามยังมีปัญหาบางประการที่เกี่ยวข้องกับการใช้พอร์สซิลิคอนในโครงสร้างของเซลล์แสงอาทิตย์ ได้แก่ การที่พอร์สซิลิคอนมีสภาพต้านทานสูง (High resistivity) อีกทั้งกระบวนการแพร่สารเจือ (Dopant diffusion process) และกระบวนการออกซิเดชัน (Oxidation process) ในกระบวนการสร้างเซลล์แสงอาทิตย์ของซิลิคอนต้องการอุณหภูมิที่สูงมากกว่า 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่มากกว่าอุณหภูมิที่ทำให้คุณสมบัติการเปล่งแสงของพอร์สซิลิคอนหมดสภาพไป

2.6.2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง (Opto-electronic) [48]

พอร์สซิลิคอนเป็นวัสดุที่มีความน่าสนใจในการศึกษาค้นคว้าคุณสมบัติทางด้านแสง เนื่องจากพอร์สซิลิคอนสามารถเรืองแสงได้ที่อุณหภูมิห้อง และจากความพรุนของชั้นพอร์สซิลิคอนที่สามารถควบคุมได้จากกระบวนการสร้าง ทำให้พอร์สซิลิคอนมีคุณสมบัติในการเรืองแสงได้ในช่วงกว้าง ทำให้สามารถควบคุมค่าความยาวคลื่นที่เปล่งออกมาได้ และกำหนดช่วงของการเปล่งแสงได้ด้วย เพื่อนำมาประยุกต์ใช้ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสง [49]

แสงที่เปล่งออกมาจากพอร์สซิลิคอนนั้น ส่วนใหญ่อยู่ในช่วงที่ตามองเห็นได้ ซึ่งแสงที่เปล่งออกมามีคุณสมบัติที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับความเพิ่มหรือลดค่าความพรุนทำให้ค่าความยาวคลื่นของแสงที่เปล่งออกมาเปลี่ยน โดยพอร์สซิลิคอนที่มีค่าความพรุน 70-80 เปอร์เซ็นต์ จะเรืองแสงสีน้ำเงินเขียว ในขณะที่แผ่นที่มีค่าความพรุน 40 เปอร์เซ็นต์เรืองแสงสีแดง

2.6.3. ชีวการแพทย์ (Biomedical) [50]

การนำพอร์สซิลิคอนไปใช้ในงานทางการแพทย์สามารถนำไปใช้ในส่วนหูชั้นใน (Cochlear) ซึ่งสามารถเปลี่ยนสัญญาณเสียงให้เป็นสัญญาณไฟฟ้า และส่งผ่านไปยังสมองโดยตรงแต่จะต้องมีระบบป้องกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากกล้ามเนื้อและเลือด พอร์สซิลิคอนที่ฉีดเข้าไปในร่างกายเพื่อเป็นตัวยาก่อร่างกายมนุษย์นั้น จะแทรกอยู่ชั่วคราว ทำการรักษาให้ยาและละลายโดยไม่มีอะไรเหลืออยู่เลยในร่างกาย ซึ่งสามารถบรรจุยาและระบบคำนวณตัวเล็กๆเข้าไปเพื่อควบคุมเวลาและปริมาณของตัวยาที่ต้องการ นอกจากนั้นยังสามารถฝังเข้าไปในตัวคนไข้ และส่งผ่านข้อมูลมาที่แพทย์ได้โดยไม่ต้องมาตรวจอีกด้วย

การประยุกต์ใช้ทางการแพทย์อื่นๆ เช่น เป็นวัสดุที่สะท้อนและกันน้ำย่อยได้ หรือ ฝังซิลิคอนไปที่ผิวเพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางด้านเคมีเพื่อตรวจสอบอาการมะเร็งจากเลือด เนื่องจากสามารถตรวจสอบเลือดและชี้ตำแหน่งที่เกิดเนื้องอก หรือทำเป็นยาเม็ดที่ผ่านไปยังท้องโดยปราศจากการถูกกักตร้อนและส่งผ่านยาไปยังลำไส้ใหญ่ได้โดยตรง [51]

2.6.4 เครื่องตรวจจับ [52]

พอร์สซิลิคอนนั้นนิยมนำไปทำเป็นเครื่องจับก๊าซและความชื้น เนื่องจากการที่พอร์สซิลิคอนมีอัตราส่วนระหว่างพื้นที่ผิวต่อปริมาตรที่สูง (มากกว่า $500 \text{ m}^2/\text{cm}^3$) ดังนั้น จึงสามารถดูดกลืนโมเลกุลต่างๆที่ผิวได้ดี เมื่อโมเลกุลเหล่านั้นมากระทบจะทำให้คุณสมบัติของพอร์สซิลิคอนเปลี่ยน เช่น ประสิทธิภาพในการเรืองแสงลดลงเมื่ออยู่ในสารเคมีที่ต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางด้านฟิสิกส์ของโมเลกุลนั้นๆเช่นเดียวกับผลของค่าไดอิเล็กทริก (Dielectric constant) และค่าความนำไฟฟ้า (Conductivity) เมื่อผิวหน้าของพอร์สซิลิคอนเต็มไปด้วยโมเลกุลต่างๆ จึงนำมาเป็นพื้นฐานในการสร้างเครื่องตรวจจับความชื้นที่ตรวจจับการเปลี่ยนแปลงความนำไฟฟ้าและค่าไดอิเล็กทริกเมื่อได้รับความชื้นที่ผิวหน้า ซึ่งสามารถนำชั้นพอร์สซิลิคอนมาประยุกต์ในเครื่องตรวจจับปริมาณกลูโคสได้

ข้อดีของพอร์สซิลิคอน คือ สามารถสร้างได้ง่าย สามารถดัดแปลงไปใช้ในโรงงานทางด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ได้ ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากัดและการออกซิไดซ์ และสร้างรูปแบบ (Pattern) ได้โดยวิธีการโฟโตลิโธกราฟี ซึ่งสามารถสร้างได้ง่าย และนำมาสร้างเป็นเครื่องตรวจจับหลายชนิดได้ในอุปกรณ์ตัวเดียว

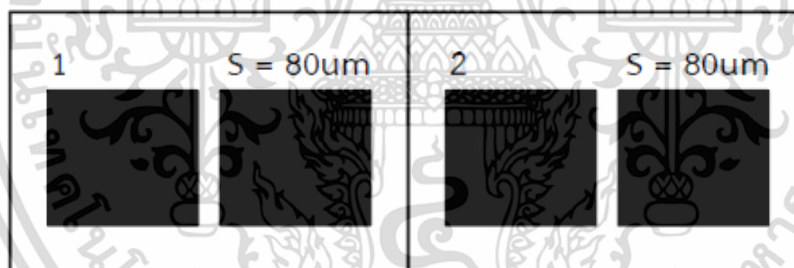
บทที่ 3

การออกแบบและกระบวนการสร้าง

3.1 การออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างแบบร่องรูปถ้วย

การออกแบบลวดลายของกระจกต้นแบบในวิทยานิพนธ์เล่มนี้เป็นชนิดที่ใช้กับน้ำยาไวแสงชนิดบวก (Positive) โดยใช้โปรแกรม Corel DRAW X6 Graphic ในการออกแบบ จากนั้นนำไฟล์ข้อมูลที่ได้ออกแบบไปทำการสแกนด้วยเลเซอร์ (laser scanner) ลงบนแผ่นฟิล์ม และนำแผ่นฟิล์มไปติดบนกระจกใส เพื่อสร้างเป็นกระจกต้นแบบสำหรับใช้ในกระบวนการสร้างต่อไป

โครงสร้างของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปถ้วย (UMSM) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al ซึ่งจะประกอบไปด้วยรอยสัมผัสระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียม (Al) และไทเทเนียม (Ti) กับซิลิคอนชนิดพี (p-Si) ที่เป็นรอยสัมผัสชนิดต่อดี 2 รอยสัมผัส ขั้วไฟฟ้าทั้งสองมีขนาดเท่ากัน คือ 1 mm^2 และมีระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าทั้งสองด้าน $80 \mu\text{m}$ ซึ่งมีขนาดไม่ใหญ่จนเกินไป เพื่อเป็นการประหยัดพื้นที่ให้แก่ตัวอุปกรณ์ และไม่เล็กจนทำให้ลวดลายต้นแบบสัมผัสถึงกันทำให้เกิดการลัดวงจรในภายหลังได้ ดังแสดงในรูปที่ 3.1 เป็นการแสดงลวดลายกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างสองรอยสัมผัสต่อดี



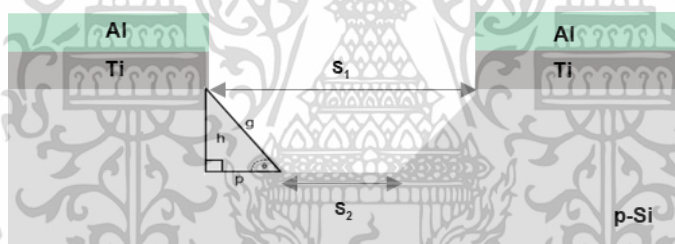
รูปที่ 3.1 ลวดลายบนกระจกต้นแบบของตัวตรวจวัดแสง

ตัวตรวจวัดแสงเป็นอุปกรณ์ที่ใช้วัดปริมาณความเข้มแสง ซึ่งสามารถเปลี่ยนพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยการกระตุ้นพาหะจากการดูดกลืนพลังงานโฟตอนให้เกิดการปลดปล่อยพาหะอิสระทำให้เกิดการนำไฟฟ้า สำหรับการออกแบบลวดลายต้นแบบและการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบร่องรูปถ้วยนั้นจะต้องคำนึงถึงค่าความกว้างบริเวณปลดพาหะ (Depletion region) เนื่องจากสนามไฟฟ้าเกือบทั้งหมดจะตกคร่อมที่บริเวณปลดพาหะ ซึ่งส่งผลให้กระแสแสงเปลี่ยนแปลงตามแรงดันที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในสมการที่ 3.1 ซึ่งเป็นสมการคำนวณหาความกว้างบริเวณปลดพาหะ [1]

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

โดยที่ ϵ_s	คือ ค่าเปอร์มิตติวิตี้ของสารกึ่งตัวนำ
q	คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอนมีค่าเท่ากับ 1.602×10^{-19} คูลอมป์
N_A	คือ ความหนาแน่นอะตอมสารเจือผู้รับ
V_{bi}	คือ แรงดันภายใน
V_A	คือ แรงดันไบอัส

จากการคำนวณจะได้ว่าค่าการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะที่แรงดันไบอัส 5 V และ 10 V มีค่าเท่ากับ 3.76 μm และ 5.13 μm ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ได้จะเป็นตัวแปรที่กำหนดค่าความลึกสำหรับกัตร่องรูปตัวยูในช่วง 3.0 – 5.0 μm จากนั้นคำนวณการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู โดยใช้สูตรทางตรีโกณมิติดังแสดงในสมการที่ 3.2 และ 3.3 โดยใช้ความลึก (ด้าน h) ที่ได้จากการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะเท่ากับ 4 μm มุมของการกัตแบบแอนไอโซทรอปิกเท่ากับ 54.74 องศา [7] พบว่าพื้นที่รับแสงแนวระนาบ (111) ของร่องรูปตัวยู (ด้าน g) มีค่าพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นเป็น 1.73 เท่าของพื้นที่รับแสงแนวราบของร่องรูปตัวยู (ด้าน p) ดังแสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ภาพของภาคตัดขวางโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al

การคำนวณหาค่าการเพิ่มขึ้นของพื้นที่รับแสงของการกัตโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยู ได้จากสมการ

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

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

โดยที่ p	คือ พื้นที่รับแสงแนวราบของร่องรูปตัวยู
g	คือ พื้นที่รับแสงแนวระนาบ (111) ของร่องรูปตัวยู
h	คือ ความลึกการกัต

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์การวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการเตรียมแผ่นซิลิคอนเพื่อใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบน ร่องรูปตัวยูชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al

1. แผ่นซิลิคอน
2. ปีกเกอร์
3. กระดาษกรอง (whatman)
4. กระดาษผ้า Micro Pure SL(Bemcot wiper)
5. อะลูมิเนียมฟอยล์
6. หน้ากากป้องกันสารเคมี
7. ถุงมือยาง (ไม่มีแป้ง)
8. ถุงมือป้องกันกรด
9. กระดาษต้นแบบ (Photomask)
10. เครื่องปรับชั้นมาสค์ (Mask aligner)
11. เครื่องอัลตราโซนิก
12. เครื่องเป่าก๊าซไนโตรเจน
13. เตาอบ
14. เครื่องสปินเนอร์ (Spinner)
15. เครื่องตัดแผ่นซิลิคอน (wafer cutting)
16. เครื่องซั่งน้ำหนัก 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AY220
17. สารเคมี ได้แก่ อะซีโตน กรดไฮโดรฟลูออริก สารละลาย BOE สารละลายผสมกรดฟอสฟอริก สารละลายผสมกรดไฮโดรฟลูออริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ น้ำยาไวแสงชนิดบวกเบอร์ AZ P1350 และน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ Developer)

4. สารละลายผสมกรดไนตริกและไฮโดรฟลูออริก
5. สารละลาย BOE
6. ชิ้นงานที่ใช้กัด
7. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่งยี่ห้อ Shimadzu รุ่น AY220
8. ปากคีบ tweezer
9. หน้ากากป้องกันสารเคมี
10. ถุงมือยาง (ไม่มีแป้ง)
11. บีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร พร้อมฝาปิดชนิด
12. wafer boat
13. แท่งแม่เหล็ก Magnetic Stirrer
14. ภาชนะควบคุมความชื้นที่ใช้สำหรับเก็บชิ้นงาน
15. ไฟฮาโลเจน
16. เครื่องอัลตราโซนิก

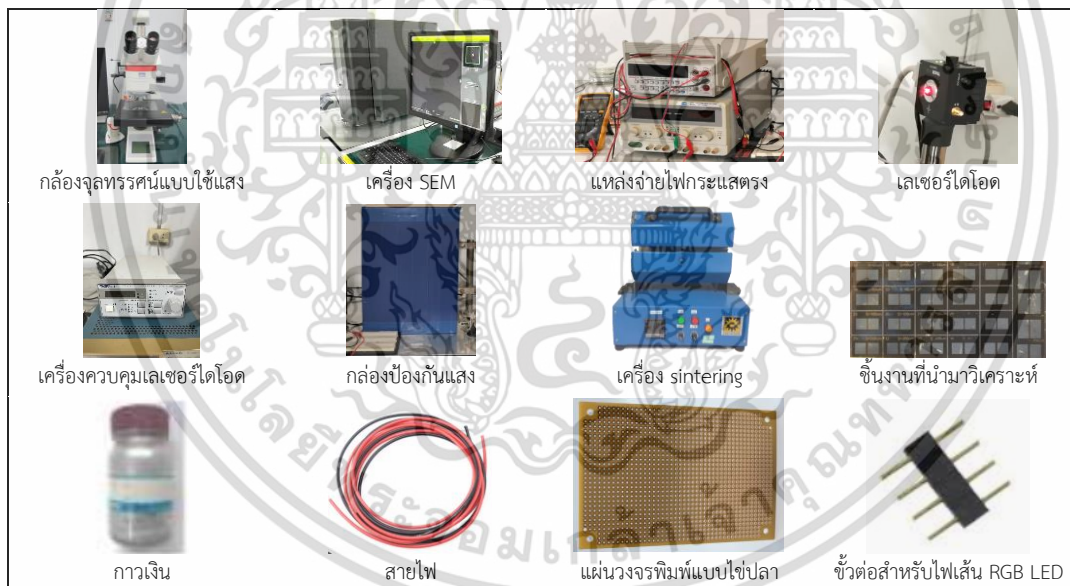


รูปที่ 3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกของตัวตรวจวัดแสง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2.3 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า

1. กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope)
2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)
3. แหล่งจ่ายไฟกระแสตรง
4. เลเซอร์ไดโอด
5. เครื่องควบคุมเลเซอร์ไดโอด
6. กล่องป้องกันแสง
7. เครื่อง sintering รุ่น tube 60-300/12P
8. ชิ้นงานที่นำมาวิเคราะห์
9. กาวเงิน
10. สายไฟ
11. แผ่นวงจรพิมพ์แบบใช้ปลา
12. ขั้วต่อสำหรับไฟเส้น RGB LED



รูปที่ 3.5 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า

3.3 กระบวนการสร้าง

กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM) ชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al ในวิทยานิพนธ์นี้ สร้างขึ้นที่ศูนย์วิจัยอิเล็กทรอนิกส์ (ERC) และศูนย์เทคโนโลยีไมโคร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

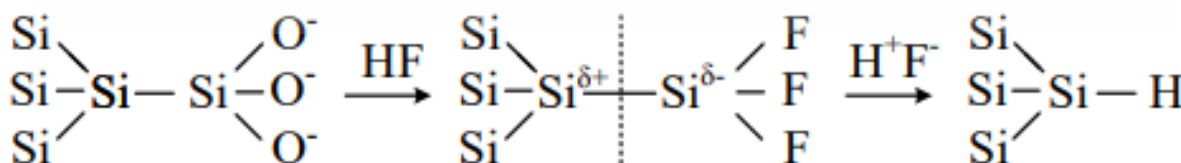
อิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาตัวตรวจวัดแสงที่สร้างบนฐานรองซิลิคอนชนิดพี ระบาย (100) สภาพความต้านทาน 20 - 25 Ω .cm ความหนา 625 μm ระยะห่างระหว่างขั้ว 80 μm ขนาดขั้วไฟฟ้า $1 \times 1 \text{ mm}^2$

ในขั้นตอนของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู ประกอบด้วยกระบวนการสร้าง 8 ขั้นตอน คือ 1) ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน 2) กระบวนการสร้างชั้นโลหะไทเทเนียมและอะลูมิเนียมด้วยวิธีกระบวนการอาร์เอฟสเปคโตรริง 3) กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์โดยเทคนิคไอสารเคมีแบบพลาสมา เพื่อใช้เป็นหน้ากักป้องกันการกัดชั้นอะลูมิเนียม 4) กระบวนการโฟโตลิโธกราฟีเพื่อสร้างลวดลายของตัวตรวจวัดแสง 5) การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด 6) กระบวนการกัดแผ่นผลึกซิลิคอนให้เป็นร่องรูปตัวยูโดยใช้การกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิก 7) กระบวนการกัดซิลิคอนบริเวณพื้นที่รับแสงให้เป็นพอร์สโดยใช้การกัดแบบข้อมลี้ และ 8) กระบวนการขึ้นเตอรริงเพื่อทำให้อรอยสัมผัสระหว่างชั้นไทเทเนียมและซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์โดยแต่ละขั้นตอนนั้นมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 ขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน

การทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนเป็นการทำความสะอาดเพื่อกำจัดฝุ่นละออง เศษโลหะ และคราบน้ำมันที่อยู่บนพื้นผิวแผ่นซิลิคอน ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของกระบวนการสร้างทั้งหมด และเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เพราะถ้าหากชิ้นงานไม่สะอาดอาจทำให้เกิดจุดบกพร่องของชิ้นงานส่งผลต่อขั้นตอนกระบวนการขึ้นลวดลายและประสิทธิภาพของตัวตรวจวัดแสงลดลงได้ โดยมีขั้นตอนการเตรียมแผ่นซิลิคอน ดังต่อไปนี้

- 1) อัลตราโซนิค (Ultrasonic) แผ่นผลึกซิลิคอนในน้ำ ปราศจากไอออน (de-ionization water: DI water) เพื่อกำจัดฝุ่นละออง แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 2) ต้มในกรดปिरันยา ($3\text{H}_2\text{SO}_4 + \text{H}_2\text{O}_2$: piranha) เพื่อขจัดคราบไขมันและสิ่งสกปรกจำพวกโลหะล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน
- 3) จุ่มในกรดไฮโดรฟลูออริก (Hydrofluoric acid: HF) ที่ความเข้มข้น 5% เพื่อกัดชั้นออกไซด์ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ (Native oxide) บนผิวหน้าของแผ่นซิลิคอนจากออกซิเจนในอากาศ ล้างด้วยน้ำ ปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.6 การลอกชั้นออกไซด์ที่เกิดจากธรรมชาติ (native oxide) ด้วยกรดไฮโดรฟลูออริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.2 กระบวนการสร้างชั้นโลหะไทเทเนียมและอะลูมิเนียม

หลังจากผ่านขั้นตอนการทำความสะอาดผิวแผ่นซิลิคอนเรียบร้อยแล้วจากนั้นทำการสร้างชั้นโลหะอะลูมิเนียมและไทเทเนียมด้วยวิธีอาร์เอฟแมกนีตรอนสปัตเตอริง (RF sputtering) ซึ่งเป็นกระบวนการสร้างชั้นโลหะไทเทเนียมและอะลูมิเนียมให้มีความหนาชั้นละ $1\mu\text{m}$ โดยอาศัยหลักการที่อะตอมของผิวหน้าสารเคลือบซึ่งใช้อะลูมิเนียมเป็นเป้าถูกทำให้หลุดออกมาด้วยการชนของอนุภาคพลังงานสูง จากนั้น อะตอมที่หลุดออกจากเป้าสารเคลือบจะวิ่งมาเคลือบบนแผ่นผลึกซิลิคอน โดยใช้แหล่งจ่ายกระแสสลับความถี่สูง (RF power source) เพื่อสร้างพลาสมาของอาร์กอน (Ar^+) แทนระยะห่างระหว่างเป้าและแผ่นเวเฟอร์จะอยู่ค้ำยข้างใกล้กัน เช่น ต่ำกว่า 10 cm และความดันของก๊าซอาร์กอนจะอยู่ในระดับ ประมาณ 0.1 Torr [1] ซึ่งเทคนิคนี้จะทำให้ไอออนของอาร์กอนเคลื่อนที่เข้าหาเป้าได้มากขึ้นทำให้อัตราการเกิดชั้นอะลูมิเนียม (Deposition rate) สูงขึ้น

3.3.3 กระบวนการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์

การปลูกฟิล์มบางด้วยไอสารเคมีแบบพลาสมา (PE-CVD) ใช้อุณหภูมิต่ำประมาณ $< 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นวิธีการปลูกชั้นฟิล์มบางที่อาศัยการแตกตัวของสารเคมีในสถานะก๊าซและเกิดปฏิกิริยาเคมีกลายเป็นสารใหม่ตกเคลือบบนแผ่นเวเฟอร์การปลูกฟิล์มวิธีนี้ใช้หลักการพลาสมาช่วยเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีของก๊าซจึงทำให้สามารถปลูกชั้นฟิล์มอุณหภูมิต่ำ [53] ในการสร้างชั้นฟิล์มซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)

3.3.4 กระบวนการโฟโตลิโธกราฟี

กระบวนการนี้เป็นการสร้างลวดลายขั้วโลหะอะลูมิเนียมด้วยกระจกต้นแบบ โดยแสงที่ฉายผ่านกระจกต้นแบบนี้จะสามารถทะลุผ่านไปได้เฉพาะบริเวณที่ไม่มีลวดลาย ส่วนบริเวณที่มีลวดลายทึบ แสงจะไม่สามารถผ่านได้ ดังนั้นชั้นของน้ำยาไวแสงจึงมีบางบริเวณที่ไม่ถูกแสงและบางบริเวณที่ถูกแสง เมื่อนำไปล้างน้ำยาล้างฟิล์ม (Developer) บางส่วนของชั้นน้ำยาไวแสงจะถูกละลายออกไป ส่วนชั้นของน้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่บนผิวซิลิคอนไดออกไซด์จะทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์บริเวณนี้ถูกกัดออกไป เมื่อลอกชั้นของน้ำยาไวแสงออกก็จะปรากฏลวดลายของชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ขึ้นตามลวดลายที่เราออกแบบไว้ โดยกระบวนการทั้งหมดมี ขั้นตอนดังนี้

- 1) อบแผ่นเพื่อไล่ความชื้นออกที่อุณหภูมิ $90\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที
- 2) เคลือบน้ำยาไวแสงชนิดบวก AZ P1350 ด้วยเครื่องสปินเนอร์
- 3) อบแผ่นครั้งแรก (Pre bake) ที่อุณหภูมิ $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 30 นาที เพื่อทำให้น้ำยาไวแสงแห้ง
- 4) ฉายแสงย่านอัลตราไวโอผ่านกระจกต้นแบบด้วยเครื่องปรับซ็อนมาร์ก (Mask aligner) ใช้เวลา ในการฉายแสง 20 วินาที
- 5) ขึ้นลวดลายน้ำยาไวแสงโดยจุ่มลงในน้ำยาขึ้นลวดลาย (AZ developer) ล้างในน้ำปราศจาก ประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6) อบครั้งที่สอง (Post bake) ที่อุณหภูมิ 90 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้น้ำยาไวแสงที่เหลืออยู่แห้ง

7) กัดชั้นซิลิคอนออกไซด์ส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลาย BOE แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

8) กัดชั้นอะลูมิเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลายผสมกรดฟอสฟอริก แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

9) กัดชั้นไทเทเนียมส่วนที่ไม่ต้องการออก โดยใช้สารละลายผสมกรดฟอสฟอริก แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

10) ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออกด้วยอะซิโตน แล้วล้างในน้ำปราศจากประจุ (DI-water) แล้วเป่าแห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน

ในรูปที่ 3.7 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพอลิซิลิโคนบนร่องรูปตัวยู ชนิด Al/Ti/p-Si/Ti/Al



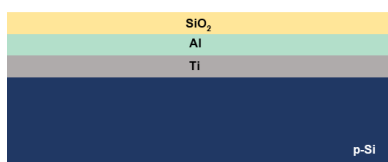
(ก) ทำความสะอาดแผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ (100) ความหนา 625 μm



(ข) สร้างชั้นไทเทเนียมหนาประมาณ 1 μm ด้วย เทคนิค RF-sputtering

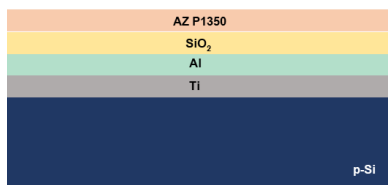


(ค) สร้างชั้นอะลูมิเนียมหนาประมาณ 1 μm ด้วย เทคนิค RF-sputtering

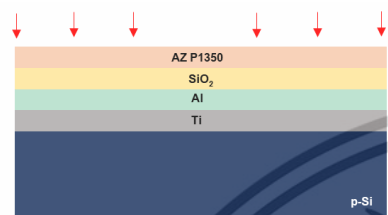


(ง) สร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์หนาประมาณ 1.5 μm ด้วยกระบวนการ PE-CVD

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



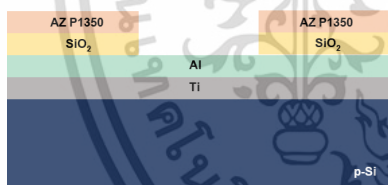
(จ) เคลื่อนย้ายไอแสงชนิดบวกเบอร์AZ P1350



(ฉ) ฉายแสง UV ผ่านกระจกต้นแบบ (photomask)



(ช) ขี้นลวดลายด้วยน้ำยา AZ Developer

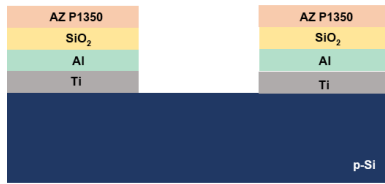


(ซ) กัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ออกด้วยสารละลาย BOE



(ณ) กัดชั้นอะลูมิเนียมออกด้วยน้ำยาผสมกรดฟอสฟอริก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ณ) กัดชั้นไทเทเนียมออกด้วยน้ำยาที่มีส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์



(ญ) ทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ผสมกรดซัลฟิวริก



(ฎ) ทำการกัดพื้นผิวซิลิคอนด้วยสารละลายผสมกรดไนตริกและไฮโดรฟลูออริก



(ฐ) ลอกน้ำยาไวแสงที่เหลือออกด้วยสาร Acetone



(ฑ) ลอกชั้นออกไซด์ที่เหลือออกด้วยสารละลาย BOE

รูปที่ 3.7 แสดงภาพตัดขวางของกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูป
ตัวยูนิต Al/Ti/p-Si/Ti/Al

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.5 การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการกัด

การเตรียมสารเคมีและสารละลายที่ใช้ในการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู มีปริมาณอัตราส่วนดังต่อไปนี้

1. การเตรียมสารเคมีกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) จะต้องใช้สารละลายเคมีที่มีส่วนผสมของกรดกัดแก้วเป็นหลัก ทำการสกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ตรงที่ต้องการเปิดตลาดลายออก สารละลายที่ใช้ในการกัด เรียกว่า สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer solution) ทำได้โดยการเตรียม $\text{HF} : \text{NH}_4\text{F}$ ในอัตราส่วน 1 : 5 จะมีอัตราการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ประมาณ $1000 \text{ \AA}/\text{min}$ โดยกัดเป็นเวลา 15 นาที ณ อุณหภูมิห้อง
2. การเตรียมสารเคมีกัดชั้นอะลูมิเนียม สารละลายที่ใช้กัดชั้นอะลูมิเนียม (Al etching) จะเป็นส่วนผสมของกรดฟอสฟอริกเป็น โดยการเตรียม $\text{H}_3\text{PO}_4 : \text{HNO}_3 : \text{CH}_3\text{COOH} : \text{DI H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 80 : 5 : 5 : 10 ใช้อุณหภูมิในการกัด $80 \text{ }^\circ\text{C}$ เป็นเวลาประมาณ 1-2 นาที
3. การเตรียมสารเคมีกัดชั้นไทเทเนียม สารละลายที่ใช้กัดชั้นไทเทเนียม (Ti etching) จะเป็นส่วนผสมของกรดไฮโดรฟลูออริกและไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ โดยการเตรียม $\text{DI H}_2\text{O} : \text{HF} : \text{H}_2\text{O}_2$ ในอัตราส่วน 20 : 1 : 1 ใช้อุณหภูมิห้องในการกัดเป็นเวลาประมาณ 1 นาที
4. การเตรียมสารละลายในการกัดชั้นซิลิคอน เพื่อใช้ในการสร้างพีระมิตภายในร่องรูปตัวยู เตรียมได้จากการคำนวณการผสมของสารละลาย TMAH และกรดซิลิซิก การเจือจางสารละลายเป็นการทำให้สารละลายมีความเข้มข้นลดลงตามที่ต้องการ โดย จะต้องมีการเติมตัวทาลละลายลงในสารละลายนั้น ซึ่งสามารถคำนวณความเข้มข้นของ สารละลายได้ดังนี้

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

เมื่อ $C_1 =$ ความเข้มข้นเริ่มต้น

$V_1 =$ ปริมาตรเริ่มต้น

$C_2 =$ ความเข้มข้นสุดท้าย

$V_2 =$ ปริมาตรสุดท้าย

กรณี สารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt%

$$\text{จาก } C_1V_1 = C_2V_2$$

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

$$\text{จะได้ } V_1 = 30 \text{ ml}$$

ปริมาตรเริ่มต้นของสารละลาย TMAH จะได้เท่ากับ 30 ml

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าต้องการใช้สารละลาย TMAH 5 wt% จะต้องเติมน้ำของปริมาตรสุดท้าย 150 ml เท่ากับ
 $150 \text{ ml} - 30 \text{ ml} = 120 \text{ ml}$

ดังนั้น ต้องเปิดสารละลาย TMAH 25 wt% มา 30 ml แล้วเติมน้ำ ให้ปริมาตร 120 ml

กรณี กรดซัลฟิวริกปริมาณ 34 g/l

จาก $C_1V_1 = C_2V_2$

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

$$\text{จะได้ } V_1 = 5.1 \text{ g/150 ml}$$

ดังนั้น เติมกรดซัลฟิวริก จำนวน 5.1 กรัมต่อปริมาตรสารละลาย TMAH 150 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.8 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% และกรดซัลฟิวริก

5. การเตรียมสารละลายในการกัดชั้นซิลิคอน เพื่อสร้างพอร์สที่ระมัดบร่งรูปด้วยสารละลายผสมกรดไนตริกและไฮโดรฟลูออริก ทำการเตรียมโดยใช้ $\text{HF} : \text{HNO}_3 : \text{DI H}_2\text{O}$ ในอัตราส่วน 1 : 3 : 5 ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลาประมาณ 3 นาที และใช้แสงในการกระตุ้นการกัด หรือเรียกว่าการกัดแบบย้อมสี



รูปที่ 3.9 อุปกรณ์ที่ใช้ในการกัดชั้นซิลิคอนด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.6 กระบวนการกัด

กระบวนการกัด (Etching process) จะใช้แผ่นซิลิคอนชนิดเอ็น ระบาย (100) ความหนา 625 μm มีขั้วโลหะเป็นอะลูมิเนียมและไทเทเนียม โดยลักษณะการกัดเป็นแบบแอนไอโซทรอปิก สารละลายที่ใช้กัด คือ สารละลายเตตระเมทิลแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (TMAH) ผสมด้วยกรดซิลิซิก (Silicic acid) เพื่อใช้ในการลดอัตราการกัดของอะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ และสร้างพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู ระหว่างขั้วอะลูมิเนียม หลังจากนั้น โดยมีเงื่อนไขและขั้นตอนการกัด ดังต่อไปนี้

1. กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt%
2. เติมกรดซิลิซิกลงในสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% จำนวน 34 g/l เพื่อลดอัตราการกัด อะลูมิเนียมและซิลิคอนไดออกไซด์ และสร้างลักษณะ พื้นผิวซิลิคอนให้เป็นพีระมิดภายในร่องรูปตัวยู
3. ต้มสารละลายที่ใช้กัดที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ใช้เครื่องกวนสารละลายหมุนด้วย แท่งแม่เหล็ก ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เมื่ออุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำชิ้นงานที่เตรียมไว้ทำการกัด
4. เมื่อทำการกัดชิ้นงานเรียบร้อยแล้วให้ทำการล้างด้วยน้ำปราศจากประจุ แล้วเป่าชิ้นงาน ให้แห้งด้วยก๊าซไนโตรเจน



รูปที่ 3.10 ภาพถ่ายชิ้นงานที่ผ่านการกัดด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ (ก) ภาพถ่ายด้วย SEM (ข) ภาพถ่ายด้วยกล้องไมโครสโคป

3.3.7 กระบวนการซินเตอร์ริง

เมื่อทำการกัดชิ้นงานแล้วจากนั้นชิ้นงานเข้าสู่กระบวนการซินเตอร์ริง (Sintering process) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ทำให้รอยสัมผัสระหว่างส่วนของโลหะอะลูมิเนียมกับเนื้อซิลิคอนเป็นรอยสัมผัสที่สมบูรณ์ [8] โดยปกติแล้วจะนำแผ่นซิลิคอนไปไว้ในบรรยากาศของไนโตรเจนที่มีอัตราการไหลของก๊าซ 0.7 ลิตร/นาที่ ที่อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250 และ 300 $^{\circ}\text{C}$ องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที เพื่อหาอุณหภูมิที่ทำให้รอยสัมผัสระหว่างไทเทเนียมและซิลิคอนมีความสมบูรณ์ ซึ่งจะส่งผลให้มีกระแสมีดต่ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชิ้นงานที่ผ่านกระบวนการสร้างทั้งหมดจากนั้นจะนำชิ้นงานไปตัดแยกออกจากกัน แล้วนำมา เชื่อมต่อสายด้วยกาวเงินมีลักษณะ ดังรูปที่ 3.11 เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางไฟฟ้าและทาง แสงต่อไป



รูปที่ 3.11 ตัวตรวจวัดแสงหลังการขึ้นเตอรังและนำมาเชื่อมต่อสายด้วยกาวเงิน

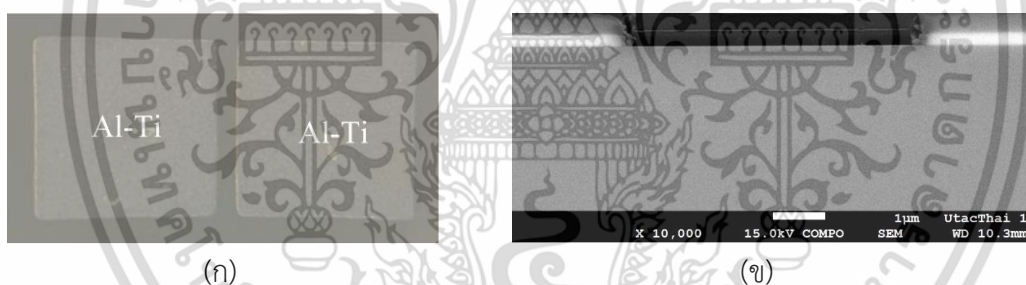
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 การศึกษาอุณหภูมิในกระบวนการซินเทอริงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

วัตถุประสงค์ในหัวข้อนี้เพื่อกำหนดอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการซินเทอริง (Sintering) สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al โดยลักษณะของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบแสดงดังรูปที่ 4.1 ซึ่งจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/n-Si/Al พบว่าอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการซินเทอริงเพื่อให้รอยสัมผัสระหว่างอลูมิเนียมและซิลิคอนมีความสมบูรณ์ เท่ากับ 500 °C ในบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจนเป็นระยะเวลา 15 นาที และความสูงกำแพงศักย์ (ϕ) มีค่าประมาณ 0.72 eV [7] ดังนั้นการทดลองในหัวข้อนี้จึงอ้างอิงเวลา 15 นาทีในการนำตัวตรวจวัดแสงเข้าสู่กระบวนการซินเทอริง และมีการปรับอุณหภูมิตั้งแต่ 100, 150, 200, 250 และ 300 °C



รูปที่ 4.1 ลักษณะตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ

(ก) ภาพถ่ายมุมบน

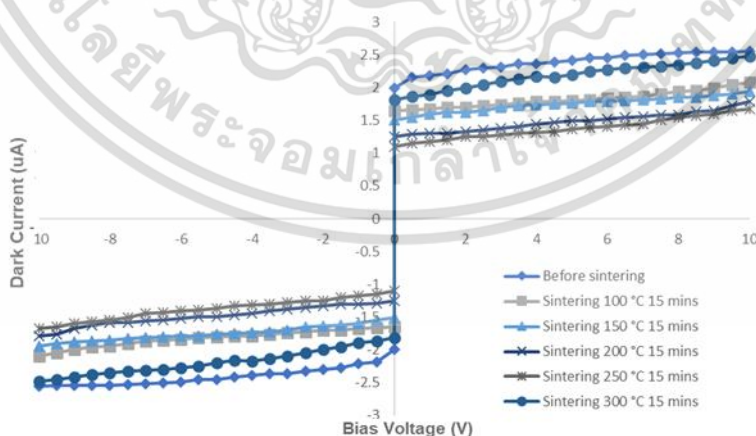
(ข) ภาพตัดขวาง

จากรูปที่ 4.2 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของตรวจวัดแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ ซึ่งกระแสที่เกิดขึ้นขณะที่ไม่ได้รับแสงหรือกระแสมืด (Dark current) ของตัวตรวจวัดแสงหลังจากซินเทอริงที่อุณหภูมิ 250 °C เท่ากับ 1.68 μ A ซึ่งมีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสงก่อนการซินเทอริง (2.56 μ A) 34% หรือประมาณ 1.52 เท่า โดยกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงลดลงเมื่อมีการซินเทอริงที่อุณหภูมิ 100 °C, 150 °C, 200 °C และต่ำสุดที่อุณหภูมิ 250 °C ซึ่งแปรผกผันกับความสูงกำแพงศักย์ที่แสดงดังตารางที่ 4.1 โดย

ความสูงกำแพงศักย์ของตัวตรวจวัดแสงหลังการซินเตอร์ริง 250 °C มีค่าเท่ากับ 0.73 eV ซึ่งสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงก่อนการซินเตอร์ริงที่มีค่าเท่ากับ 0.72 eV โดยการแปรผกผันระหว่างกระแสมืด (I_0) และความสูงกำแพงศักย์ (ϕ_{b0}) นี้สัมพันธ์กับสมการที่ 4.1 [54] ในส่วนของกระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงหลังจากการซินเตอร์ริง 300°C มีค่าเท่ากับ 2.48 μA ซึ่งเพิ่มขึ้นจากตัวตรวจวัดแสงหลังจากการซินเตอร์ริง 250°C (1.68 μA) มีผลมาจากความสูงกำแพงศักย์ของตัวตรวจวัดแสงหลังจากการซินเตอร์ริง 300°C ที่ต่ำกว่า ดังแสดงในตารางที่ 4 และเกี่ยวข้องกับการเกิดไทเทเนียมไดซิลไซด์ (TiSi₂) บริเวณรอยสัมผัส Ti และ Si [54] โดยการเกิดไทเทเนียมไดซิลไซด์จะทำให้รอยสัมผัสที่เกิดขึ้นเป็นรอยสัมผัสแบบโอห์มมิก

$$I_0 = AA^*T^2 \exp\left(\frac{-q\phi_{b0}}{kT}\right) \quad (4.1)$$

- โดยที่
- I_0 คือ กระแสมืด (μA)
 - A คือ พื้นที่สัมผัสระหว่างโลหะและสารกึ่งตัวนำ (cm^2)
 - A^* คือ ค่าคงที่รีชาร์ดสัน ($\text{A}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{K}^{-2}$)
 - q คือ ประจุไฟฟ้าอิเล็กตรอน (C)
 - ϕ_{b0} คือ ความสูงกำแพงศักย์ช็อคตีกัย (eV)
 - T คือ อุณหภูมิ (K)
 - k คือ ค่าคงที่โบสตันน์ (eV/K)



รูปที่ 4.2 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

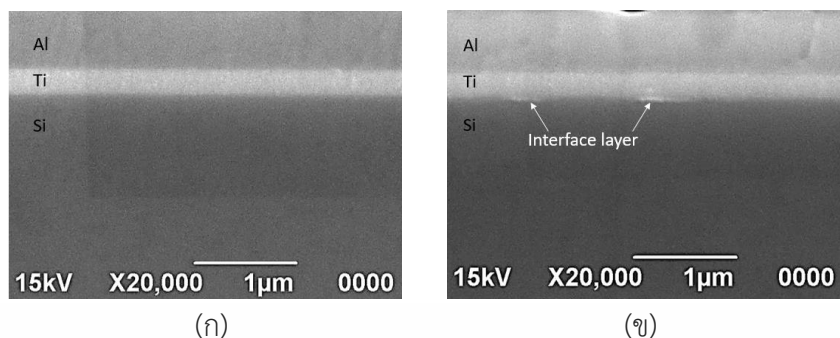
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากความสัมพันธ์ของกระแสและความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่า ถ้ากำแพงศักย์ขอตด์ก็ยมีค่าสูงจะส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากด้านโลหะ (Ti) ข้ามไปสู่สารกึ่งตัวนำ (Si) ได้ ในปริมาณน้อย เนื่องจากอิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานสูงในการข้ามกำแพงศักย์จากด้านโลหะไปสู่สารกึ่งตัวนำ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังที่กล่าวมานี้ คือ ปัจจัยที่ส่งผลให้กระแสเกิดขึ้น สำหรับการเพิ่มความสูงของกำแพงศักย์นั้นมีความสัมพันธ์กับความร้อนที่ให้กับตัวตรวจวัดแสง

จากการพิจารณารูปที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าบริเวณหัวของตัวตรวจวัดแสงก่อนการซินเตอร์ริงไม่เกิดขึ้น อินเตอร์เฟซ (Interface layer) หรือยังคงมีผลของสถานะผิวที่เกิดจากการไม่เข้ากันของโครงสร้างผลึก (Lattice mismatch) ระหว่างรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ จึงเป็นผลทำให้เกิดกระแสรั่วไหลสูงกว่านั่นเอง [7] แต่ชั้นอินเตอร์เฟซบริเวณรอยสัมผัสเกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงหลังการซินเตอร์ริง 250 °C ซึ่งเป็นผลมาจาก การให้ความร้อนที่เหมาะสมกับตัวตรวจวัดแสง และเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความสูงกำแพงศักย์ของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 4.1) นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดของทั้ง 6 เงื่อนไขตามตารางที่ 4.1 พบว่าตัวตรวจวัดแสงหลังจากซินเตอร์ริงที่อุณหภูมิ 250 °C มีค่าสูงที่สุด เท่ากับ 43.40 ดังนั้น อุณหภูมิ 250 °C จึงเป็นอุณหภูมิในการซินเตอร์ริงที่เหมาะสมสำหรับตัวตรวจวัดแสง โครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al สำหรับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.1 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ ที่แรงดันไบอัส 10 โวลต์ (V)

เงื่อนไข	กระแสมืด (μA)	กระแสแสง (μA)	อัตราส่วนระหว่างกระแส แสงต่อกระแสมืด	ความสูงกำแพงศักย์ (eV)
ก่อนซินเตอร์ริง	2.56	79.84	31.19	0.72
ซินเตอร์ริงที่ 100 °C	2.09	67.71	34.88	0.72
ซินเตอร์ริงที่ 150 °C	1.94	69.26	35.70	0.72
ซินเตอร์ริงที่ 200 °C	1.79	70.51	39.39	0.73
ซินเตอร์ริงที่ 250 °C	1.68	72.92	43.40	0.73
ซินเตอร์ริงที่ 300 °C	2.48	60.42	24.36	0.72



รูปที่ 4.3 ภาพตัดขวางบริเวณข้อต่อของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al

(ก) ก่อนกระบวนการซินเตอร์ริง

(ข) หลังจากการซินเตอร์ริง 250°C

4.2 การศึกษาการสร้างพอร์สด้วยวิธีการกัดแบบย้อมสีบนผิวซิลิคอน

การสร้างชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีการกัดแบบย้อมสีทำได้โดยการจุ่มแผ่นผลึกซิลิคอนลงในสารละลายกรดไฮโดรฟลูออริก (HF) กรดไนตริก (HNO_3) และน้ำบริสุทธิ์ในอัตราส่วน 1:3:5 และนอกจากนี้ยังสามารถกระตุ้นการเกิดพอร์สได้โดยการใช้แสง หรือการใช้คลื่นเสียงความถี่สูงในขณะที่ทำการกัดแบบย้อมสี เป็นต้น ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป

4.2.1 การศึกษาผลของแสงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการใช้แสงในการกระตุ้นการเกิดพอร์ส โดยทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนชนิดพีระนาบ (100) ค่าสภาพความต้านทาน 20-25 $\Omega\text{-cm}$ ในสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ และฉายแสงจากแสงห้องปกติที่ความเข้มชั้น 3,000 ลักซ์ แสงจากหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มชั้น 10,000 ลักซ์ และ 30,000 ลักซ์ จากการทดลอง พบว่า เมื่อจุ่มแผ่นซิลิคอนลงในสารละลายจะไม่มีปฏิกิริยาใดๆเกิดขึ้น เรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงเวลาการเหนี่ยวนำ (Induction time) หลังจากนั้นจะมีการเกิดฟองก๊าซบริเวณแผ่นซิลิคอน และสีของแผ่นซิลิคอนจะเริ่มเปลี่ยน ซึ่งเรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงเวลาการกัด (Etching time) และในที่สุดการเปลี่ยนสีจะเริ่มลดลงและหยุดการเปลี่ยนสีไปมากที่สุด เรียกช่วงเวลานี้ว่า ช่วงเวลาอิ่มตัว (Saturation time)

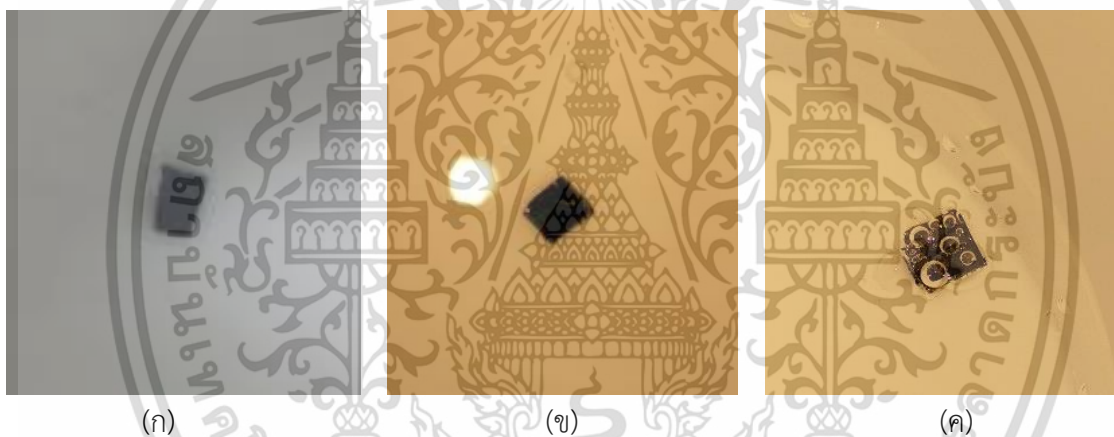
จากตารางที่ 4.2 แสดงให้เห็นว่า เวลาเริ่มเกิดพอร์สของแผ่นซิลิคอนที่แสงห้องปกติ 3,000 ลักซ์ เท่ากับ 7 นาที เวลาเริ่มเกิดพอร์สของแผ่นซิลิคอนที่ฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มชั้น 10,000 ลักซ์ ใช้เวลา 5 นาที และเวลาเริ่มเกิดพอร์สของแผ่นซิลิคอนที่ฉายแสงด้วยหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มชั้น 30,000 ลักซ์ ใช้เวลา 2 นาที โดยขณะการกัดที่เวลา 2 นาที ดังที่แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่า มีฟองก๊าซหรือการเกิดพอร์สขึ้นบนแผ่นซิลิคอนที่ฉายแสงด้วยความเข้มชั้น 30,000 ลักซ์ แต่ฟองก๊าซบนแผ่นซิลิคอนที่ฉายแสงด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความเข้มข้น 3,000 และ 10,000 ลักซ์ มีขนาดเล็กและไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า ซึ่งจากการทดลองนี้ การใช้ความเข้มข้นแสง 30,000 ลักซ์ ใช้เวลาในการเริ่มเกิดพอร์สน้อยที่สุด และสามารถช่วยกระตุ้นการเกิดพอร์สซิลิโคนให้เร็วขึ้น 3.5 เท่า เมื่อเทียบกับการฉายแสงด้วยความเข้มข้นแสงห้องปกติ 3,000 ลักซ์ เนื่องจากแสงหรือโฟตอนเมื่อถูกดูดกลืนด้วยอะตอมสารกึ่งตัวนำจะทำให้เกิดคู่อิเล็กตรอน-โฮล และโฮลที่เกิดขึ้นจึงเป็นตัวกระตุ้นปฏิกิริยาเคมีได้ดีขึ้น

ตารางที่ 4.2 เวลาในการเกิดพอร์สที่ความเข้มแสง 3,000, 10,000 และ 30,000 ลักซ์

ความเข้มแสง (ลักซ์)	แสงห้องปกติ 3,000 ลักซ์	หลอดฮาโลเจน 10,000 ลักซ์	หลอดฮาโลเจน 30,000 ลักซ์
เวลาเริ่มเกิดพอร์ส (นาที)	7	5	2



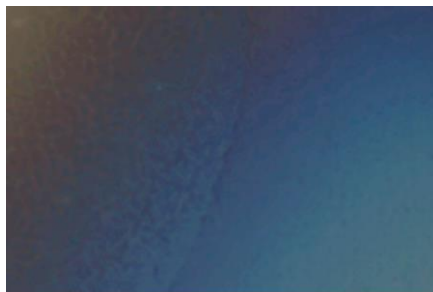
รูปที่ 4.4 ลักษณะแผ่นซิลิโคนขณะกักแบบย้อมสีที่เวลา 2 นาที

(ก) แสงห้องปกติ 3,000 ลักซ์

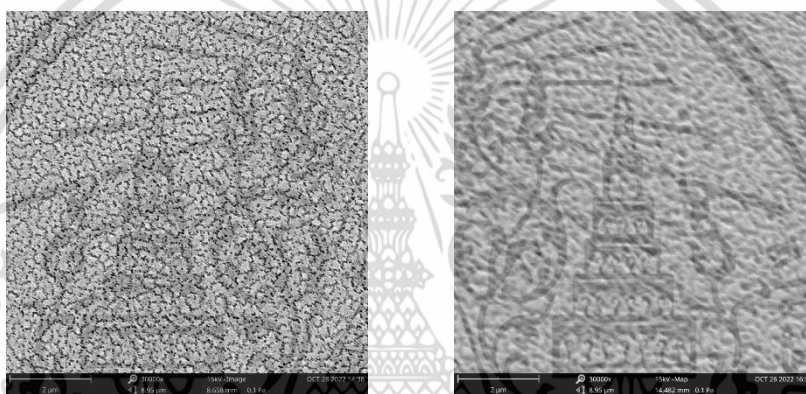
(ข) แสงจากหลอดฮาโลเจน 10,000 ลักซ์

(ค) แสงจากหลอดฮาโลเจน 30,000 ลักซ์

ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิโคนจากการกักแบบย้อมสีด้วยความเข้มแสง 30,000 ลักซ์ โดยใช้กล้องไมโครสโคปที่แสดงดังรูปที่ 4.5 จะมีสีต่างๆเกิดขึ้นบนผิวหน้าแผ่นซิลิโคน และจากการใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดหรือ SEM ในการถ่ายภาพลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิโคนจากด้านบนและเอียง 45 องศาที่แสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า มีรูพรุนกระจายอยู่ทั่วผิวหน้าแผ่นซิลิโคน ซึ่งเรียกลักษณะนี้ว่า พอร์สซิลิโคน



รูปที่ 4.5 ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดแบบย้อมสีที่ฉายด้วยความเข้มแสง 30,000 ลักซ์ โดยใช้กล้องไมโครสโคป



(ก)

(ข)

รูปที่ 4.6 ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดแบบย้อมสีที่ฉายด้วยความเข้มแสง 30,000 ลักซ์ โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

(ก) ภาพถ่ายจากด้านบนของชั้นพอร์สซิลิคอน

(ข) ภาพถ่ายจากด้านมุมเอียง 45 องศา

4.2.2 การศึกษาผลของคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน

การทดลองในหัวข้อนี้เป็นการใช้คลื่นความถี่สูงในการกระตุ้นการเกิดพอร์ส โดยทดลองจุ่มแผ่นซิลิคอนชนิดพี ระบาย (100) ค่าสภาพความต้านทาน 20-25 Ω -cm ในสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ที่มีการกระตุ้นด้วยระบบคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) ด้วยอุปกรณ์ทำความสะอาดอุลตราโซนิค จากการเปรียบเทียบเวลาในการเกิดพอร์สที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่สูง และมีการกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่สูงในตารางที่ 4.3 พบว่า เวลาเริ่มเกิดพอร์สเมื่อมีการกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่สูงใช้เวลาถึง 10 นาที ซึ่งใช้เวลานานกว่าแบบไม่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นความถี่สูง โดยลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดแบบย้อมสีที่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงแสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า การเปลี่ยนสีของผิวหน้าชั้นพอร์สซิลิคอนแบบมีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูงเกิดขึ้นบางจุดและมีสีอ่อนกว่าผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนแบบไม่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง ซึ่งมีผลมาจากคลื่นเสียงความถี่สูงจะรบกวนฟองก๊าซขณะเกิดปฏิกิริยาเคมี ทำให้ฟองก๊าซมีขนาดเล็กและเกิดขึ้นในปริมาณน้อย

ตารางที่ 4.3 เวลาในการเกิดพอร์สที่ไม่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง และมีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

เงื่อนไข	ไม่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง	การกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง
เวลาเริ่มเกิดพอร์ส (นาท)	7	10



(ก)

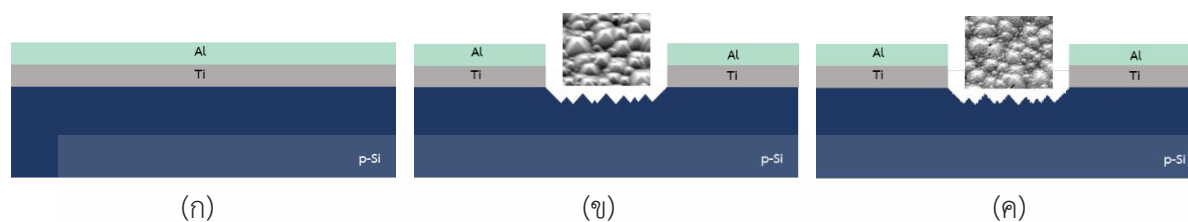
(ข)

รูปที่ 4.7 ลักษณะผิวหน้าของชั้นพอร์สซิลิคอนจากการกัดแบบย้อมสี โดยใช้กล้องไมโครสโคป
 (ก) ไม่มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง
 (ข) มีการกระตุ้นด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง

4.2.3 ผลของสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ที่มีต่อชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียม

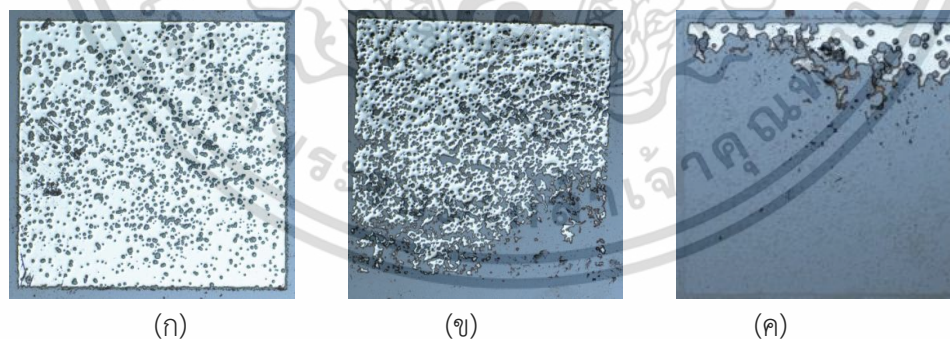
กระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู เริ่มจากกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี เพื่อสร้างลวดลายของชั้นอะลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอนชนิดพี โดยโครงสร้างของแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่นำมาสร้างตัวตรวจวัดแสงแสดงดังรูปที่ 4.8 (ก) จากนั้นนำแผ่นซิลิคอนเข้าสู่กระบวนการกัดบริเวณพื้นที่รับแสงระหว่างขั้วโลหะ (Al/Ti) โดยเริ่มจากกัดชั้นอะลูมิเนียม(Al) ไทเทเนียม (Ti) และสร้างพีระมิตบนร่องรูปตัวยูด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เติมด้วยกรดซัลฟิวริกปริมาณ 34 g/L โดยมีน้ำยาไวแสงเป็นชั้นป้องกันการกัดขั้วโลหะ(Al/Ti) แสดงดังภาพจำลองโครงสร้างในรูป 4.8 (ข) และขั้นตอน

สุดท้ายเป็นการกัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ เพื่อสร้างพอร์สบนพีระมิด โดยภาพจำลองตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al ทั้งแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู แสดงดังรูปที่ 4.8 (ค)



รูปที่ 4.8 ภาพจำลองโครงสร้างแผ่นซิลิคอนและตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al
 (ก) แผ่นซิลิคอนชนิดพีที่เคลือบด้วยไทเทเนียมและอะลูมิเนียม (ก่อนกระบวนการกัด)
 (ข) แบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยูที่กัดด้วย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิก
 (ค) แบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยูที่กัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$

จากรูปที่ 4.9 ซึ่งเป็นลักษณะของชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ถูกกัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ พบว่าสารละลายที่ใช้ในการกัดแบบย้อมสีมีผลต่อการกัดชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียม โดยเริ่มกัดชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่เวลา 20 วินาที และเริ่มกัดมากขึ้นที่เวลา 40 และ 60 วินาที ดังนั้นจึงมีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ขึ้นมาบนชั้นอะลูมิเนียม เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการกัดชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียม ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป



รูปที่ 4.9 ลักษณะของชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่ถูกกัดด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$
 (ก) 20 วินาที
 (ข) 40 วินาที
 (ค) 60 วินาที

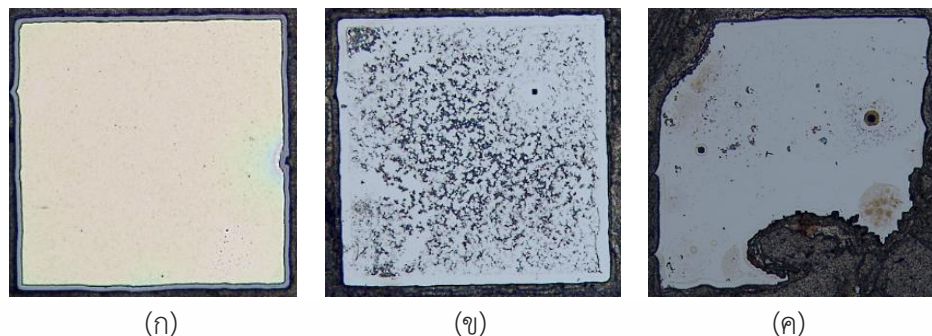
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.4 ผลของสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ที่มีต่อชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2)

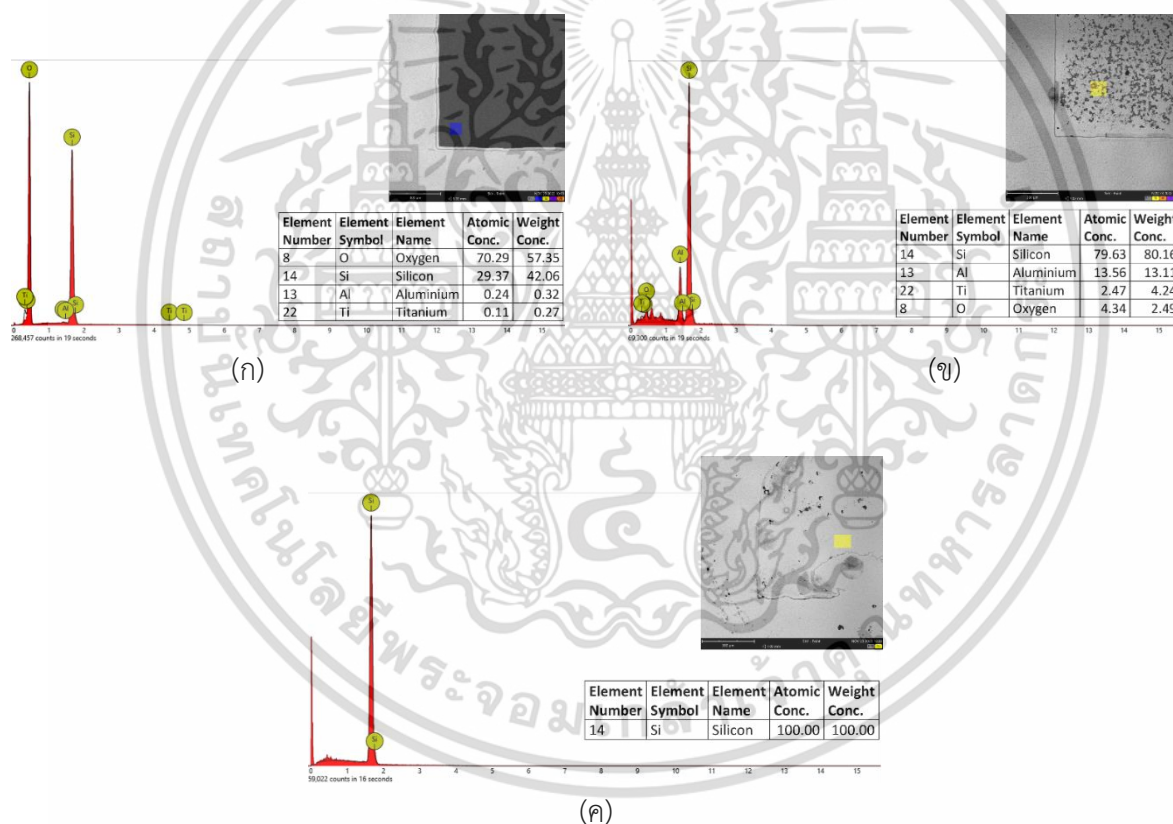
จากหัวข้อ 4.2.3 พบว่า สารละลายที่ใช้ในการกัดแบบย้อมสีมีผลต่อการกัดขั้วโลหะที่ประกอบไปด้วย ชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียม ดังนั้น ในหัวข้อนี้จึงนำแผ่นซิลิคอนที่มีการเพิ่มชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (รูปที่ 4.10) เข้าสู่กระบวนการกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี และกระบวนการกัด โดยอ้างอิงวิธีการจากหัวข้อ 4.2.3 เพื่อศึกษาผลกระทบของสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ที่ใช้ในการกัดแบบย้อมสีที่มีต่อชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ ซึ่งใช้เวลาในการกัดแบบย้อมสี 2, 3 และ 4 นาที จากนั้นนำขั้วของตัวตรวจวัดแสงไปวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิค สเปกโตรสโคปีแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : EDX) โดยลักษณะขั้วของตัวตรวจวัดแสงที่กัดด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ด้วยเวลา 2 นาที (รูปที่ 4.11 (ก)) มีร่องรอยการถูกกัดน้อยกว่าขั้วที่ถูกกัดด้วยเวลา 3 (รูปที่ 4.11 (ข)) และ 4 นาที (รูปที่ 4.11 (ค)) ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ธาตุที่แสดงในรูปที่ 4.12 พบว่า บริเวณขั้วของตัวตรวจวัดแสงที่กัดแบบย้อมสีด้วยเวลา 2 นาที ประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก (% Weight concentration) ของธาตุหลัก คือ ออกซิเจน (O) ซิลิคอน (Si) เท่ากับ 57.35 % และ 42.06% ในส่วนของอะลูมิเนียม (Al) และไทเทเนียม (Ti) มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนักที่ต่ำ (0.32% และ 0.27 %) แสดงให้เห็นว่าชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ยังอยู่บนชั้นอะลูมิเนียม และไทเทเนียม สำหรับผลการวิเคราะห์ธาตุบริเวณขั้วของตัวตรวจวัดแสงที่กัดแบบย้อมสีด้วยเวลา 3 นาที พบว่า เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนักของธาตุหลัก คือ (Si) เท่ากับ 80.16% ตามมาด้วยอะลูมิเนียม (Al) 13.11% และไทเทเนียม (Ti) 4.24% ในขณะที่ออกซิเจนมีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนักเพียง 2.49% แสดงให้เห็นว่าชั้นออกไซด์เริ่มถูกกัดที่เวลา 3 นาที และจะถูกกัดออกไปพร้อมกับชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่เวลา 4 นาที ดังแสดงให้เห็นจากรูปที่ 4.11 (ค) และรูปที่ 4.12 (ค) ซึ่งผลการวิเคราะห์ธาตุบริเวณขั้วของตัวตรวจวัดแสงที่กัดแบบย้อมสีด้วยเวลา 4 นาที แสดงเฉพาะธาตุซิลิคอน (Si) 100% ดังนั้น การกัดชั้นซิลิคอนแบบย้อมสีในงานวิจัยนี้จะใช้เวลา 2 นาที เพื่อป้องกันการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียม และไทเทเนียม



รูปที่ 4.10 ภาพจำลองโครงสร้างแผ่นซิลิคอนชนิดพีที่เคลือบด้วยไทเทเนียม อะลูมิเนียม ซิลิคอนไดออกไซด์



รูปที่ 4.11 ลักษณะผิวของตัวตรวจวัดแสงที่เกิดด้วยสารละลาย HF + 3HNO₃ + 5H₂O (ก) 2 นาที (ข) 3 นาที (ค) 4 นาที

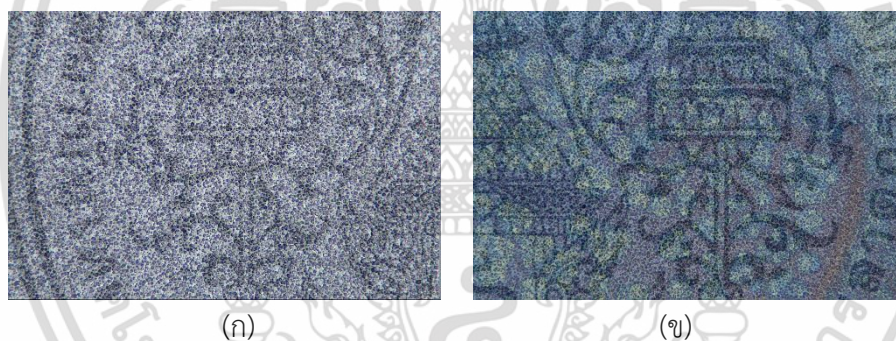


รูปที่ 4.12 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวบริเวณขีดตัวตรวจวัดแสง หลังการกัดแบบย้อมสี (ก) 2 นาที (ข) 3 นาที (ค) 4 นาที

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3 การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจแสงแบบพีระมิดและพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู

ในหัวข้อนี้เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซัลฟูริก และแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยูที่กัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ซึ่งในการวิเคราะห์ลักษณะกายภาพของผิวซิลิคอนเบื้องต้นสามารถทำได้โดยใช้กล้องไมโครสโคป ดังแสดงในรูปที่ 4.13 (ก) ที่แสดงให้เห็นถึงความขรุขระบนพื้นผิวซิลิคอนหลังจากกัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซัลฟูริก และรูปที่ 4.13 (ข) มีทั้งความขรุขระและสีส้มของพื้นผิวซิลิคอนที่กัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ อย่างไรก็ตามในการวิเคราะห์โดยใช้กล้องไมโครสโคปนี้ใช้กำลังขยายเพียง 1000 เท่า ดังนั้น ในหัวข้อถัดไปจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ที่ใช้กำลังขยายมากกว่าหรือเท่ากับ 10,000 เท่า เพื่อให้เห็นลักษณะของพีระมิดและพอร์สพีระมิดบนพื้นผิวซิลิคอนได้ชัดเจนมากขึ้น



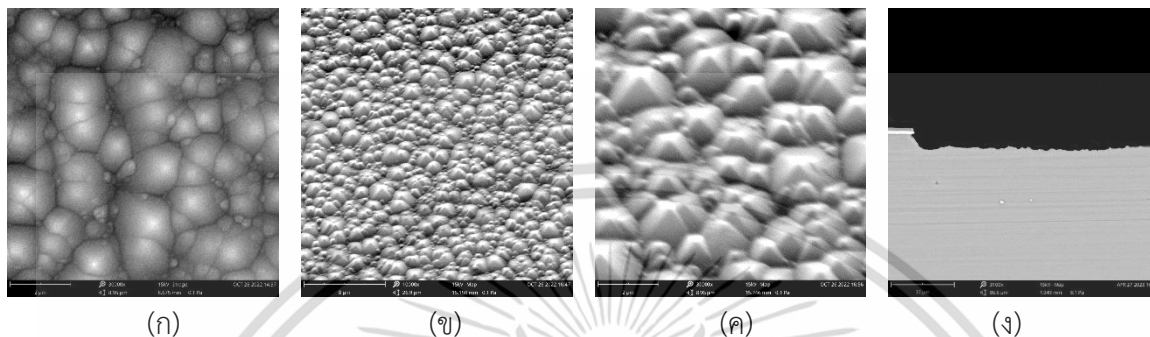
รูปที่ 4.13 ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al โดยกล้องไมโครสโคป
(ก) แบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซัลฟูริก
(ข) แบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยูที่กัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$

4.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยูด้วยเทคนิค SEM

พื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยูที่อยู่ระหว่างขั้วโลหะ Al/Ti หรือที่เรียกว่าพื้นที่รับแสง จะถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เติมด้วยกรดซัลฟูริกปริมาณ 34 g/l โดยใช้อุณหภูมิในการกัด 80 องศาเซลเซียส ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที และใช้เวลาในการกัด 30 นาที ซึ่งสารละลายที่ใช้กัดนี้จะทำปฏิกิริยาในการเลือกกัดแผ่นซิลิคอนที่ระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111) โดย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

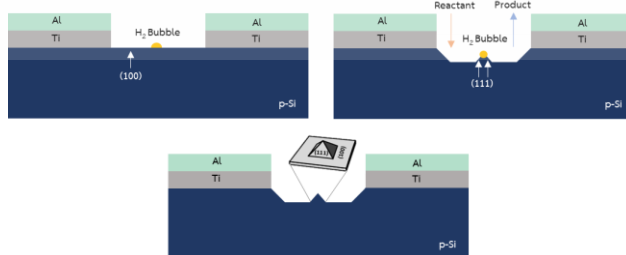
จากการตรวจสอบพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) 15.0 kV ที่กำลังขยาย 10,000 และ 30,000 เท่า จะเห็นได้ว่า มีพริมาตรแบบสุ่มเกิดบนผิวซิลิคอนบริเวณพื้นที่รับแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวซิลิคอนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบพริมาตรบนร่องรูปตัวยู

- (ก) ภาพถ่ายจากด้านบนของผิวซิลิคอนด้วยกำลังขยาย 30,000 เท่า
 (ข) ภาพถ่ายจากด้านบนมุมเอียง 45 องศาของผิวซิลิคอนด้วยกำลังขยาย 10,000 เท่า
 (ค) ภาพถ่ายจากด้านบนมุมเอียง 45 องศาของผิวซิลิคอนด้วยกำลังขยาย 30,000 เท่า
 (ง) ภาพตัดขวางบริเวณระหว่างขั้วโลหะ

ผิวหน้าของซิลิคอนที่บริเวณพื้นที่รับแสงมีลักษณะเป็นพริมาตรแบบสุ่มเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาในการกัดที่มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ทิศทางในการกัดไม่เท่ากัน ปริมาณความเข้มข้นของสารละลาย และการกระจายตัวของพริมาตรแบบสุ่ม ซึ่งเกิดจากฟองก๊าซไฮโดรเจนที่บริเวณผิวหน้าซิลิคอน ดังแสดงในรูปที่ 4.15 [55] และในรูปที่ 4.15 เป็นลักษณะการกัดแผ่นซิลิคอนระนาบ (100) แบบแอนไอโซโทรปิกระหว่างขั้วไฟฟ้า อะลูมิเนียมทั้งสอง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเลือกกัดแผ่นซิลิคอนที่ระนาบ (100) มากกว่าระนาบ (111)



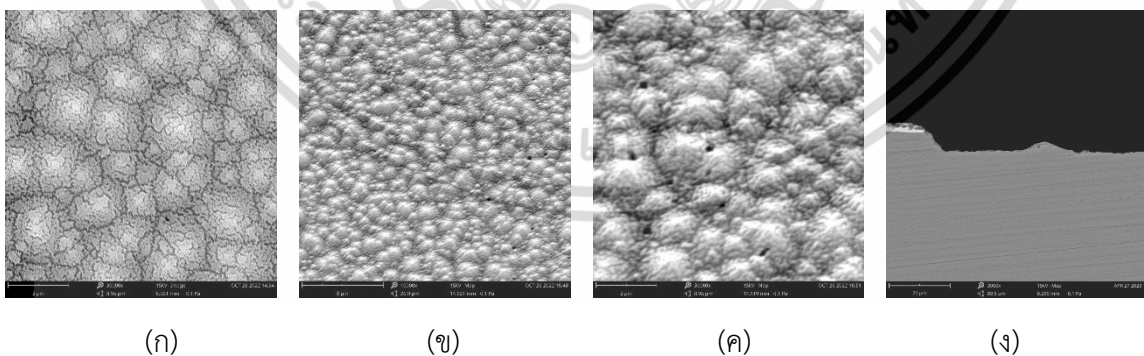
รูปที่ 4.15 ภาพจำลองฟองก๊าซไฮโดรเจนบริเวณผิวหน้าซิลิคอนระนาบ (100)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวของพีระมิดที่เกิดขึ้น โดยวิเคราะห์จากปฏิกิริยาทางเคมีของกระบวนการกัด เมื่อสารละลายกัดไปพบจุดบกพร่องบนโครงสร้างผลึกของซิลิคอนก็จะเกิดการทำให้ปฏิกิริยาการแตกตัวของสารละลายที่จะทำให้ได้อะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออน [56] โดยอะตอมของไฮดรอกไซด์ไอออนนี้จะไปจับตัวกับอะตอมของ ซิลิคอนจะทำให้เกิดสารใหม่ที่เรียกว่า กรดอโรซิลิก โดยกรดอโรซิลิกนี้จะแตกตัวเพื่อรวมกับน้ำทำให้เกิดเป็นก๊าซไฮโดรเจน ฟองก๊าซไฮโดรเจนเปรียบเสมือนหน้ากากป้องกันในการกัดของสารละลาย [55] จนทำให้เกิดพีระมิดขึ้นมาได้ ด้วยเหตุผลนี้จึงอาจกล่าวได้ว่าสารใหม่ที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีการกัดนั้น รวมกับกรดซิลิซิกที่เติมเพิ่มไปนั้นซึ่งเป็นสารเคมีตัวเดียวกันจึงทำให้เกิดจำนวนของฟองก๊าซไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้น และส่งผลกระทบต่อขนาดใหญ่อและการกระจายตัวของพีระมิดมากขึ้นเช่นกัน

4.3.2 การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปด้วยเทคนิค SEM

พื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปที่อยู่ระหว่างขั้วโลหะ Al/Ti หรือที่เรียกว่าพื้นที่รับแสง จะถูกกัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิกปริมาณ 34 g/l โดยใช้อุณหภูมิในการกัด 80 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำมากัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ที่แสงจากหลอดฮาโลเจน 30,000 ลักซ์ โดยจากการตรวจสอบพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) 15.0 kV ที่กำลังขยาย 10,000 และ 30,000 เท่า (รูปที่ 4.16) จะเห็นได้ว่า มีพอร์สเกิดขึ้นบนพีระมิดแบบสุ่มบริเวณพื้นที่รับแสง จึงเรียกตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างนี้ว่า ตัวตรวจวัดแสงแบบโครงสร้างพอร์สพีระมิดบนร่องรูปด้วย



รูปที่ 4.16 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวซิลิคอนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบพอร์สพีระมิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- (ก) ภาพถ่ายจากด้านบนของผิวซิลิคอนด้วยกำลังขยาย 30,000 เท่า
- (ข) ภาพถ่ายจากด้านมุมเอียง 45 องศาของผิวซิลิคอนด้วยกำลังขยาย 10,000 เท่า
- (ค) ภาพถ่ายจากด้านมุมเอียง 45 องศาของผิวซิลิคอนด้วยกำลังขยาย 30,000 เท่า
- (ง) ภาพตัดขวางบริเวณระหว่างขั้วโลหะ

เมื่อพิจารณาลักษณะของผิวซิลิคอนจากการถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ในรูปที่ 4.16 พบว่า ผิวซิลิคอนมีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสุ่ม และมีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นทั่วบริเวณผิวพีระมิด ซึ่งเรียกว่า พอร์สพีระมิด โดยรูพรุนขนาดเล็กเกิดขึ้นจากโฮล (h^+) ที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีเข้าไปทำปฏิกิริยากับซิลิคอน (Si) และน้ำ เกิดเป็นซิลิคอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนไอออน และอิเล็กตรอน (e^-) โดยซิลิคอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะไปทำปฏิกิริยากับกรดไฮโดรฟลูออริก ซึ่งจากปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นต่อเนื่องกันทำให้เนื้อซิลิคอนบางส่วนถูกกัดออกไป และมีรูพรุนขนาดเล็กมองเห็นเป็นสีต่างๆปรากฏขึ้น

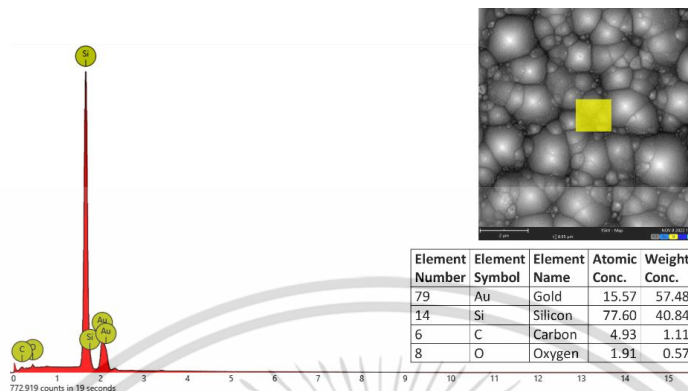
4.3.3 การวิเคราะห์ธาตุบริเวณพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปถ้วยและแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปถ้วยด้วยเทคนิค EDX

จากผลการวิเคราะห์ชนิดและความเข้มข้นขององค์ประกอบในธาตุจากพลังงานของรังสีเอกซ์ที่เกิดจากอันตรกิริยาระหว่างอิเล็กตรอนกับสารเคมีบนเนื้อซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสง โดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน (Energy Dispersive X-Ray Spectrometer : EDX) ผลที่ได้แสดงดังรูปที่ 4.17 (ก) พบว่าบริเวณพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส ประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก (% Weight concentration) ของธาตุหลัก คือ ซิลิคอน (Si) เท่ากับ 40.84% ในส่วนของคาร์บอน (C) และออกซิเจน (O) มีเปอร์เซ็นต์ที่ต่ำ ซึ่งเป็นธาตุที่สามารถตรวจจับได้ในเทคนิค EDX ทั่วไปเนื่องจากเป็นธาตุที่พบได้ในอากาศ และทอง (Au) ที่ถูกตรวจจับได้ในเปอร์เซ็นต์ที่สูงเนื่องจากเป็นสารที่ใช้เคลือบพื้นผิวซิลิคอนก่อนทำการ EDX เพื่อลดการสะสมประจุ (Charging effect) ที่ผิวของชิ้นงาน นอกจากนี้ผล EDX ของบริเวณพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยการกัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย HF + 3HNO₃ + 5H₂O หลังจากกัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซิลิซิกที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส แสดงดังรูปที่ 4.17 (ข) สอดคล้องกับผล EDX ที่ได้กล่าวมาก่อนหน้านี้ (รูปที่ 4.17 (ก)) โดยมีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก (% Weight concentration) ของธาตุหลัก คือ ซิลิคอน (Si) เท่ากับ 38.52%

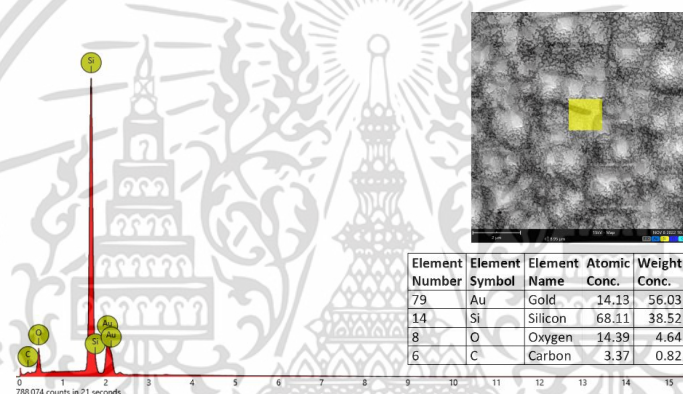
จากผล EDX ที่ได้ในรูปที่ 4.17 (ก) และ (ข) แสดงให้เห็นว่าพื้นผิวซิลิคอนหลังจากการกัดนั้นไม่พบสารเคมีที่ใช้กัดตกค้างบนบริเวณผิวซิลิคอน ดังนั้น สามารถสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปถ้วยและแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปถ้วยร่วมกับวงจรรวมได้ด้วยวิธีการกัดเปียกแบบแอนไอโซทรอปิกโดยสารละลาย TMAH แทนการใช้สารละลายที่ทิ้งโลหะอัลคาไลน์ (Alkali metal) ซึ่งเป็นสารละลายที่อยู่ในกลุ่มอัลคาไลน์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(Alkali) เช่น โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ลิเทียมไฮดรอกไซด์ (LiOH) และโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นต้น [57]



(ก)



(ข)

รูปที่ 4.17 สเปกตรัมที่ได้จากการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDX ของพื้นผิวซิลิคอน

(ก) แบบพีระมิตบนร่องรูปถ้วยที่เกิดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซัลฟิวริก

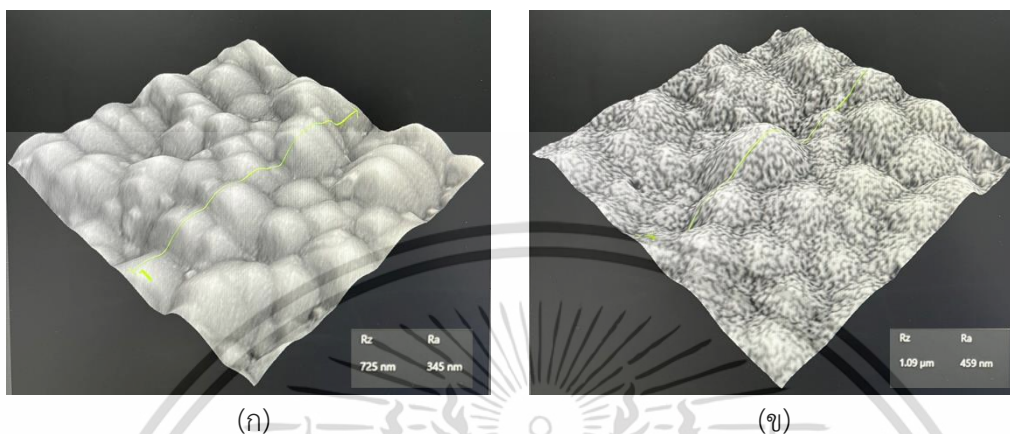
(ข) แบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปถ้วยที่เกิดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$

4.3.4 การวิเคราะห์ลักษณะความขรุขระพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปถ้วยและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปถ้วยด้วยเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนด้วยการสแกนพื้นผิวซิลิคอนด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope : SEM) ภาพ SEM จะแสดงบนจอภาพ จากนั้นทำการวัดความขรุขระด้วยซอฟต์แวร์การวัดความขรุขระแบบ 3 มิติ (3D Roughness Reconstruction Software) ซึ่งเป็นการวัดความขรุขระที่ไม่ทำลายชิ้นงาน โดยการวัดความขรุขระจะแบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่ ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต (Average roughness : Ra) คือ ค่าความขรุขระด้วย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าเฉลี่ยของพื้นที่ผิวที่วัดค่าเฉลี่ยความสูงเฉพาะส่วนที่นูนขึ้นมา และความขรุขระผิวเฉลี่ยโดยขนาด (Roughness height : Rz) คือ ค่าความขรุขระพื้นผิวโดยวัดขนาดความสูงของยอดกับความลึกของหลุม



รูปที่ 4.18 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่บริเวณพื้นผิวซิลิคอน (ก) ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซัลฟิวริก (ข) ตัวตรวจวัดแสงแบบโพรัสพีระมิตบนร่องรูปตัวยูที่กัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$

จากการวิเคราะห์ผลของค่าความขรุขระพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซัลฟิวริก และแบบโพรัสพีระมิตบนร่องรูปตัวยูที่กัดแบบย้อมสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ดังแสดงในรูปที่ 4.18 และตารางที่ 4.3 พบว่า ความขรุขระแบบทั้งการวัดแบบเฉลี่ย (Ra) และแบบโดยขนาด (Rz) ของพื้นผิวซิลิคอนที่กัดแบบย้อมสีสูงกว่าพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย TMAH เติมด้วยกรดซัลฟิวริก ซึ่งเป็นผลมาจากการกัดแบบย้อมสีบนพีระมิตด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ทำให้เกิดนาโนโพรัสบนพีระมิตและส่งผลให้พื้นผิวมีความขรุขระมากขึ้น

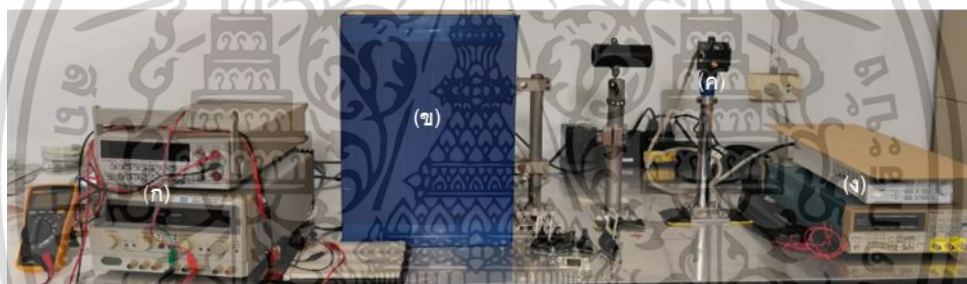
ตารางที่ 4.4 ค่าความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และแบบโพรัสพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

พารามิเตอร์ของการวัด	ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู	ตัวตรวจวัดแสงแบบโพรัสพีระมิตบนร่องรูปตัวยู
ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต Ra	345 nm	459 nm
ความขรุขระผิวเฉลี่ยโดยขนาด Rz	725 nm	1,090 um

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 การศึกษาลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

การทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบ (MSM) แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM) แบบพอร์สพีระมิตร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้า 80 μm และมีลักษณะขั้วไฟฟ้าเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสมี ขนาดพื้นที่ (A) เท่ากับ 1 mm^2 การวัดลักษณะสมบัติกระแส-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงที่ยังไม่ได้บรรจุลงบนตัวถัง แบ่งออกเป็นสองลักษณะ คือ ในขณะที่ไม่มีแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหลที่เกิดจากตัวตรวจวัดแสง และในขณะที่มีแสงตกกระทบโดยใช้แสงจากเลเซอร์ที่มีความยาวคลื่น 635 nm กำลังแสง 6 mW เพื่อให้ทราบถึงประสิทธิภาพในการตรวจวัดแสง สำหรับการวัดลักษณะทางไฟฟ้าโดยใช้เครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้าซึ่งอยู่ในกล่องป้องกันแสงจากภายนอก (Dark box) โดยจะป้อนค่าแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V ดังแสดงให้เห็นในรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 เครื่องมือที่ใช้ในการหาลักษณะสมบัติกระแส-แรงดัน

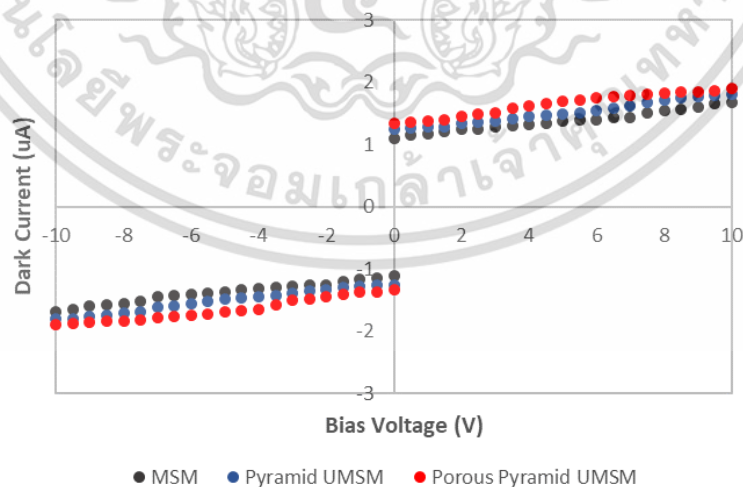
- (ก) แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรง
- (ข) กล่องป้องกันแสง
- (ค) เลเซอร์ไดโอด
- (ง) เครื่องมือควบคุมเลเซอร์ไดโอด

4.4.1 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างตัวตรวจวัดแสงทั้งโครงสร้างแบบเชิงราบ แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูที่มีขั้วโลหะ คือ ไทเทเนียม(Ti) และอะลูมิเนียม (Al) ดังนั้นตัวตรวจวัดแสงในขณะสมมูลจะมีโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงที่มีลักษณะสมมาตรกัน เนื่องจากความสูงกำแพงศักย์ช็อกตติ์กี้ย กำแพงศักย์ภายใน และความกว้างบริเวณปลอดพาหะของขั้วแคโทดและขั้วแอโนด มีขนาดเท่ากัน

เมื่อมีการจ่ายแรงดันไบอัสให้แก่ตัวตรวจวัดแสงขณะที่ตัวตรวจวัดแสงไม่ได้รับแสงตกกระทบ โดยให้ขั้วโลหะอีกด้านได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับ และขั้วโลหะด้านหนึ่งได้รับไบอัสตรง โดยขั้วโลหะที่ได้รับแรงดันไบอัสย้อนกลับนี้จะส่งผลให้เกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และมีการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากทางด้านโลหะข้ามกำแพงศักย์ช็อคตักก็ไปยังด้านสารกึ่งตัวนำ ผลจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวทำให้เกิดกระแสรั่ว หรือเรียกว่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสง มีทิศทางจากด้านสารกึ่งตัวนำไปยังด้านโลหะ (I_{SM}) ซึ่งปัจจัยหนึ่งที่สามารถลดการเกิดกระแสมืดในตัวตรวจวัดแสงได้ คือ กำแพงศักย์ช็อคตักก็ โดยทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้อิเล็กตรอนจากด้านโลหะไหลข้ามไปยังสารกึ่งตัวนำได้ง่าย ซึ่งค่าความสูงกำแพงศักย์ช็อคตักก็นั้นสามารถกำหนดได้จากชนิดของสารกึ่งตัวนำที่นำมาสัมผัสกัน และขั้วโลหะของตัวตรวจวัดแสง

เมื่อนำตัวตรวจวัดแสงหลังการซินเตอร์ที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที มาทำการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าด้วยเครื่องมือวัดคุณสมบัติทางไฟฟ้า โดยจ่ายแรงดันไฟฟ้าตั้งแต่ -10 V ถึง 10 V ในการทดสอบตัวตรวจวัดแสง ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ เพื่อหากระแสรั่วไหล (I_{dark}) ที่เกิดขึ้น พบว่า ที่แรงดันไบอัส 10 V กระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ (MSM) เท่ากับ $1.68 \mu A$ ในขณะที่ตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM) และแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM) มีค่ากระแสรั่วไหลเท่ากับ $1.80 \mu A$ และ $1.89 \mu A$ ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.20 และเมื่อพิจารณาตรวจวัดแสงแบบเชิงราบนั้นพบว่ามีความกระแสรั่วไหลน้อยกว่ากระแสรั่วไหล ของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูประมาณ 1 เท่า และน้อยกว่ากระแสรั่วไหลของพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูประมาณ 1.13 เท่า โดยกระแสรั่วไหลของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่สูงกว่าแบบเชิงราบอาจมีสาเหตุจากความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่มีมากกว่าแบบเชิงราบ

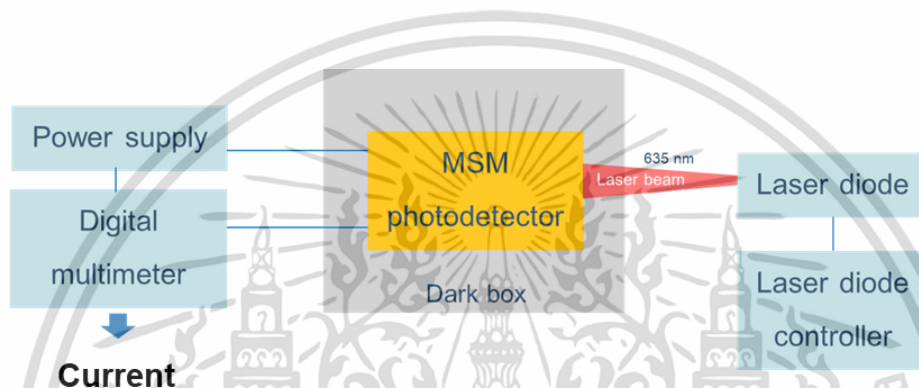


รูปที่ 4.20 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ไม่ได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4.2 ลักษณะสมบัติกระแส - แรงดันของตัวตรวจวัดแสงขณะได้รับแสงตกกระทบ

ในหัวข้อนี้เป็นการทดสอบลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู ขณะได้รับแสงตกกระทบ เพื่อที่จะศึกษาลักษณะการตอบสนองทางแสงกระแสตรง (สัญญาณแบบ Direct current: DC) โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 635 nm กำลังแสง 6 mW และจะทำการวัดที่แรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง 10 V ดังแผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบใน รูปที่ 4.21



รูปที่ 4.21 แผนภาพเครื่องมือที่ใช้ทดสอบลักษณะสมบัติกระแสแสง-แรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

เมื่อตัวตรวจวัดแสงได้รับการไบอัสจะเกิดการขยายตัวของบริเวณปลอดพาหะ และเมื่อมีแสง ตกกระทบบริเวณปลอดพาหะส่งผลให้เกิดคู่อิเล็กตรอน - โฮลขึ้น โดยอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกับสนามไฟฟ้าไปยังขั้วแอโนด ในขณะที่โฮลเคลื่อนที่ในทิศทางสวนทิศสนามไฟฟ้า ไปยังขั้วแคโทด การเคลื่อนที่ของโฮลนี้ก่อให้เกิดกระแสโฟโตไดโอดขึ้น ส่งผลให้มีกระแสไหลออกไปยังอุปกรณ์อื่นภายในวงจรต่อไป โดยค่ากระแสแสงหรือกระแสโฟโตไดโอดสามารถหาได้จากสมการที่ 4.2

$$I_{\text{photo}} = I_{\text{mea}} - I_{\text{dark}} \quad (4.2)$$

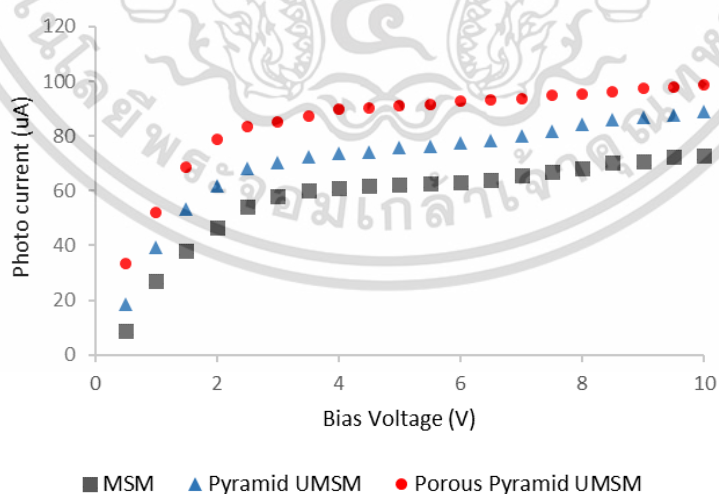
โดยที่ I_{photo} คือ กระแสแสง

I_{mea} คือ กระแสรวมที่วัดได้จากการทดลอง

I_{dark} คือ กระแสรั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.22 เป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ (MSM) แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM) และแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM) ขณะได้รับแสงตกกระทบจากเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 635 nm กำลังแสง 6 mW และป้อนด้วยแรงดันไบอัสตั้งแต่ 0 V ถึง 10 V ซึ่งกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงทั้ง 3 แบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน แต่ตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูมีกระแสสูงกว่าแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และแบบเชิงราบ โดยที่แรงดันไบอัส 10 V ค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู เท่ากับ 98.91 μA แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และแบบเชิงราบ เท่ากับ 89.2 μA และ 72.92 μA ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูสูงกว่าค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบอยู่ที่ 1.36 เท่า เนื่องจากตัวตรวจวัดแสงในเงื่อนไขนี้มีพื้นผิวซิลิคอนเป็นพอร์สหรือรูพรุนขนาดเล็กบริเวณพีระมิตแบบสุม่ภายในร่องรูปตัวยู ซึ่งเป็นปัจจัยในการเพิ่มพื้นที่รับแสงอีกส่วนหนึ่ง เมื่อมีแสงตกกระทบบริเวณภายในร่องรูปตัวยูบนพื้นผิวพีระมิตจะเกิดภาวะแสงสะท้อน โดยแสงที่สะท้อนออกมาจะเปลี่ยนแปลงตามลักษณะของพื้นผิวนั้นคือ แสงที่ตกกระทบผิวของพีระมิตด้านหนึ่งจะมีการสะท้อนไปยังผิวของพีระมิตอีกด้านหนึ่ง ซึ่งจะทำให้แสงที่สะท้อนออกไปนั้นมีน้อยลงหรือลดการสูญเสียแสงจากสะท้อนกลับที่ผิว ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่าการสร้างพอร์สพีระมิตภายในร่องรูปตัวยูนั้นจะสามารถลดปริมาณการสะท้อนและเพิ่มการดูดกลืนแสงส่งผลโดยตรงต่อค่ากระแสแสงที่ เพิ่มขึ้นของตัวตรวจวัดแสงนั่นเอง อย่างไรก็ตามตัวตรวจวัดแสงนั้นสามารถตอบสนองต่อแสงกระแสตรงได้ เป็นอย่างดี จะเห็นได้ว่ากระแสแสงที่เกิดขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงในลักษณะแบ่งเป็นระดับๆ ตามแรงดันไบอัส โดยลักษณะกระแสแสงที่ได้นั้นมีความสมมาตรเช่นเดียวกับกรณีกระแสมืดในหัวข้อก่อนหน้านี้



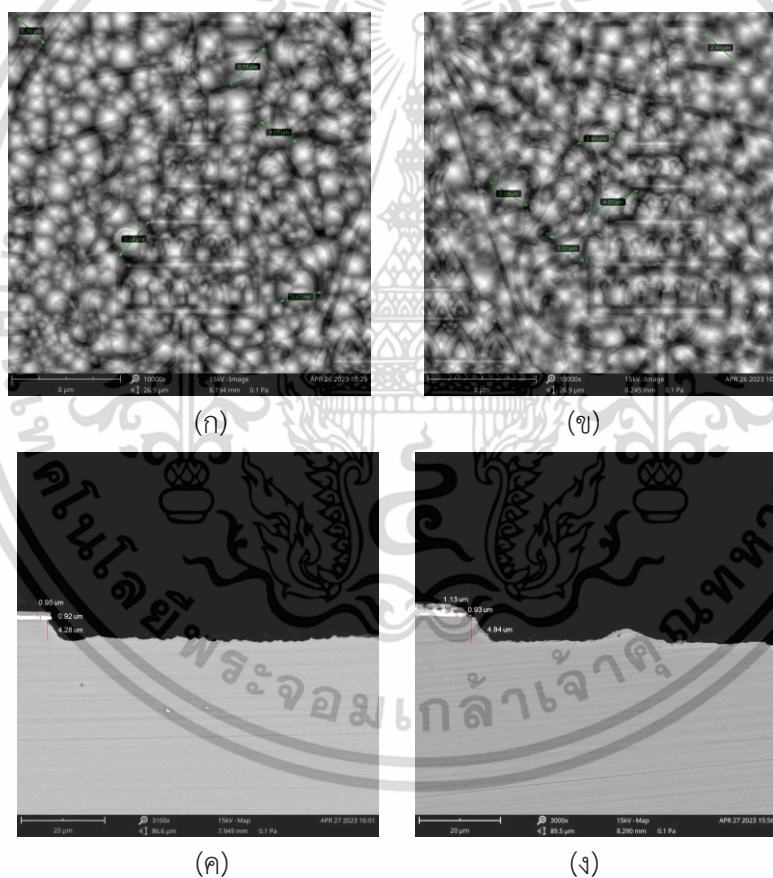
รูปที่ 4.22 ลักษณะสมบัติกระแสและแรงดันของตัวตรวจวัดแสง ขณะที่ได้รับแสงตกกระทบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

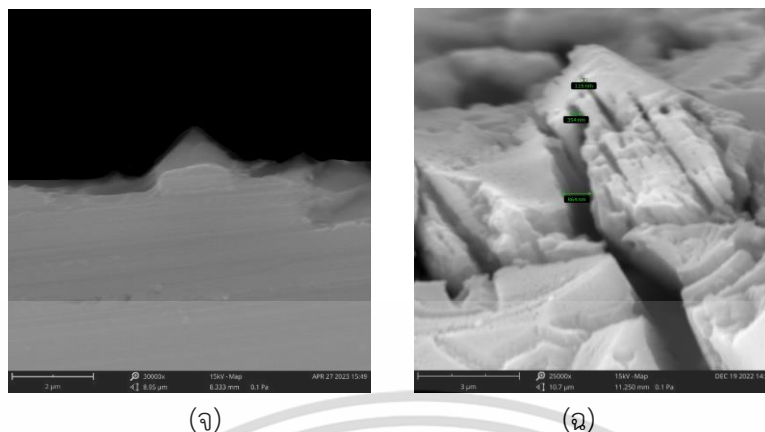
4.5 การเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและสมบัติทางไฟฟ้า

4.5.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

การศึกษาลักษณะพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMMS) ที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิคปริมาณ 34 g/L และพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMMS) ที่กัดด้วยด้วยสารละลาย TMAH ความเข้มข้น 5 wt% เติมด้วยกรดซิลิซิคปริมาณ 34 g/L หลังจากนั้นนำมากัดแบบย้อนสีด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ที่แสงจากหลอดฮาโลเจน 30,000 ลักซ์ โดยจะพิจารณา ความลึกซิลิคอน ค่าเฉลี่ยขนาดฐานของพีระมิต ความสูงของพีระมิต และความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอน



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 ภาพถ่าย SEM ของลักษณะพื้นผิวซิลิคอนตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al

- (ก) ขนาดฐานพีระมิดของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM)
- (ข) ขนาดฐานพีระมิดของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM)
- (ค) ภาพตัดขวางพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM)
- (ง) ภาพตัดขวางพื้นผิวซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM)
- (จ) ภาพตัดขวางพีระมิดบนร่องรูปตัวยู
- (ฉ) ภาพตัดขวางพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู

ความลึกของซิลิคอนจากภาพตัดขวางในรูปที่ 4.23 (ค) ของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และรูปที่ 4.23 (ง) ของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู มีค่าเท่ากับ $4.28 \mu\text{m}$ และ $4.84 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งความลึกซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองแบบอยู่ในช่วงค่าความกว้างบริเวณปลอดพาหะ $3.0 - 5.0 \mu\text{m}$ ที่ได้จากการคำนวณจากสมการที่ 3.1 ในบทที่ 3

ค่าเฉลี่ยขนาดฐานพีระมิดได้จากการวัดในรูปที่ 4.23 (ก) ของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และรูปที่ 4.23 (ข) ของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู มีค่าเฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน โดยจากตารางที่ 4.4 พบว่า ค่าเฉลี่ยขนาดฐานของพีระมิดของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และ ตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู มีค่าเท่ากับ $3.17 \mu\text{m}$ และ $3.23 \mu\text{m}$ ตามลำดับ ซึ่งขนาดฐานของพีระมิดสามารถนำไปคำนวณหาความสูงของพีระมิดได้จากสมการที่ 4.3 โดยผลจากการคำนวณ

แสดงในตารางที่ 4.4 แสดงผลค่าเฉลี่ยความสูงพีระมิดของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู เท่ากับ $1.87 \mu\text{m}$ และเฉลี่ยความสูงพีระมิดของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู เท่ากับ $1.90 \mu\text{m}$

$$h = \left(\frac{w}{2 \tan \theta_2} \right) \quad (4.3)$$

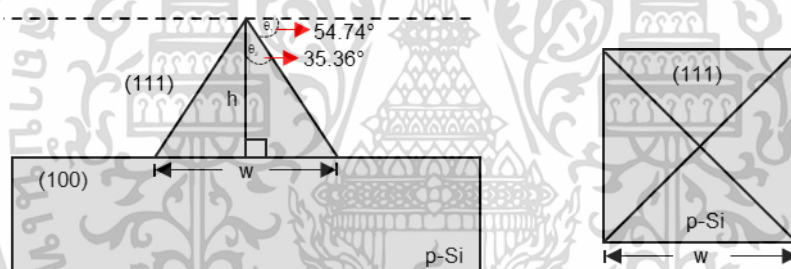
$$h = \left(\frac{3.23}{2 \tan(35.6)} \right) = 1.90 \mu\text{m}$$

โดยที่ h คือ ความสูงของพีระมิด (μm)

w คือ ฐานพีระมิด (μm)

θ_1 คือ มุมจากการกัดแบบแอนไอโซทรอปิกเท่ากับ 54.74 องศา

θ_2 คือ มุมที่หาได้จากมุมฉาก $90^\circ - \theta_1$



รูปที่ 4.24 ภาพจำลองลักษณะพีระมิดแบบสุ่มที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวซิลิคอนระนาบ (100) หลังการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (ก) ภาคตัดขวางของพีระมิด และ (ข) ภาพด้านบนพีระมิด

จากตารางที่ 4.4 พบว่า ความลึกซิลิคอนของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยูมีค่าเท่า $4.28 - 4.84 \mu\text{m}$ ซึ่งอยู่ในช่วงค่าความกว้างบริเวณปลอดภัยที่กำหนดไว้ $3.0 - 5.0 \mu\text{m}$ ในส่วนของค่าเฉลี่ยขนาดและความสูงพีระมิดของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองแบบมีค่าใกล้เคียงกัน เนื่องจากกระบวนการในการสร้างพีระมิดบนร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสงทั้งสองแบบต้องใช้สารละลาย TMAH เดิมด้วยกรดซิลิซิกในการกัดพื้นผิวซิลิคอนเหมือนกัน แต่ความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนจะเกิดขึ้นหลังจากที่พีระมิดบนร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสงถูกกัดด้วยสารละลาย $\text{HF} + 3\text{HNO}_3 + 5\text{H}_2\text{O}$ ที่แสดงในรูปที่ 4.3 (ฉ) โดยลักษณะพื้นผิวของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยูจะมีรูพรุนขนาด $116 - 864 \text{ nm}$ เกิดขึ้นบนพีระมิด และจากการสร้างรูพรุนหรือพอร์สบนพีระมิดนี้ส่งผลให้ค่าความขรุขระ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวเฉลี่ยของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูมีค่าสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู 1.33 เท่า

ตารางที่ 4.5 ตารางเปรียบเทียบความขรุขระผิวเฉลี่ย ความลึกซิลิคอน ค่าเฉลี่ยขนาดฐานของพีระมิตค่าเฉลี่ย ความสูงของพีระมิตของตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM) และแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM)

ลักษณะทางกายภาพ	Pyramid UMSM	Porous Pyramid UMSM
ความลึกซิลิคอน (μm)	4.28	4.84
ค่าเฉลี่ยขนาดฐานพีระมิต (μm)	3.17	3.23
ค่าเฉลี่ยความสูงพีระมิต (μm)	1.87	1.90
ความขรุขระผิวเฉลี่ยเลขคณิต Ra (μm)	0.345	0.459

4.5.2 ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และได้รับแสงตกกระทบของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

การเปรียบเทียบลักษณะคุณสมบัติไฟฟ้าของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ (MSM) แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM) และแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM) ในหัวข้อนี้ได้แก่ การเปรียบเทียบค่ากระแสรั่ว กระแสแสง และอัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืดที่แรงดันไบอัส 10 V จากตารางที่ 4.5 พบว่า ค่ากระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ มีค่าน้อยที่สุด และตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู มีค่าน้อยกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู ซึ่งแนวโน้มของค่ากระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแต่ละชนิดนั้นสอดคล้องกับค่ากระแสแสง โดยค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบมีค่าน้อยที่สุด เนื่องจากพื้นผิวซิลิคอนที่เป็นระนาบส่งผลให้มีพื้นที่รับแสงน้อยกว่าตัวตรวจรับแสงแบบร่องรูปตัวยู ซึ่งค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูมีค่ามากที่สุดในการทดลองนี้ และสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพที่แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะเป็นพอร์สและมีความขรุขระผิวเฉลี่ยมากที่สุด ทำให้ช่วยลดการสะท้อนแสงและดูดกลืนแสงได้มากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูมีและตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ พบว่า มีค่ามากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ 1.36 เท่า และเมื่อพิจารณาตัวตรวจวัดแสงแบบ

พีระมิตบนร่องรูปตัวยู มีค่ากระแสแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ 1.22 เท่า ซึ่งจะเห็นได้ว่าความขรุขระพีระมิตภายในร่องรูปตัวยูของตัวตรวจวัดแสงทำให้การสะท้อนแสงกลับที่ผิวมีค่าต่ำและการดูดกลืนแสงของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้นส่งผลต่อกระแสแสงสูง ซึ่งสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการแปลงพลังงานจากพลังงานแสงให้เป็นพลังงานไฟฟ้า เนื่องจากพื้นที่รับแสงของบริเวณ ปลอดภัยมีมากขึ้นส่งผลให้เกิดการกระตุ้นของแสงที่ตกบริเวณกระทบได้มากขึ้น จึงเกิดคู่พาหะอิสระทั้งอิเล็กตรอน-โฮลในบริเวณปลอดภัยมีความหนาแน่นของพาหะอิสระเพิ่มขึ้น ทำให้กระแสแสงมีค่าสูงมีการตอบสนองทางแสงที่ดี นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมกระแสแสงได้ด้วยการเปลี่ยนแปลงแรงดันไบอัสที่ให้แก่ตัวตรวจวัดแสง [58] ซึ่งถือได้ว่าการสร้างพอร์สพีระมิตเหมาะสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ต้องการให้ค่ากระแสแสงเพิ่มสูง (High current) ซึ่งเป็นคุณสมบัติโดดเด่นอีกประการหนึ่งของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างนี้

ตารางที่ 4.6 การเปรียบเทียบลักษณะคุณสมบัติไฟฟ้าที่แรงดันไบอัส 10 V ของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูและแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู

ลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้า	MSM	Pyramid UMSM	Porous Pyramid UMSM
กระแสรั่วไหล I_{dark} (μA)	1.68	1.80	1.89
กระแสแสง I_{photo} (μA)	72.92	89.12	98.91
เปรียบเทียบกับค่ากระแสแสง MSM (เท่า)	-	1.22	1.36
อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสมืด (I/V)	43.40	49.51	52.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปผลการทดลอง

ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้ได้นำเสนอเกี่ยวกับกระบวนการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูชนิด AL/Ti/p-Si/Ti/Al โดยมีการศึกษาอุณหภูมิในกระบวนการขึ้นเตอริงที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางไฟฟ้า ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ และศึกษาการสร้างพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูด้วยวิธีการกัดด้วยสีย เพื่อช่วยให้ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและการตอบสนองทางแสงให้ดียิ่งขึ้น

ส่วนแรกเป็นการสร้างรอยสัมผัสขั้วต่อก็จจากการเคลือบชั้นอะลูมิเนียม (Al) และไททาเนียม (Ti) ด้วยวิธีอาร์เอสพีดเตอริงลงบนแผ่นซิลิคอนชนิดพี (p-Si) ระบาย (100) สภาพต้านทาน 20 - 30 Ω .cm จากนั้นทำการออกแบบลวดลายต้นแบบและโครงสร้างร่องรูปตัวยูโดยการคำนวณหาค่าความกว้างของบริเวณปลอดพาหะ สำหรับใช้ในการกำหนดความลึกในการกัดร่องรูปตัวยู โดยออกแบบลวดลายของอุปกรณ์เป็นแบบช่องเดี่ยว (Single slit) ระยะห่างระหว่างขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมมีขนาดกว้าง (Wide electron gap) เท่ากับ 80 μ m ขนาดของขั้วไฟฟ้าอะลูมิเนียมเท่ากับ 1 mm² และกำหนดความลึกของร่องรูปตัวยูต้องอยู่ในช่วง 3.0 - 5.0 μ m ซึ่งเป็นบริเวณปลอดพาหะ

ส่วนที่สองเป็นการศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในกระบวนการขึ้นเตอริง (Sintering) สำหรับตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/Ti/p-Si/Ti/Al โดยสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบบนซิลิคอนชนิดพี (p-Si) ระบาย (100) และทำการขึ้นเตอริงที่อุณหภูมิ 100, 150, 200, 250 และ 300 $^{\circ}$ C จากนั้นเปรียบเทียบคุณสมบัติทางไฟฟ้า ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบหรือที่เรียกว่า กระแสมืด ของตัวตรวจวัดแสงหลังการขึ้นเตอริงทั้ง 5 อุณหภูมิ ซึ่งผลการทดลอง พบว่า กระแสมืด (Dark current) หรือกระแสรั่วของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง AL/Ti/p-Si/Ti/Al แบบเชิงราบที่ขึ้นเตอริงด้วยอุณหภูมิ 250 $^{\circ}$ C มีค่าเท่ากับ 1.68 μ A โดยมีค่าต่ำที่สุดในการทดลองนี้ โดยค่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงที่ขึ้นเตอริงด้วยอุณหภูมิ 250 $^{\circ}$ C มีค่าต่ำกว่าตัวตรวจวัดแสงก่อนการขึ้นเตอริง (2.56 μ A) 1.52 เท่า ซึ่งกระแสมืดจะแปรผกผันกับความสูงกำแพงศักย์ โดยความสูงกำแพงศักย์ของตัวตรวจวัดแสงหลังการขึ้นเตอริง 250 $^{\circ}$ C มีค่าเท่ากับ 0.73 eV ซึ่งสูงกว่าตัวตรวจวัดแสงก่อนการขึ้นเตอริงที่มีค่าเท่ากับ 0.72 eV จากความสัมพันธ์ของกระแสมืดและความสูงกำแพงศักย์ที่ได้จากการทดลองนี้สามารถอธิบายได้ว่า ถ้ากำแพงศักย์ขอตตก็จมีค่าสูงจะส่งผลให้อิเล็กตรอนเคลื่อนที่จากด้านโลหะ (Ti) ข้ามไปสู่อารกิ้งตัวนำ (Si) ได้ในปริมาณน้อย เนื่องจากอิเล็กตรอนต้องใช้พลังงานสูงในการข้ามกำแพงศักย์จากด้านโลหะไปสู่อารกิ้งตัวนำ ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังที่กล่าวมานี้ คือ ปัจจัยที่ส่งผลให้กระแสมืดเกิดขึ้น และจากการพิจารณาภาพตัดขวางบริเวณขั้วของตัวตรวจวัดแสง พบว่า บริเวณขั้วของตัวตรวจวัดแสงก่อนการขึ้นเตอริงไม่เกิดขึ้นอินเตอร์เฟซ (Interface layer) หรือยังคงมีผลของสถานะผิวที่เกิดจากการไม่เข้ากันของโครงสร้าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลึก (Lattice mismatch) ระหว่างรอยสัมผัสโลหะกับสารกึ่งตัวนำ จึงเป็นผลทำให้เกิดกระแสรั่วไหลสูงกว่า แต่ชั้นอินเตอร์เฟซบริเวณรอยสัมผัสเกิดขึ้นกับตัวตรวจวัดแสงหลังการซินเตอร์ริง 250 °C ซึ่งเป็นผลมาจากการให้ความร้อนที่เหมาะสมกับตัวตรวจวัดแสง และเป็นปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าความสูงกำแพงศักย์ของของตัวตรวจวัดแสงเพิ่มขึ้น ดังนั้น การให้อุณหภูมิที่เหมาะสมกับตัวตรวจวัดแสงจะช่วยให้ค่ากระแสมีลดลง ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการซินเตอร์ริงของตัวตรวจวัดแสงโครงสร้าง Al/Ti/p-Si/Ti/Al ในงานวิจัยนี้ คือ 250 °C

ส่วนที่สามเป็นการสร้างตัวตรวจแสงแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู โดยเริ่มจากการศึกษาผลของแสงและคลื่นเสียงความถี่สูงที่มีต่อการเกิดพอร์สซิลิคอน พบว่า เวลาในการเกิดพอร์สซิลิคอนที่กระตุ้นด้วยหลอดฮาโลเจนที่ความเข้มข้นแสง 30,000 lux เท่ากับ 2 นาที เป็นเงื่อนไขที่เหมาะสมสำหรับงานวิจัยนี้ เนื่องจากเวลาในการเกิดพอร์สเร็วกว่าการกระตุ้นด้วยความเข้มแสง 3,000 – 10,000 ลักซ์ และคลื่นเสียงความถี่สูง 2.5 – 5 เท่า จากนั้นสร้างพอร์สพีระมิดบนร่องรูปยูของซิลิคอนชนิดพี (p-Si) ระบาย (100) ด้วยวิธีการกัดย้อมสีด้วยสารละลาย HF + 3HNO₃ + 5DI และกระตุ้นการเกิดพอร์สด้วยแสงที่ความเข้มแสง 30,000 lux ที่อุณหภูมิห้อง พบว่า สารละลายที่ใช้ในการกัดแบบย้อมสีมีผลต่อการกัดชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียม โดยเริ่มกัดชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่เวลา 20 วินาที และเริ่มกัดมากขึ้นที่เวลา 40 และ 60 วินาที ดังนั้น จึงมีการสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO₂) ขึ้นมาบนชั้นอะลูมิเนียม เพื่อทำหน้าที่เป็นชั้นป้องกันการกัด ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์เริ่มถูกกัดที่เวลา 3 นาที และจะถูกกัดออกไปพร้อมกับชั้นอะลูมิเนียมและไทเทเนียมที่เวลา 4 นาที เมื่อพิจารณาตัวตรวจวัดแสงที่ใช้เวลาในการกัดแบบย้อมสี 2 นาที ชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ยังมีความสมบูรณ์ และผลการวิเคราะห์ธาตุโดยใช้เทคนิคสเปกโตรสโคปแบบแยกกระจายพลังงาน (EDX) พบว่า บริเวณหัวของตัวตรวจวัดแสงที่กัดแบบย้อมสีด้วยเวลา 2 นาที ประกอบด้วยเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นโดยน้ำหนัก (% Weight concentration) ของธาตุหลัก คือ ออกซิเจน (O) ซิลิคอน (Si) เท่ากับ 57.35 % และ 42.06% ดังนั้น ในการสร้างพอร์สพีระมิดด้วยการกัดแบบย้อมสีในงานวิจัยนี้จะใช้เวลา 2 นาที เพื่อป้องกันการกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ อะลูมิเนียม และไทเทเนียม

ส่วนที่สี่เป็นการวัดลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าเปรียบเทียบระหว่างตัวตรวจวัดแสงโครงสร้างแบบเชิงราบ แบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู และแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู ซึ่งลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า ได้แก่ คุณสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะไม่ได้รับแสงตกกระทบ (กระแสมืด) และคุณสมบัติกระแส-แรงดัน ขณะได้รับแสงตกกระทบ (กระแสแสง) โดยจะใช้แหล่งกำเนิดแสงจากเลเซอร์ไดโอดที่มีความยาวคลื่น 635 nm กำลังแสง 6 mW ผลการทดลอง พบว่า ที่แรงดันไบอัส 10 V กระแสรั่วไหลของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบ (MSM) เท่ากับ 1.68 μA ในขณะที่ตรวจวัดแสงแบบพีระมิดบนร่องรูปตัวยู (Pyramid UMSM) และแบบพอร์สพีระมิดบนร่องรูปตัวยู (Porous Pyramid UMSM) มีค่ากระแสรั่วไหลเท่ากับ 1.80 μA และ 1.89 μA ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาตรวจวัดแสงแบบเชิงราบนั้นพบว่ามีค่ากระแสรั่วไหลน้อยกว่ากระแสรั่วไหลของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูประมาณ 1 เท่า และน้อยกว่ากระแสรั่วไหลของพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูประมาณ 1.13 เท่า โดยกระแสรั่วไหลของโครงสร้างแบบร่องรูปตัวยูที่สูงกว่าแบบเชิงราบอาจมีสาเหตุจากความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนที่มีมากกว่าแบบเชิงราบ ในส่วนของกระแสแสงที่แรงดันไบอัส 10 V ค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยู เท่ากับ 98.91 μA แบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยู และแบบเชิงราบ เท่ากับ 89.2 μA และ 72.92 μA ตามลำดับ ซึ่งค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตบนร่องรูปตัวยูสูงกว่าค่ากระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงราบอยู่ที่ 1.36 เท่า และสัมพันธ์กับผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของตัวตรวจวัดแสงแบบพอร์สพีระมิตที่แสดงให้เห็นว่า พื้นผิวซิลิคอนมีลักษณะเป็นพอร์สและมีความขรุขระผิวเฉลี่ยมากที่สุด ซึ่งมีผลมาจากพอร์สหรือรูพรุนขนาดเล็กประมาณ 116 – 864 nm บริเวณพีระมิตแบบสุ่มภายในร่องรูปตัวยู ทำให้ช่วยลดการสะท้อนแสงและดูดกลืนแสงได้มากขึ้น ดังนั้น ตัวตรวจวัดแสงแบบพีระมิตบนร่องรูปตัวยูจึงเป็นตัวตรวจวัดแสงที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดในงานวิจัยนี้ และการสร้างพอร์สพีระมิตเหมาะสำหรับการสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยูที่ต้องการให้ค่ากระแสแสงเพิ่มสูง (High current) แต่การสร้างพอร์สด้วยวิธีการกัดแบบย้อมสียังมีข้อจำกัดของสารละลายที่ส่งผลกระทบต่อการใช้โลหะ อย่างไรก็ตาม ถ้าหากมีเปลี่ยนวิธีการสร้างพอร์สซิลิคอน หรือการลดเวลาในการกัดด้วยวิธีต่างๆ เช่น การเร่งปฏิกิริยาของการกัดด้วยโลหะมีตระกูล เป็นต้น จะช่วยให้ใช้โลหะและการเกิดพอร์สมีความสมบูรณ์มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้การตอบสนองการตรวจวัดแสงมีประสิทธิภาพที่สูงขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2558
- [2] อภิรักษ์ มังกรแก้ว “การผลิตเซลล์แสงอาทิตย์ชนิดซีเลคทีฟพินิตเตอร์ด้วยเทคนิคต้นทุนต่ำ”, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. หน้า 16, 2559
- [3] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, “ลักษณะเฉพาะทางแสงและไฟฟ้าของอุปกรณ์โครงสร้าง Mo/n-Si/Mo แบบพลาแนร์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547
- [4] กมลวรรณ สุทธิเจริญ, “การเพิ่มกระแสแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปด้วย โดยการเพิ่มขนาดพีระมิดแบบส้อมด้วยการเติมกรดซัลฟิวริกในสารละลาย TMAH”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2561
- [5] สรวิศ มุ่งการนา, “เซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอนที่มีชั้นพอร์ซซิลิคอนจากการกัดด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [6] Ricardo L. Ohta, Carlos E. Viana, Nilton I. Morimoto, and Beh-Hur V. Borges. “Fabrication of Ti-Si-Ti Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors Using Low Temperature Rapid Thermal Annealing”, Integrated Circuits and Systems Journal, vol.2, 2007. Pp.85-88.
- [7] ยุทธนา แจงอรุณ, “การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMSM ชนิด Al/n-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบส้อม” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 2560
- [8] สุรดา เอื้อมานะพงษ์, “ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าและทางแสงของตัวตรวจวัดแสง โครงสร้างCr/n-Si (Pt-Doped)/Cr”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2559
- [9] สมเกียรติ ศุภเดช, เซมิคอนดักเตอร์ฟิสิกส์, พิมพ์ครั้งที่ 9 คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, 2549

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [10] วรthy พัฒนอากุล, “การศึกษาผลของชั้นพอร์สซิลิคอนโดยวิธีแอนโดซ์เซชัน ในอุปกรณ์ตรวจจับไอของแอลกอฮอล์” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2549
- [11] S. M. Sze. Physics of semiconductor devices. Wiley, New York, 2nd edition, 1981
- [12] บุศรา นรารักษ์, “การศึกษากระบวนการสร้างและลักษณะสมบัติของซิลิคอนโพโตไดโอดโครงสร้างโลหะ-สารกึ่งตัวนำ-โลหะที่ถูกแพร่ด้วยอะตอมแพลตทินัม”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2556
- [13] Janik Zikovsky. “Nanometer Scale Connections to Semiconductor Surfaces”, Alberta, 2009. Pp. 172
- [14] J.M. Dhimmarr, H.N. Desai, B.P. Modi. “Analysis of the Inhomogeneous Barrier in In/p-Si Schottky Contact and Modified Richardson Plot”, Journal of Nano and Electronic Physics, Vol.8 no.2, 2016
- [15] ศุภกร จันทรประภา, “การพัฒนาคุณสมบัติทางไฟฟ้าของซีดต์กียไดโอดที่แพร่อะตอม สารเจือแพลตทินัมโดยการฉายรังสีเอกซ์”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา วิศวกรรมไมโครอิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2557)
- [16] A. Uhlir. “Electrochemical Etching of Porous Silicon in HF acid”, Tech. J. Vol.35. 1956. Pp.333.
- [17] L.T. Canham. App. Phys. Lett. (USA). vol.57. 1990. Pp.1096
- [18] D. Dimova-Malinovska, M. Sendova-Vassileva, N. Tzenov, M. Kamenova. Thin Solid Films (Switzerland). Vol.297. 1997. Pp.9
- [19] G.C.John V.A.Singh. Physics report. 263, 1195. Pp.93-151
- [20] J.Rouquerol et al. Pure Appl.Chem. Chem. (UK). Vol.66 no.8. 1994. pp.1739-1758
- [21] G.Mauckner et al. J.Lumin (Netherlands). Vol.57.1993. pp.211-215
- [22] T.Unagami, M.Seki. J.Electrochem.Soc.(USA). Vol.125. no.8. 1978. Pp.1339-1344
- [23] H. Baumgart, R.C.Frye, L.E. Trimble, H.J. Leamy, G.K. Celler. Laser and Electron Beam Interactions With Solids. Elsevier. 1982. Pp.609-614

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [24] V.Labunov, V.Bondarenko, L.Glinenko, A.Dorofeev, L.Tabulina. Thin Solid Films (Switzerland). Vol.137. 1986. Pp.123-134
- [25] P.C.Searson. Appl.Phys.Lett.(USA). Vol.59. 1991. Pp.832-834
- [26] L.T. Chanham. Properties of Porous Silicon. England, Short Run Press Ltd.,1997
- [27] Y.Watanabe, Y.Arita, T.Yokoyama, Y.Igarashi. J.Electrochem.Soc.(USA). vol.122. 1975. pp.1351
- [28] T.Unagami. J.Electrochem.Soc.(USA). vol.127. no.2. 1980. pp.476-483
- [29] T.Yau, R.Laiho, L.Meikkila. J.Vac.Sci.Technol.B (USA). Vol.12 no.4. 1994. Pp.2437-2439
- [30] T.R. Guilinger, M.J. Kelly, E.H. Chason, T.J. Headley, A.J. Howard. J.Electrochem.Soc.(USA). Vol.142. 1995. Pp.1634
- [31] H.F.Wolf. SEMICONDUCTORS, WILEY-INTERSCIENCE a division of Jonhn & Sons. 1971. pp.50
- [32] V.Lehmann and U.Gosele. Porous silicon formation : A Quantum Wire Effect, Appl. Phys. Lett. Vol.58 no.8. 1991. Pp.856-858
- [33] A.Halimaoui, C.Oules and G.Bomchil. "Electroluminescence in the visibl range during anodic oxidation of porous silicon films", Appl. Phys. Lett. Vol.59 no.3. 1991. Pp.304-306
- [34] Y.Kanemitsu. "Luminescence properties of nanometer-size Si crystallites : core and surface states", Phys.Rev.B. Vol.49 no.23. 1994. Pp.16845-16848
- [35] H.Takagi, M.Mitomi, R.Yano and T.Nakagiri. Solid State Phys. Vol.27. 1992. Pp.875
- [36] Y.Kanemitsu, T.Ogawa, K.Shiraishi and K.Takeda. Phys. Rev.B48. 1993. Pp.4883
- [37] T. Kawaguchi and S. Miyazima. Japan J. Appl. Phys. Vol.32. 1993. Pp.L215
- [38] W. Lang, P. Steiner, H. Sandmaier. "Porous silicon : a novel material for Microsystems". Sensor and Actuators. A51. 1995. Pp.31-36
- [39] A. Halimaoui. Surf.Sci.Lett.(Netherlands). Vol.306. 1994. Pp.L550-L554
- [40] R.J. Archer. J.Phys.Chem.Solids (UK). Vol.35. 1965. Pp.333

เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [41] S. Shih, K. Jung, D. Tsai, K-H. Li, Kwong, J.C. Campbell. Appl.Phys.Lett. (USA). Vol.60. 1992. Pp.995
- [42] W.A. Pliskin, E.E. Conrad. IBM J. Res. Dev. (USA). Vol.8. 1964. Pp.43
- [43] R.W. Fathauer, T. George, A. Ksendzov, R.P. Vasquez. Appl. Phys. Lett. (USA). Vol.60. 1992. Pp.995
- [44] A. Steckl, J. Xu, H.Mogul. Appl. Phys. Lett. (USA). Vol.62. 1993. Pp.2111
- [45] R. Chandler – Henderson, J.L. Coffey, L. Files – Sesler. J.Electrochem. Soc. (USA). Vol.141. 1994. Pp.L166
- [46] สมเกียรติ ศุภเดช, สรวิต มุ่งการนา, มนัสชัย ไชยนอก, มโน มีรักษ์ และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ. “การสร้างชั้นพอร์ซิลิคอนโดยการกัดข้อมสี่เพื่อเป็นชั้นลดการสะท้อนแสงสำหรับเซลล์แสงอาทิตย์แบบซิลิคอน” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27 (EECON27). Vol.2. พฤศจิกายน 2547. หน้า237-240
- [47] V.M. Aroutiounian, K.R. Maroutyan, A.L. Zatikyan and K.J. Touryan. “Calculation of the reflectance of porous silicon and other antireflection coating to silicon solar cells” Thin Solid Films. Vol.403-404. 2022. Pp.517-521
- [48] V.P. Bondarenko and V.A. Yakovtseve. “Optoelectronic applications of porous silicon” PROPERTIES OF Porous Silicon. England ; Short Run Press Ltd.,. 1997
- [49] H.Foll, M. Christophersen, J. Carstensen and G. Hasse. [Online]. Available : <http://www.techfak.uni-kiel.de>. 2004.
- [50] L.T. Canham. “Biomedical applications of porous silicon” PROPERTIES OF Porous Silicon. England ; Short Run Press Ltd.,. 1997
- [51] J.Das, S.M. Hossain, S. Chakraborty and H. Saha. “Role of parasitics in humidity sensing by porous silicon” Sensors and Actuators A : Physical. Vol.94. 2001. Pp.44-52
- [52] M.J. Sailor. “Sensor application of porous silicon” PROPERTIES OF Porous Silicon. England ; Short Run Press Ltd.,. 1997
- [53] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, เทคโนโลยีวงจรรวม, คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ, พ.ศ. 2560.

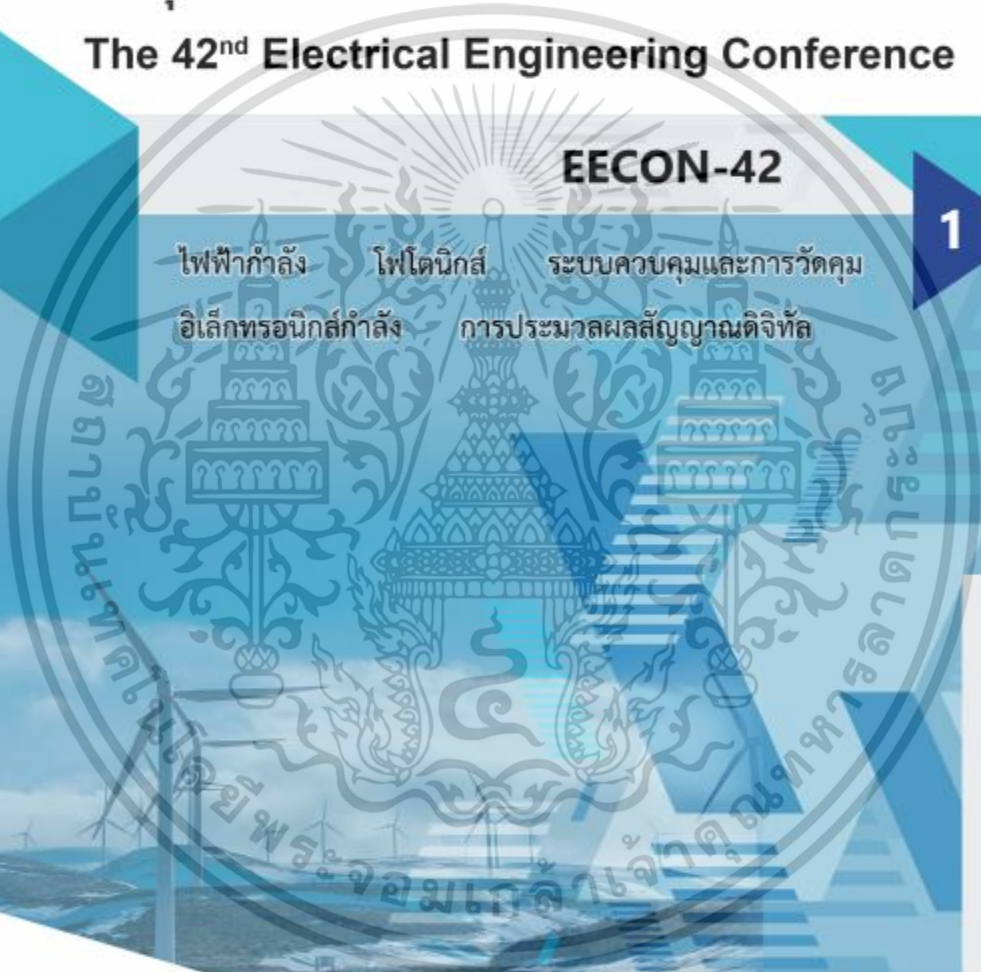
เอกสารอ้างอิง (ต่อ)

- [54] S.Ogawa, T.Kouzaki, T.Yoshide and R.Sinclair. 1991. Interface microstructure of titanium thin-film / silicon single-crystal substrate correlated with electrical barrier heights. Journal of Applied Physics Vol.70, No.2.
- [55] Theo Baum and David J. Schiffrin. “AFM study of surface finish improvement by ultrasound in the anisotropic etching of Si (100) in KOH for micromachining applications”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 7, Oct. 1997. pp. 338-342.
- [56] D. Resnik, D. Vrtacnik, U Aljancic and S. Amon. “Effective roughness reduction of {100} and {311} planes in anisotropic etching of {100} silicon in 5% TMAH”, Journal of Micromechanics and Microengineering, Vol. 13, Oct. 2002, pp. 26- 34.
- [57] Yujie Fan. Et. al. “ Differences in etching characteristics of TMAH and KOH on preparing inverted pyramids for silicon solar cells” Applied Surface Science. Vol. 264, Oct. 2012. pp. 761-766.
- [58] นายวรเทพ น้อยปรีชา, “การออกแบบการสร้างโฟโตไดโอด Al/n-Si/Al ที่มีระยะห่าง ขั้วไฟฟ้าขนาดสั้น” วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมไมโคร อิเล็กทรอนิกส์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. (2553)

ผลงานวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

- [1] **จิตาภา วิจฟัน**, กมลวรรณ สุทธิเจริญ, ณัฐพัชร์ ธรรมญาณเดชา และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ “การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตัวตรวจจับแสงแบบ MSM ด้วยการสร้างพีระมิตแบบสุ่มบนร่องรูปตัวยู และการซินเตอร์ริง” การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 42 วันที่ 30 ต.ค. - 1 พ.ย. 2562 หน้า 341 - 344
- [2] **Jidapa Vijafun**, Kamonwan Suttijalern, Nutthaphat Thornyanadacha and Surasak Niemcharoen. “Dark Current Reduction of MSM Photodetector by Sintering” The 7th International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology, 1-3 April 2021 (Virtual Conference), Thailand. Volume 1. pp.132-135.





Logo of EECON-42 featuring a central sunburst, a traditional Thai stupa, and a modern circuit board pattern. The text 'EECON-42' is prominently displayed in the center.

Logo of CSN (Central Science and Nuclear Energy Research Institute) on the left and OPEA (Oil, Petroleum and Gas Engineering Association of Thailand) on the right.

Logos of the organizing institutions: Chulalongkornrajavidyalaya University (top left), EECON (top center), and EEFAT (top right).

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ ๔๒
The 42nd Electrical Engineering Conference

EECON-42

ไฟฟ้ากำลัง โฟโตนิกส์ ระบบควบคุมและการวัดคุม
 อิเล็กทรอนิกส์กำลัง การประมวลผลสัญญาณดิจิทัล

1

CSN **OPEA**
 POWER · WE PROTECT OIL · PETROLEUM · GAS

วันที่ 30 ตุลาคม - 1 พฤศจิกายน พ.ศ. 2562
 ณ โรงแรมเดอะกรีนเนอร์ รีสอร์ท เขาใหญ่ จังหวัดนครราชสีมา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มบนร่องรูปตัวยูและการซินเตอร์ริง

Efficiency Increasing for MSM Photodetector

by Fabrication of Random Pyramid on U-Shape and Sintering

จิตภา วิงพันธ์¹, กมลวรรณ สุทธิเจริญ¹, ณัฐพัชร วรรณคุณนาคชา² และสุรศักดิ์ เนียมเจริญ¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนคลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520 Email : jidapa_kmitl@hotmail.com

²ศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) อีอีซีเอเมือง จังหวัดระยอง 24000 Email : nutthaphat.thornyinadacha@nectec.or.th

บทคัดย่อ

บทความนี้ศึกษาเกี่ยวกับการเพิ่มกระแสแสง และการลดกระแสมืดของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (U-shape Metal-Semiconductor-Metal : UMSM) โดยการสร้างพีระมิดแบบสุ่มบนร่องรูปตัวยูจากการกัดผิวซิลิคอนด้วยเทคนิคการกัดแบบแอนไอโซทรอปิก (Anisotropic etching) ด้วยสารละลาย KOH (โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) และสารละลาย TMAH (กรดอะซิติกแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์) เพื่อเพิ่มพื้นที่รับแสง ซึ่งการเพิ่มพื้นที่รับแสงส่งผลให้กระแสแสงเพิ่มขึ้น โดยการทดลองในบทความนี้ พบว่าอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง UMSM ที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt% ผสมกับกรดซิลิซิก (silicic acid) มีกระแสแสงมากกว่าตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (Metal-Semiconductor-Metal : MSM) 2.6 เท่า สำหรับกรณีการซินเตอร์ริงในบทความนี้ ใช้วิธีการให้ความร้อนกับตัวตรวจวัดแสงด้วยการซินเตอร์ริง (Sintering) ที่อุณหภูมิ 500 °C เวลา 15 นาที พบว่า กระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงก่อนการซินเตอร์ริงมีค่ากระแสมืดลดลงเมื่อเทียบกับตัวตรวจวัดแสงก่อนการซินเตอร์ริง โดยค่ากระแสมืดของตัวตรวจวัดแสงที่กัดด้วยสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20 wt% และสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5 wt% ผสมกับกรดซิลิซิก มีค่าลดลงจากอุปกรณ์ที่ไม่มีด้านการซินเตอร์ริง 15.76 และ 13.2 เท่า ตามลำดับ

คำสำคัญ : ตัวตรวจวัดแสง, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์, โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์แบบร่องรูปตัวยู, กรดอะซิติกแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์, กรดซิลิซิก, การซินเตอร์ริง

Abstract

This paper is presented about photocurrent increase and dark current decrease of UMSM photodetector by fabrication of random pyramid on U-shape with anisotropic etching of silicon surface by using KOH solution and TMAH solution for etching to increase light detection area which result in photocurrent increasing also. Based on experimental result, photocurrent of UMSM photodetector that etched

by TMAH solution with concentration 5 wt% that added silicic acid more than photocurrent of MSM photodetector 2.6 times. For dark current decreasing by sintering with temperature 500 °C and 15 minutes, dark current of photodetector after sintering more than device that without sintering. Dark current of device that etched by KOH solution with concentration 20 wt% and device that etched by TMAH solution with concentration 5 wt% that added silicic acid decrease from device that without sintering 15.76 and 13.2 times respectively.

Key word : Photodetector, MSM, UMSM, TMAH, silicic acid, Sintering

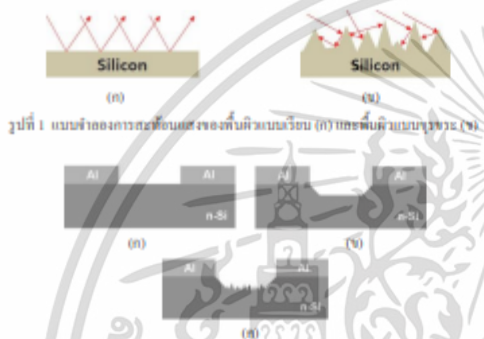
1. บทนำ

ในปัจจุบันอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำได้เข้ามามีบทบาทในการพัฒนาเทคโนโลยี เพื่อตอบสนองความต้องการทั้งในด้านอุตสาหกรรมและการอำนวยความสะดวกสบายให้กับมนุษย์ ดังนั้นการพัฒนาประสิทธิภาพของอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำจึงถูกนำมาศึกษาในบทความนี้ โดยอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่นำมาศึกษา คือ ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู-สารกึ่งตัวนำ-โลหะ (Metal-Semiconductor-Metal : MSM) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เนื่องจากมีเพียงชั้นโลหะที่อุกสร้งบนสารกึ่งตัวนำ ทำให้ง่ายต่อการสร้าง นอกจากนี้ตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ยังมีสัญญาณการรบกวนต่ำทำให้ความไวไฟที่เพียงพอในโครงสร้างค่าทำงานด้วยความเร็วสูง [1] และสามารถประยุกต์ใช้กับวงจรรวมได้ ซึ่งคุณสมบัติที่ดีของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง คือ มีกระแสแสงสูงและกระแสมืดต่ำ ซึ่งการเพิ่มกระแสแสงสามารถทำได้โดยการเพิ่มพื้นที่รับแสงของตัวตรวจวัดแสงแบบ MSM ด้วยเทคนิคการกัดสารกึ่งตัวนำให้เป็นร่องรูปตัวยู เรียกอุปกรณ์ชนิดนี้ว่า อุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงแบบร่องรูปตัวยู (U-shape Metal-Semiconductor-Metal : UMSM) [2] นอกจากนี้เทคนิคการสร้างพีระมิดแบบสุ่มบนร่องรูปตัวยูที่เป็นอีกวิธีหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มพื้นที่รับแสง เนื่องจากพีระมิดแบบสุ่มมีโครงสร้างเป็นแบบพีระมิดที่มีขนาดไม่เท่ากัน และมีการจัดเรียงตัวแบบไม่สม่ำเสมอ เมื่อมีแสงตกกระทบบนผิว

PH 01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้านหนึ่งของพีระมิดจะทำให้แสงสะท้อนไปยังผิวของพีระมิดอีกด้านหนึ่ง ส่งผลให้เกิดการสะท้อนแสงแบบไม่เป็นระเบียบ และเกิดการดูดกลืนแสงหรือพลังงาน โฟตอนเพื่อนำพลังงานเหล่านี้ไปแปลงเป็นพลังงานไฟฟ้าได้มากขึ้น [3-4] ดังแสดงตามรูปที่ 1 โดยโครงสร้างตัวตรวจวัดแสง MSM แบบเชิงรวม แบบร่องรูปคิ้ว และแบบพีระมิดบนร่องรูปคิ้ว แสดงดังรูปที่ 2 สำหรับการลดกระแสรั่วสามารถทำได้โดยการให้ความร้อนกับจันงาน เพื่อให้รอยสัมผัสมีความสมบูรณ์มากขึ้น และช่วยเพิ่มความสูงของกำแพงกั้น [2,4]



รูปที่ 1 แบบจำลองการสะท้อนแสงของพื้นผิวบนเว็บบน (n) และพีเอ็นบนซิลิคอน (p)
รูปที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างตัวตรวจวัดแสงชนิด Al/p-Si/Al
(a) โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงรวม
(ข) โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงบนร่องรูปคิ้ว
(ค) โครงสร้างตัวตรวจวัดแสงบนร่องรูปคิ้วแบบพีระมิดบนร่องรูปคิ้ว

ในบทความนี้จึงสนใจการเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์ตรวจวัดแสงแบบ MSM ด้วยกระบวนการกัดแบบแอนไอโซโทรปิกโดยใช้สารละลาย KOH และ TMAH ด้วยความเข้มข้นที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีการเติมกรดซัลฟิวริกในสารละลาย TMAH เพื่อเพิ่มความขรุขระของผิวที่จะให้พื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นอีกด้วย ซึ่งการลดกระแสรั่วจะถูกทำด้วยกระบวนการจันเคอร์ริง

2. การทดลอง

2.1 การสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสง

การสร้างอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงเริ่มจากผิวเว็บบนซิลิคอนชนิดเอ็บบน (100) มีความหนา 0.25 μm และสภาวะความดันหนา 10 $\Omega\text{-cm}$ แล้วทำการสร้างชั้นอะลูมิเนียมหนา 1.5 μm บนแผ่นซิลิคอนด้วยกระบวนการสปัตเตอริง (Sputtering) และสร้างชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ (SiO_2) ที่มีความหนา 2 μm ด้วยกระบวนการเคลือบฟิล์มบางซิลิคอนด้วยพลาสมา (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition : PE-CVD) เพื่อใช้สำหรับป้องกันการกัดชั้นอะลูมิเนียม ชั้นต่อไปคือกระบวนการโฟโตลิโธกราฟี (Photolithography) ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้สำหรับสร้างลวดลายของชั้นอะลูมิเนียมบนแผ่นซิลิคอน จากนั้นกัดผิวซิลิคอนให้เป็นพีระมิดบนร่องรูปคิ้วด้วยสารละลายตาม

เงื่อนไขในตารางที่ 1 โดยทำการกัดที่อุณหภูมิ 80 $^{\circ}\text{C}$ และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที จากนั้นนำอุปกรณ์ไปกัดชั้นซิลิคอนไดออกไซด์ที่เหลือออก และนำจันงานเข้าสู่กระบวนการจันเคอร์ริง (Sintering) โดยอุณหภูมิที่ใช้ในงานวิจัยนี้อ้างอิงมาจากผลการทดลองที่อุณหภูมิ 500 $^{\circ}\text{C}$ เวลา 15 นาที ซึ่งมีความสูงของกำแพงกั้น 0.72 eV [3]

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดลองสำหรับกัดผิวซิลิคอน

เงื่อนไข	ความเข้มข้นสารละลาย
1	สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt%
2	สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25wt%
3	สารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25 wt% ผสม IPA (ไอโซโพรพานอล) ที่ความเข้มข้น 30vol%
4	สารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20 wt%
5	มีดละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt% ความกรดจีโอลิก 34 p1

2.2 การวัดลักษณะทางกายภาพและลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า

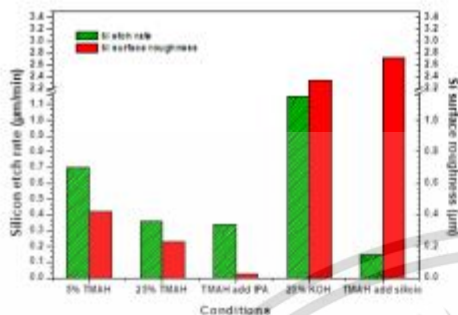
วัดความลึกของผิวซิลิคอนด้วยเครื่อง Profilometer และวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope : SEM) จากนั้นนำอุปกรณ์ไปทดสอบลักษณะสมบัติทางไฟฟ้า วัดระบัตการตอบสนองของกระแสขณะไม่ได้รับแสงสภาวะทวน และขณะได้รับแสง สดกระแทบด้วยความเข้มแสง 25,000 Lux มีแรงดันไบอัสย้อนกลับ 10 V

3. ผลการทดลอง

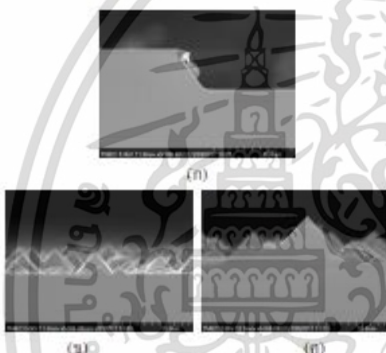
3.1. การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพพื้นผิวซิลิคอนของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงบนร่องรูปคิ้ว (UMSM)

จากรูปที่ 3 พบว่าสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt% ผสมกรดซัลฟิวริกมีอัตราการกัดซิลิคอนที่เร็วที่สุด เท่ากับ 0.145 $\mu\text{m}/\text{min}$ และมีความขรุขระของผิวซิลิคอนสูงสุด เท่ากับ 2.73 μm ซึ่งพื้นผิวของซิลิคอนที่มีความขรุขระมากขึ้นเกิดจากการเติมกรดซัลฟิวริกในสารละลาย TMAH และในทางตรงกันข้ามเมื่อเติมสารละลาย IPA ลงในสารละลาย TMAH จะช่วยให้พื้นผิวซิลิคอนมีความเรียบ เนื่องจากสารละลาย IPA เป็นสารลดแรงดึงผิว [5-6] ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในรูปที่ 3 โดยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25wt% ผสม IPA ที่ความเข้มข้น 30vol% มีความขรุขระของผิวซิลิคอนต่ำที่สุด ภาพถ่ายพื้นผิวซิลิคอนของอุปกรณ์ UMSM จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กึ่งขยาย 5000 เท่า แสดงในรูปที่ 4 โดยรูปที่ 4 (ก) แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวซิลิคอนที่เรียบของอุปกรณ์ UMSM ที่กัดด้วยเงื่อนไขที่ 3 สำหรับรูปที่ 4 (ข) และ (ค) แสดงการกระจายตัวของพีระมิดบนร่องของอุปกรณ์ UMSM ที่กัดด้วยเงื่อนไขที่ 4 และ 5 ซึ่งการกระจายตัวของพีระมิดบนร่องของพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยเงื่อนไขที่ 5 (รูปที่ 4 (ค)) มากกว่าพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยเงื่อนไขที่ 4 (รูปที่ 4 (ข)) จึงเป็นผลมาจากการเติมกรดซัลฟิวริกในสารละลาย TMAH ดังที่กล่าวมาข้างต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



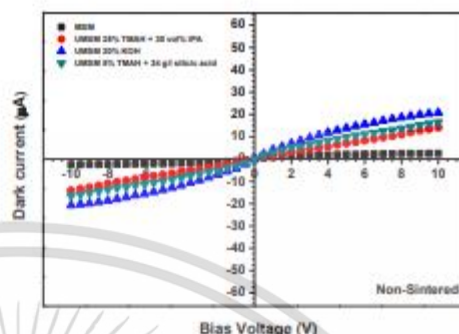
รูปที่ 3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการกัดและความขรุขระของพื้นผิวซิลิคอนพื้นเอ็อน โฟลของสารละลายที่ใช้กัด ที่อุณหภูมิ 50 °C



รูปที่ 4 พื้นผิวฟิล์มของอุปกรณ์ LMSM จากห้องสุญญากาศของอีกสถาบันหนึ่งสภาวะที่ต่างกันจะดู Surface

- (ก) พื้นผิวฟิล์มของฟิล์มตัวสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 25% และ IPA ที่ความเข้มข้น 30%
- (ข) พื้นผิวฟิล์มของฟิล์มตัวสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20%
- (ค) พื้นผิวฟิล์มของฟิล์มตัวสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 34% และกรดซิลิซิก 34 g/l

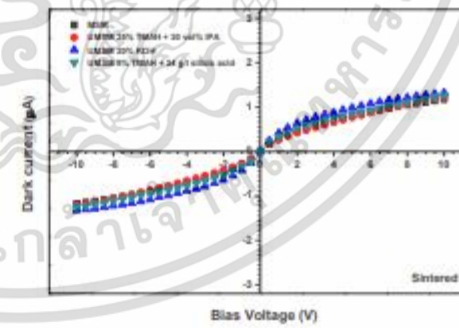
3.2. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติทางไฟฟ้าของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงจากการพิจารณากระแสของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงก่อนการขึ้นเครื่องที่แสดงในรูปที่ 5 พบว่ากระแสของอุปกรณ์ LMSM ที่เกิดตัวสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20% มีค่าสูงสุด เท่ากับ 20.80 µA โดยกระแสเกิดจากความสูงของกำแพงศักย์ซึ่งมีความต่าง ที่ไม่ติดัดครอนสามารถเคลื่อนที่ผ่านกำแพงศักย์จากด้าน โด๊ปเข้า ไปอีกรด้านสารกึ่งตัวนำได้โดยง่าย [1,7] ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนดังกล่าวจะทำให้เกิดกระแส



รูปที่ 5 ลักษณะสมบัติกระแสตรงของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงรวม และตัวตรวจวัดแสงแบบร่องวงนูนด้วย การขึ้นเครื่องด้วย จะไม่ได้รับแสงกระทบ

เมื่อวิเคราะห์กระแสของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านการขึ้นเครื่องที่แสดงในรูปที่ 6 เปรียบเทียบกับกระแสของตัวตรวจวัดแสงก่อนการขึ้นเครื่อง พบว่ากระแสของอุปกรณ์ตัวตรวจวัดแสงที่ผ่านการขึ้นเครื่องที่ลดลง โดยอุปกรณ์ LMSM ที่เกิดด้วยสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20% และสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 34% มีค่าเฉลี่ย 3.4 91 นีที่กระแสเฉลี่ยลดลง 15.76 และ 13.2 เท่าตามลำดับ ซึ่งแสดงในตารางที่ 2 สหสัมพันธ์ที่ลดลงเกิดจากค่าของกำแพงศักย์ภายในที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากทำให้ความร้อนกับอุณหภูมิที่ขึ้นเครื่องเพื่อสภาวะที่ว่างโลกและสารกึ่งตัวนำมีความหนาแน่นขึ้นส่งผลให้ค่ากำแพงศักย์เพิ่มขึ้น [7] จึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสมืด (I₀) และความสูงกำแพงศักย์ (Φ_B) สอดคล้องกับสมการที่ 1

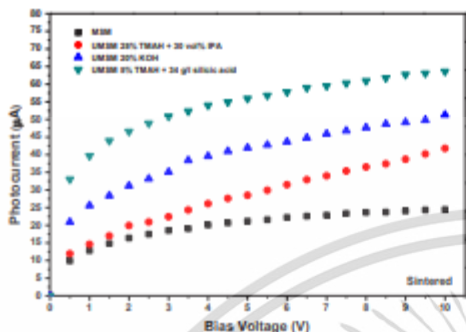
$$I_0 = AA'T^2 \exp\left(-\frac{q\Phi_B}{kT}\right) \quad (1)$$



รูปที่ 6 ลักษณะสมบัติกระแสตรงของตัวตรวจวัดแสงแบบเชิงรวม และตัวตรวจวัดแสงแบบร่องวงนูนด้วย การขึ้นเครื่องที่อุณหภูมิ 500 °C จะไม่ได้รับแสงกระทบ

PH 01

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7 ลักษณะสมบัติกระแสแสงของตัวตรวจจับแบบเชิงรวมและตัวตรวจจับแบบร่องรูปตัวู หลังการซีดสวที่อุณหภูมิ 500 °C ขณะได้รับแสงอาทิตย์ที่ความเข้มแสง 25,000 lux

พิจารณากระแสแสงของตัวตรวจจับแสงทั้ง 4 ชนิดที่แสดงในรูปที่ 7 พบว่าอุปกรณ์ UMMSM ที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt% ผสมกรดซิตริก 34 g/l มีกระแสแสงสูงสุดเท่ากับ 65.6 µA โดยมีความกว้างของอุปกรณ์ MSM 2.6 เท่า ซึ่งเกิดจากพื้นผิวซิลิคอนที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt% ผสมกรดซิตริก 34 g/l มีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสมบูรณ์ร่องรูปตัวู ทำให้มีพื้นที่รับแสงเพิ่มขึ้นและส่งผลให้กระแสแสงเพิ่มขึ้นด้วย นอกจากนี้อัตราส่วนระหว่างกระแสแสงต่อกระแสของตัวตรวจจับ UMMSM ที่กัดด้วยเงื่อนไขที่ 5 มีค่าสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังนั้น อุปกรณ์ UMMSM ที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt% ผสมกรดซิตริก 34 g/l จึงเป็นเงื่อนไขการกัดซิลิคอนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับบทความนี้

ตารางที่ 2 ลักษณะคุณสมบัติทางไฟฟ้าของตัวตรวจจับแบบเชิงรวมและตัวตรวจจับแบบร่องรูปตัวู

ชนิดของสารละลาย	กระแสแสง (µA)		กระแสไฟฟ้า (µA)	อัตราส่วนกระแสแสงต่อกระแสไฟฟ้า (mA)	ค่าสัมประสิทธิ์การขยายตัว (ppm/°C)	อัตราส่วนกระแสแสงต่อพื้นที่ (µA/cm²)
	ความเข้มข้น	ความยาว				
MSM	2.5	1.17	24.45	2.14	-	21.9
UMMSM 20 %wt KOH	20.8	1.32	51.32	1596	2.09	18.88
UMMSM 25 %wt TMAH + IPA	14.11	1.22	41.91	11.97	0.71	34.27
UMMSM 5 %wt TMAH + Citric	16.51	1.25	63.9	112	2.6	39.88

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลอง พบว่าพื้นผิวซิลิคอนของอุปกรณ์ตัวตรวจจับแสงแบบร่องรูปตัวูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt% ผสมกรดซิตริก 34 g/l มีลักษณะเป็นพีระมิดแบบสูง โดยมีความขรุขระของผิวซิลิคอนและกระแสแสงสูงสุด ซึ่งกระแสแสงของตัวตรวจจับแสงแบบร่องรูปตัวูที่กัดด้วยสารละลาย TMAH ที่ความเข้มข้น 5wt% ผสมกรดซิตริก 34 g/l มีกระแสแสงสูงกว่าตัวตรวจจับแสงแบบเชิงรวม 2.6 เท่า

ในส่วนของการประเมินค่าของอุปกรณ์ตัวตรวจจับแสงมีค่าลดลงหลังจากการซีดสวริง โดยอุปกรณ์ตัวตรวจจับแสงแบบร่องรูปตัวูที่กัดด้วยสารละลาย KOH ที่ความเข้มข้น 20wt% และสารละลาย TMAH 5wt% ผสมซิตริก 34 g/l มีค่ากระแสแสงลดลง 15.76 และ 13.2 เท่า ตามลำดับ ดังนั้น การสร้างพีระมิดแบบสมบูรณ์ร่องรูปตัวูของอุปกรณ์ตรวจจับแสง และการให้ความร้อนกับตัวตรวจจับแสงสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของตัวตรวจจับแสง

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณผู้อำนวยการศูนย์วิจัยนาโนเทคโนโลยี (ERC) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง และศูนย์เทคโนโลยีไมโครอิเล็กทรอนิกส์ (TMEC) สถาบันเครื่องในการสร้างอุปกรณ์ อนุภาคนาโน, ก๊าซอินทรีย์, อนุภาคนาโน และอนุภาคนาโน และขอขอบคุณอาจารย์และทีมงานวิจัยทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือสำหรับบทความนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] สุรศักดิ์ เนียมเจริญ, "รอยสัมผัสโลหะและสารกึ่งตัวนำ", สำนักพิมพ์เนียมเจริญส ขงทลย, พ.ศ. 2558
- [2] งานจิต มงคลธนาพันธ์, "การศึกษา การกัดแผ่นผลึกซิลิคอนแบบร่องรูปตัวูโดยสารละลาย TMAH สำหรับสร้างตัวตรวจจับแสงแบบ UMMSM", บัณฑิตวิทยาสตรีย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2559
- [3] สุภชชา แจงอรุณ, "การเพิ่มกระแสแสงของโฟโตไดโอดแบบ UMMSM ชนิด Aln-Si/Al ด้วยการสร้างพีระมิดแบบสูง", บัณฑิตวิทยาสตรีย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2560
- [4] Patrick Campbell and Martin, "Light trapping properties of pyramidally textured surfaces", J. Appl. Phys. 62(1), page 243 – 249, 1987
- [5] วุฒิชัย กวีอินทร์, "การกัดพื้นผิวเวียงโดยใช้สารละลาย TMAH ที่เติม IPA สำหรับตัวตรวจจับแสงโครงสร้าง Aln-Si/Al แบบร่องรูปตัวู", บัณฑิตวิทยาสตรีย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, พ.ศ. 2560
- [6] Małgorzata Kramkowska and Irena Zubeł, "Silicon anisotropic etching in KOH and TMAH with modified surface tension", Procedia Chemistry, page 774 -777, 2009
- [7] Ricardo L. Ohtał, Carlos E. Vianał, Nilson I. Morimotoł, and Ben-Hur V. Borges, "Fabrication of Ti-Si-Ti Metal-Semiconductor-Metal Photodetectors Using Low Temperature Rapid Thermal Annealing", Journal Integrated Circuits and Systems v.2, page 85 – 88, 2007

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



iC_{east} 2021

The 7th International Conference
on Engineering, Applied Sciences
and Technology
April 1-3, 2021



PROCEEDINGS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Dark Current Reduction of MSM Photodetector by Sintering

Jidapa Vijafun^{1,*}, Kamonwan Suttijaler¹, Nutthaphat Thornyanadacha² and Surasak Niemcharoen^{1,*}

¹Department of Electronics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Chalongkrung Road, Ladkrabang, Bangkok, Thailand 10520.

²Thai Microelectronics Center (TMEC), Wangtakien District, Amphur Muang, Chachoengsao, Thailand 24000

*corresponding author, E-mail: Jidapa_kmitl@hotmail.com

*corresponding author, E-mail: surasak.ni@kmitl.ac.th

Abstract

In this study is presented about the dark current reduction of a metal-semiconductor-metal (MSM) photodetector by sintering process at temperature 100 to 300 °C. This planar MSM photodetector was fabricated on p-type of silicon wafer with Al and Ti electrode. At 10V bias, the dark current of device without sintering and device after sintering at 250 °C are 2.56 μ A and 1.68 μ A at 10V respectively. In addition, barrier height of device after sintering at 250 °C is higher than device without sintering due to thermal from sintering process can increase the interface layer between metal (Ti) and semiconductor (Si) that result in few electron from metal side is transferred to semiconductor.

Keywords: MSM, Photodetector, Sintering, Dark current.

1. INTRODUCTION

Semiconductor device has been influenced in the technology improvement, the semiconductor device that be attractive is the metal-semiconductor-metal (MSM) photodetector. The MSM photodetector is optoelectronic device that has simple fabrication due to requires only a single photolithography step, high speed device due to low capacitance, and appropriate to apply with integrated circuit (IC) [1].

The method to improve the performance of MSM device are increasing photocurrent and dark current reduction. To increase photocurrent by fabrication of U shape on light detection area [3]. The dark current reduction including coating SiO₂ (passivation layer) on active area [2] to prevent contamination or damage on metal surface, fabricate an insulator under electrode area and annealing or sintering process [3-4].

In this study select the sintering process to improve the performance of MSM device due to this technique is not complicated method. This device demonstrated that dark current can be reduced by sintering process due to the interface layer between metal and semiconductor is increased after applied thermal from sintering process.

2. EXPERIMENTS

The MSM photodetector was fabricated on p-type of silicon wafer 625 μm with resistivity 20 $\Omega\text{-cm}$. Ti 0.3 μm deposited on Si wafer and Al 0.5 μm deposited on Ti layer by sputtering process. Al-Ti electrodes was patterned by photolithography process, etch Al and Ti with $80\text{H}_3\text{PO}_4 : 5\text{HNO}_3 : 5\text{CH}_3\text{COOH} : 10\text{DI}$ at temperature 50 $^\circ\text{C}$ and $20\text{H}_2\text{O} : 1\text{H} : 1\text{H}_2\text{O}$ at room temperature respectively.

The sintering process was performed with 5 temperature including 100, 150, 200, 250, and 300 $^\circ\text{C}$ 15 minutes in furnace that apply N_2 to prevent oxidation. The photocurrent and dark current measurement use laser with wavelength 635 nm and calculate for barrier height.

The pattern of MSM device show on Fig 1 and cross sectional of overall structure show on Fig 2, two square of Al-Ti electrodes are on Si wafer, the first layer of electrode is Al, second layer is Ti that contact with Si. The contact of Ti-Si is Schottky contact and Si area between electrodes is the light detection area.



Fig 1 Top view of MSM photodetector



Fig 2 Cross sectional of MSM photodetector under SEM inspection (Overall structure)

3. EXPERIMENTAL RESULTS

Fig 3 show Current-Voltage characteristic of MSM Photodetector during non illumination. The current during non illumination or dark current of MSM device after sintering lower than device before sintering and continuously decrease since sintering at 100 $^\circ\text{C}$ until 250 $^\circ\text{C}$, the dark current at 250 $^\circ\text{C}$ is the lowest of this experiment which decrease around 34% from device before sintering, the dark current at bias 10V of device before sintering and after sintering 250 $^\circ\text{C}$ are 2.56 and 1.68 μA respectively. In addition, barrier height of device after sintering 250 $^\circ\text{C}$ is 0.73 eV, higher than device before sintering as indicate on table 1. Therefore the decreased dark current correlated with the high barrier height, few electron from metal side is transferred to semiconductor due to the high barrier height result in electron from metal side is required high energy to transfer to semiconductor. Furthermore the correlation of dark current (I_0) and barrier height (Φ_{b0}) refer to formula 1. For the increased barrier height related to thermal from sintering process that can increase the interface layer between metal and semiconductor [4] as show on figure 4, interface layer of Ti-Si appear on device that sintering at 250 $^\circ\text{C}$.

$$J_0 = A^* T^2 \exp\left(\frac{-q\Phi_{b0}}{kT}\right) \quad (1)$$

The dark current of device after sintering at 300 °C increase from 250 °C, the increased dark current due to barrier height lower than device at 250 °C as define on table1, barrier height of device with 300°C sintering is 0.72 eV. The low barrier height correlated with formation of Titanium disilicide (TiSi₂) on interface layer between Ti and Si.[4-6]

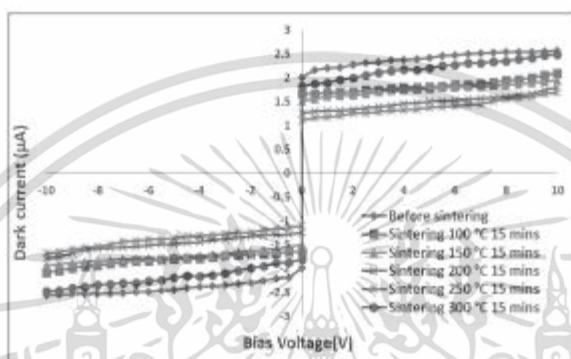


Fig 3 Current-Voltage characteristic of MSM Photodetector during non illumination

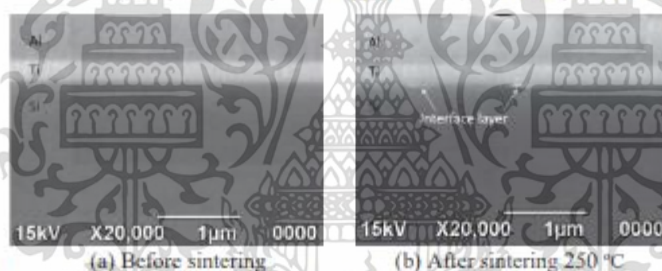


Fig 4 Cross sectional of MSM photodetector under SEM inspection (Interface layer)

The photocurrent / dark current ratio of device at 250 °C is the highest of this experiment as 43.40 refer to Table 1, more than device before sintering 41% because the dark current of device at 250 °C lower than device before sintering so MSM device after sintering at 250 °C is the highest performance of this experiment.

Table 1 Electrical parameter of MSM photodetector at bias 10V

Condition	Dark current (µA)	Photocurrent (µA)	Photocurrent / Dark current ratio	Barrier height (eV)
Before sintering	2.56	79.84	31.19	0.72
Sintering 100 °C	2.09	67.71	34.88	0.72
Sintering 150 °C	1.94	69.26	35.70	0.72
Sintering 200 °C	1.79	70.51	39.39	0.73
Sintering 250 °C	1.68	72.92	43.40	0.73
Sintering 300 °C	2.48	60.42	24.36	0.72

4. CONCLUSION

The MSM photodetector after sintering at temperature 250 °C show the dark current is lower than device before sintering 34% and barrier height is higher than device before sintering 41% due to thermal from sintering to increase interface between Ti and Si. In addition, the photocurrent / dark current ratio of MSM device after sintering 250 °C is the highest of this experiment as 43.40. Therefore sintering can reduce the dark current and improve the performance of MSM photodetector.

ACKNOWLEDGMENT

The authors are appreciate to Electronic Research Center (ERC), King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang, Thai Microelectronic Center (TMEC) and advisor for equipment and suggestion.

REFERENCE

- [1] Surasak N. 2015. Metal and Semiconductor Contacts. Bangkok : Mean Supply Service Publisher. (in Thai)
- [2] Surasak N. and Somkiet S. 2020. Integrated Circuit Technology. Bangkok : Mean Supply Service Publisher. (in Thai)
- [3] Yutthana J. 2017. Increasing Photodiode Photocurrent on Al/n-Si/Al UMSM that Forming by Random Pyramid, Bangkok : King Mongkut Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai)
- [4] S.Ogawa, T.Kouzaki, T.Yoshida and R.Sinclair. 1991. Interface microstructure of titanium thin-film / silicon single-crystal substrate correlated with electrical barrier heights. *Journal of Applied Physics*-Vol.70, No.2.
- [5] H.J.W Van Houtum, I.J.M.M.Raaijmakers and T.J.M.Menting 1987. Influence of grain size on the transformation temperature of C49 TiSi₂ to C54 TiSi₂. *Journal of Applied Physics* Vol.61, No.8.
- [6] Malcolm J., Thomson, Robert J., Nemanich and Chuang Chuang TSAI, 1983. Schottky Barrier Amorphous-Crystalline Interface Formation. *Surface Science* 132, 256-263.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล	นางสาวจิตาภา วิจผืน
วัน เดือน ปีเกิด	8 ธันวาคม 2533
ที่อยู่	148/1 หมู่ 3 ตำบลป่าเมต อำเภอมืองแพร่ จังหวัดแพร่ 54000
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2556 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาฟิสิกส์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ความชำนาญเฉพาะด้าน	1.) เทคโนโลยีสารกึ่งตัวนำ 2.) ตัวตรวจจับแสง (Photodetector)
ประสบการณ์การทำงาน	
พ.ศ.2556-2557	หัวหน้าส่วนทดสอบผลิตภัณฑ์ (Testing Section Chief) บริษัทเฟดเดอร์ล อิลคติก จำกัด
พ.ศ.2557-2562	วิศวกรระบบคุณภาพ (Quality System Engineer) บริษัทยูแทคไทย จำกัด
พ.ศ.2562-2565	วิศวกรวิเคราะห์ของเสีย (Failure Analysis Engineer) บริษัทยูแทคไทย จำกัด
ปัจจุบัน	วิศวกรวิเคราะห์ของเสีย (Failure Analysis Engineer) บริษัทอินฟินิออน เทคโนโลยีส์ (ประเทศไทย) จำกัด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้